



## PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation) :

Définition de la portée d'une campagne de terrain parrainée par la NASA

### Rapport final - décembre 2024

#### Auteurs principaux

\* Indique les auteurs coordinateurs

Elsa M. Ordway\* (Université de Californie, Los Angeles [UCLA]), Michael Keller\* (United States Forest Service [USFS], Jet Propulsion Laboratory [JPL]), Marcos Longo (Lawrence Berkeley National Laboratory [LBNL]), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Yanlei Feng (Massachusetts Institute of Technology [MIT]), Hannah Stouter (UCLA), Isaac N. Aguilar Rivera (California Institute of Technology [Caltech]), Ane Alencar (Amazon Environmental Research Institute [IPAM]), Adia Bey (NASA Goddard Space Flight Center [GSFC], University of Maryland [UMD]), Renato K. Braghieri (Caltech, JPL), Anabelle Cardoso (University of Buffalo & University of Cape Town), Dana Chadwick (JPL), Jose D. Fuentes (Pennsylvania State University [Penn State]), Regina Eckert (JPL), Temilola Fatoyinbo (GSFC), António Ferraz (JPL), Liane Guild (NASA Ames Research Center [ARC]), Matthew Johnson (ARC), Esi Kane (University of Energy and Natural Resources, Sunyani-Ghana), Lydie-Stella Koutika (Centre de recherche sur la productivité et la durabilité des plantations industrielles [CRDPI]), Yue Li (UCLA), Junjie Liu (JPL), Ian McCubbin (JPL), Félicien Meunier (Université de Gand), Charles Miller (JPL, Caltech), Helene C. Muller-Landau (Smithsonian Tropical Research Institute [STRI]), Teodyl Nkuintchua (World Resources Institute), Matheus Nunes (UMD), Le Bienfaiteur Sagang Takougoum (UCLA), Maria J. Santos (Université de Zurich), Fabian D. Schneider (Université d'Aarhus), Marc Simard (JPL), Bonaventure Sonké (Université de Yaoundé I), César Terrer (MIT), Marius von Essen (UCLA), Michelle Y. Wong (Université de Yale), Sarah Worden (JPL), Xiangming Xiao (Université d'Oklahoma [OU]), Virginia Zaunbrecher (UCLA)

#### Auteurs contributeurs

Marijn Bauters (Université de Gand), Pascal Boeckx (Université de Gand), Jennifer Bowen (Université de Stanford), Iniquilipi Chiari (Alliance mondiale des communautés territoriales [GATC]), Ovidiu Csillik (Université Wake Forest), Gloria Diez (GATC), Marcelo Doroso (GATC), Deborah Delgado Pugley (Université catholique pontificale du Pérou [PUCP]), Wannes Hubau (Université de Gand), Alejandra Echeverri Ochoa (Université de Californie, Berkeley), Evan Gora (Cary Institute of Ecosystem Studies), Alison Hoyt (Stanford), Juan Carlos Jintiach (GATC), Victor Maqque (OU), Clarice Perryman (Stanford), Zoe Pierrat (JPL), Leila Saraiwa (GATC), Debjani Singh (Oak Ridge National Laboratory [ORNL]), Iroro Tanshi (Université de Washington&), Small Mammal Conservation Organisation [SMACON]), Jill Thompson (UK Centre for Ecology & Hydrology [UKCEH]), Hans Verbeeck (Université de Gand)

## Avant-propos

Les opportunités de recherche en sciences de l'espace et de la Terre de la NASA publiées en 2022 ont appelé à des propositions pour mener des études de cadrage afin d'identifier les questions scientifiques et de développer la conception initiale de l'étude et le concept de mise en œuvre pour une nouvelle campagne de terrain sur l'écologie terrestre de la NASA. Au printemps 2023, la NASA a sélectionné deux projets à financer, dont un projet intitulé : "A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign" (NASA Grant 80NSSC23K1019 à l'Université de Californie, Los Angeles). Le présent rapport contient les recommandations de cette étude de cadrage, qui présente la PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation). La NASA a défini dix attentes à identifier pour chaque étude exploratoire :

1. Les questions et problèmes scientifiques.
2. L'état actuel de la science.
3. Le potentiel d'une avancée scientifique majeure et significative.
4. Le rôle central et critique de la télédétection de la NASA.
5. Les composantes scientifiques essentielles de l'étude et les raisons pour lesquelles un travail d'équipe coordonné est nécessaire pour leur mise en œuvre.
6. Une conception globale de l'étude identifiant l'infrastructure d'observation (par exemple, observations spatiales, aériennes et/ou *in situ*) et d'analyse (par exemple, modèles, données et système d'information) nécessaire.
7. La faisabilité du projet proposé, tant sur le plan technique que logistique.
8. L'engagement de la communauté de la recherche au sens large pour obtenir un retour d'information sur les idées, évaluer l'intérêt et favoriser la diversité et l'inclusion.
9. Les compétences disciplinaires nécessaires pour mener l'étude et impliquer les partenaires potentiels dans leurs activités de planification.
10. Utilisation potentielle des résultats pour les applications et l'aide à la décision.

Ce livre blanc fournit 1) la justification scientifique ; 2) un concept initial de conception de l'étude ; 3) une présentation des questions scientifiques, des buts et des objectifs ; 4) la justification en termes d'état de l'art, de pertinence et d'avancées attendues ; 5) des concepts de mise en œuvre ; et 6) d'autres informations pour permettre à la NASA d'évaluer pleinement le projet. Nous décrivons le concept PANGEA, y compris les thèmes scientifiques PANGEA (*section 2*), les questions scientifiques (*section 3*), les avancées scientifiques et techniques découlant de PANGEA (*section 4*), le rôle essentiel de la télédétection de la NASA (*section 5*), la stratégie de recherche et la conception de l'étude PANGEA (*section 6*), les priorités de PANGEA en matière de renforcement des capacités et de formation (*section 7*), la stratégie d'engagement communautaire (*section 8*), la capacité à permettre Earth Action (*section 9*), et la faisabilité technique et logistique (*section 10*).

PANGEA propose une approche modulaire : Nous avons sélectionné un domaine central pour donner la priorité aux mesures au sol et aux observations aériennes dans les zones tropicales africaines, qui présentent des lacunes importantes en matière de données et de connaissances,

ainsi qu'aux comparaisons avec les zones tropicales des Amériques. Les paysages candidats dans le domaine central sont identifiés dans la *section 6.2.2*. Nous avons également sélectionné un domaine étendu, qui englobe les forêts pantropicales d'autres régions, notamment d'Asie et d'Australie. Le domaine étendu fera l'objet d'analyses de modélisation et de télédétection par satellite. Les limites du domaine étendu sont définies à la *section 1.4*. Au cours du processus de cadrage, l'équipe PANGEA s'est engagée auprès d'une large communauté de partenaires potentiels dans les deux domaines, en sollicitant et en répondant à leurs commentaires afin de s'assurer que, si PANGEA est sélectionné, nous serons en mesure de collaborer et de coordonner efficacement les efforts en cours et à venir (voir l'*annexe D*).

Le concept PANGEA reflète les voix de nombreuses personnes et a été développé en collaboration avec plus de 800 personnes représentant plus de 300 organisations de 42 pays sur 5 continents. Des ateliers ont été organisés à Washington DC, au Cameroun, au Pérou, au Brésil et en Thaïlande, avec environ 275 participants en personne et 298 participants virtuels. Les participants au processus de définition du champ d'application représentaient de nombreuses communautés, notamment la communauté universitaire sous les tropiques, ainsi qu'aux États-Unis et en Europe ; les communautés autochtones et locales des tropiques ; la communauté de la NASA et d'autres agences fédérales américaines ; les agences spatiales internationales ; les agences gouvernementales étrangères ; les organisations de la société civile ; et l'industrie privée (voir l'*annexe C*). L'effort de délimitation du champ d'application a mis en évidence l'impérieuse nécessité de PANGEA et l'occasion opportune qu'il offre de collaborer et de se coordonner avec de nombreuses activités existantes et à venir décrites dans ce livre blanc.

## **Remerciements**

La définition du champ d'application de PANGEA a été en grande partie un effort de la communauté internationale. Il n'aurait pas été possible sans les contributions d'un nombre incalculable de personnes. Nous sommes profondément reconnaissants à tous ceux qui ont contribué par leurs idées, leur temps, leur énergie, leurs ressources et leur financement à l'organisation de cette campagne de terrain dont le besoin est urgent. Nous remercions tout particulièrement le soutien financier et les ressources supplémentaires de la NASA qui ont rendu possible cet effort international de délimitation du champ d'application. Il s'agit notamment des programmes internationaux de l'USFS, de l'université de Californie-Los Angeles (UCLA), du groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts (GCF-TF), de la Wildlife Conservation Society (WCS), de l'Institut international d'agriculture tropicale (IITA), de l'Alliance Bioversity International et du CIAT, du Centre pour la recherche forestière internationale et l'agroforesterie mondiale (CIFOR-ICRAF), la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), l'Université de Yaoundé I, Penn State University, l'Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), le Partenariat pour les Forêts du Bassin du Congo (PFBC), l'Institut du Bassin du Congo (IBC), l'Initiative Scientifique du Bassin du Congo (ISCB), et le NASA SERVIR Southeast Asia Hub. Marcos Longo et Robinson Negrón-Juárez ont bénéficié d'un soutien dans le cadre du projet Next Generation Ecosystem Experiments-Tropics, financé par le ministère américain de l'énergie, Office of Science, Office of Biological and Environmental Research. Le LBNL est géré et exploité par les Régents de l'Université de Californie dans le cadre du contrat principal numéro DEAC02-05CH11231.

De nombreux membres du personnel dévoués et travailleurs ont rendu possibles les ateliers et les événements de PANGEA, en apportant une attitude positive et en résolvant les problèmes qui ont guidé PANGEA. Il s'agit notamment d'Isaac Aguilar, Lucia Bolzoni, John Mosinge, Emily Johnson, Michelle Brown, Robert (Bob) Lavoie, Alfonso Villasenor, Cris Silva, Daniel Blackwell, Arlyne Gonzalez, Pilar Anaya Salazar, Karina Castaneda Checa, Martha Gutierrez Fontes, et bien d'autres encore.

PANGEA est également redevable aux nombreux chercheurs et praticiens qui ont apporté leurs idées et suggestions au marathon de la campagne de terrain de la NASA sur l'écologie terrestre. Nous tenons en particulier à remercier Yaxing Wei, Bruce Wilson et Michele Thornton (ORNL), Dario Papale (Integrated Carbon Observation System [ICOS]), Gilberto Pastorello (AmeriFlux), Luiz Aragão et Bruce Forsberg (LBA), Simon Lewis (Leeds, UCL), Nicolas Barbier (Institut de recherche pour le développement, France [IRD]), Pascal Boeckx, Marijn Bauters, Wannes Hubau (Gand), Denis Sonwa (CIFOR-ICRAF → World Resources Institute [WRI]), et Stuart Davies (Smithsonian). Les auteurs principaux sont extrêmement reconnaissants au Dr. Jill Thompson (UKCEH) pour ses commentaires approfondis, détaillés et perspicaces. Grâce à ses efforts, notre document est bien meilleur. En outre, nous tenons à remercier tous les membres des six groupes de travail énumérés ci-dessous pour leur contribution aux discussions, aux idées et aux itérations de nombreux éléments de ce livre blanc.

**Groupe de travail sur les cycles biogéochimiques et la dynamique du carbone :** Abhishek Chatterjee (JPL), Alfred Ngomanda (Centre national de la recherche scientifique et technologique du Gabon), Alysson Bery (Institut du bassin du Congo), Anne Ola (INRS), Ashley Ballantyne (Université du Montana), Asmadi Saad (Université de Jambi), Bassil El Masri (Murray State University), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera), Ben Taylor (Harvard), Bila-Isia Inogwabini (WWF), Carla Restrepo (Université de Porto Rico), Chima Iheaturu (Université de Berne), Corneille Ewango (Okapi Faunal Reserve), Danielle Potocek (Spark Climate Solutions), David Lagomasino (East Carolina University), Dheeresh Kumar (Univ. of Delhi), Doug Morton (NASA Goddard), Ekene Rangel, Elhadi Adam (University of the Witwatersrand), Eric Cosio (PUCP), Farrel Boucka (AGEOS), Fernanda Santos (ORNL), Fiona Soper (McGill), Flavia Durgante (Karlsruhe Institute of Technology), Francis Manfoumbi (AGEOS), Gerbrand Koren (Utrecht University), Gillian Galford (University of Vermont), Gislain MOFACK II (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture [FAO]), Gretchen Keppel-Aleks (Université du Michigan), Hankui Zhang (SDSU), Hans Verbeeck (Université de Gand), Jim Dalling (UIUC), Jingfeng Xiao (UNH), Joe Mohan (UCI), Joshua Fisher (Université Chapman), Kate Nelson (Université McGill), Krista Anderson-Teixeira (Smithsonian), Laura Duncanson (Université du Maryland), Luis Fernandez NGOULA (Université de Yaoundé), Marcia Macedo (WHRC), Marijn Bauters (Université de Gand), Moses Cho (Université de Pretoria), Na Chen (MIT), Nate McDowell (PNNL), Patrick Namulisa (Columbia), Nick Parazoo (JPL), NIMPA NGUEMO Christiane Guillaine (Université de Bamenda), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Norma Salinas (PUCP), Pascal Boeckx (Université de Gand), Paul Arellano (NAU), Paulo Brando (Yale), Petya Campbell (Université du Maryland Baltimore County), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Rogelio Corona (UNAM), Rolf Obame (USTM), Ruofei Jia (MIT), Sarah Batterman (Cary Institute), Sparkle Malone (Yale), Steve Kwatcho Kengdo (UC Berkeley), Tana Wood (USDA Forest Service), Timothy Filley (University of Oklahoma), Tomasso Jucker (Université de Bristol),

Trevor Cambron (MIT), Vincent Medjibe (USDA Forest Service), Wu Sun (Carnegie Science), Yann Nouvellon (CIRAD), Yoseline Angel (NASA Goddard), Zeli Tan (PNNL)

**Groupe de travail sur la structure, la fonction et la diversité :** Jesus Aguirre-Gutierrez (Oxford Univ.), Loren Albert (Oregon State University), Luciana Alves (UCLA), Junior Amboko (Florida Atlantic Univ.), Nicolas Barbier (IRD), Stephanie Bohlman (University of Florida), Jeanine Cavender-Bares (Harvard), Caroline Chaves Arantes (West Virginia Univ.), Moses Cho (Univ. of Pretoria), Rogelio O. Corona-Núñez (UNAM), Claudia Coronel Enríquez (Instituto Mora), KC Cushman (ORNL), Stuart Davies (Smithsonian), Laura Duncanson (UMD), Alvaro Duque (Univ. Nacional de Colombia Sede Medellín), Sandra M Duran (Colorado State Univ.), Bassil El Masri (Murray State Univ.), Joshua Fisher (Chapman), Evan Fricke (MIT), Evan Hockridge (Harvard), Miroslav Honzak (ASU), Tommaso Jucker (University of Bristol), Matthias Kunz (GFZ Potsdam), Moses Libalah (Univ. de Yaoundé I), David Luther (Univ. George Mason), Tim Mayer (Univ. of Alabama Huntsville), Paul Moorcroft (Harvard), Doug Morton (GSFC), Luis Fernandez Ngoula (Univ. de Yaoundé I), Christopher Nyttch (Univ. de Porto Rico), Jack Orebaugh (ORNL), Dina Rasquinha (WWF), Nicholas Russo (Harvard), Norma Salinas (PUCP), Arturo Sánchez-Azofeifa (Univ. Alberta), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), Jennifer J Swenson (William & Mary), Nathan Swenson (Univ. of Notre Dame), Simon Tamungang (Univ. de Bamenda), Jill Thompson (UKCEH), Marcelle Johnson (Wageningen), German Vargas (Oregon State Univ.), Rodrigo Vargas (University of Delaware/Arizona State University), Jiaming Wen (Carnegie Institution for Science), Michael Wimberly (Univ. of Oklahoma), Lin Xiong (Univ. of Maryland), Xi Yang (Univ. of Virginia)

**Groupe de travail sur les rétroactions et interactions climatiques :** Nate McDowell (PNNL), Chi Chen (Rutgers Univ.), Manuel Lerdau (Univ. of Virginia), Rogelio O. Corona-Núñez (Facultad de Ciencias, UNAM), Joshua Fisher (Chapman), Daniela Francis Cusack (CSU), Eric Davidson (Univ. of Maryland), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar Aguilos (NCSU), Sam Rabin (NCAR), Rob Spencer (FSU), Zhuonan Wang (CSU), Isela Jasso (UNAM), William F. Laurance (James Cook Univ.), Leila Constanza Hernandez Rodriguez (LBNL), Susan Laurance (James Cook Univ.), Jingfeng Wang (Georgia Inst. Of Tech.), Gabrielle De Lannoy (KU Leuven), Gerbrand Koren (Utrecht Univ.), Jie Hsu (National Taiwan Univ.), Tomas Ferreira Domingues (Univ. de São Paulo), Carl Norlen (USGS), Jiafu Mao (ORNL), Mingjie Shi (PNNL), Yanlei Feng (MIT), Jonathan Wang (Univ. of Utah), Amy Zanne (Univ. of Miami), Emmanuel Barde Elisha (ANI Foundation), Evan Gora (Cary Institute), Xiangzhong Luo (National Univ. of Singapore), Marie Brigitte Makuate (MSRI, Cameroun), Landing Mané (OSFAC), Denis Sonwa (WRI), Louis Defo (Univ. de Yaoundé I), L. Ruby Leung (PNNL), Yoshiaki Hata (Univ. de Tokyo), Cynthia Wright (USFS), Eric Bastos Gorgens (Univ. Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri), Manh-Hung Le (GSFC), Debora Regina Roberti (Univ. Federal de Santa Maria), Kevin Njabo (Texas A&M), Victor Aimé Kemeuze (Université de Ngaoundere), John Adams Katikomo (EDA), Nyong Princely Awazi (Univ. de Bamenda, Cameroun), Martin Arthur Meka Zibi II (Univ. de Dschang), Peke Koukou Léon c'est la vie (ONG), Donald-l'or Nyame Mbia (Univ. de Yaoundé I), Nkemnkeng Francoline Jong (Univ. de Bamenda, Cameroun), Vanessa Mavila (Fondation Eboko), Olivier Bosela (IFA Yangambi), Akwayopanga Denis (Pakwach District Local Government), Bakeleki Bohin Jean Marie (IRIC), Carmen Loncthi Fobasso (APDD), Apene Derek Aziwoh (African Environmental Network), Cyrille Bienvenu Bediang (IRIC), Susanna B Hecht (UCLA), Jancy Kelly Boungou Matoumouna (Wildlife Conservation Society), Jonathan Tahiri Heri (University of Kindu, DRC), Bertrant James Taya Saah (Univ. de Yaoundé I), Nzanzu Mulimirwa

Philémon (Parlement congolais des jeunes), Regis Kouumba Mouissou (Univ. of Arkansas), Amour Macelvi Matoumouene Goma (LBGE), Paul Martial Tene Tayo (Univ. de Yaoundé I), Nanda Silatsa Serge (STA), Alain Okito (PNUE), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaoundé I), Ncangu Bahindwa Benjamin (Univ. Officielle de Bukavu), Sandjo Phallin Romeal (Institut supérieur des sciences de l'environnement), Timothy Bonebrake (Univ. of Hong Kong), James Okwiri (Agribusiness Innovation), Matthieu Aksanti Cizungu (UEFA/RDC), Thierry Michel Tene (Akdeniz University), Igor Akendengué Aken (Omar Bongo Univ.), Clovis Nzuta Kengne (Univ. de Dschang), Essama Essama Mathurin (CERAD), Dolorès Mache (Planet One-Mboa Hub), Emmanuel Kohbe Wanso (BEDD), Vadel Eneckdem Tsopgn (Univ. de Yaoundé I), Usongo Patience Abaufei (Univ. de Buea, Cameroun), Djorwe Enock (Univ. de Yaoundé I), Ravinder Sehgal (SFSU), Donato Ndong Ndong Nzang (UNGE), Nguimalet Cyriaque Rufin (Univ. de Bangui), Hubert Yamvu (Programme National de Santé au Travail), Fouppouapegnigni Moihamette (Univ. de Yaoundé I), Amadou Bossiomo Mfela (Soldats pour la Nature), Hugues Irene Nganiza (Univ. panafricaine), Zacharie Mounkene Bouyahre (Univ. de Ngaoundere), Junior Baudoin Wouokoue Taffo (Univ. de Maroua), Djosebe Azaria (IRAD), Fritz Betchem (IRIC), Alysson Bery (IBAY-SUP), Robert Vanelas Obiang Zogo (Univ. Omar Bongo), Daniel Brice Knko Nkontcheu (Univ. de Buea), Eric Fokam (Univ. de Buea), Marcel Caritat Vaz (Univ. Wilkes), Armand Okende (ULB), Greg Jongsma (Musée du Nouveau-Brunswick), Joost van Haren (Univ. d'Arizona), Rui Cheng (Univ. du Minnesota), Peter Ssimbwa (Université royale de Muteesa 1)

**Groupe de travail sur les systèmes socio-écologiques :** Shivani Agarwal (Columbia), Caroline Arantes (West Virginia Univ), Adia Bey (GSFC), Ana Buchadas (Humboldt), Glenn Bush (Woodwell), Sophia Carodenuto (Univ. of Victoria), Min Chen (Univ. of Wisc - Madison), Oliver Coomes (McGill), Rogelio Corona (UNAM), Deborah Delgado Pugley (PUCP), Fanny Djomkam (IITA), Alejandra Echeverri (UC-Berkeley), Marius Ekue (Alliance Bioversity & CIAT), Jessica Fayme (Univ. of Michigan), Gillian Galford (Univ. of Vermont), Angélica María Gómez (UNC - Chapel Hill), Burak Güneralp (Texas A&M), Chima Iheaturu (Univ. de Berne), Marciel Judith Móstinga Rodriguez (UNALM-Pérou), Matthais Kunz (GFZ-Potsdam), Mody Lacour (UC-Irvine), Victor Maqqe (OU), Mia Mitchell (LANL), Paulo Murillo (Univ. del Tolima), Florence Palla (OFAC), Johanne Pelletier (CGIAR), Marie Pratzer (Humboldt), Catherine Potvin (McGill), Dina Rasquinha (Univ. de Géorgie), Casey Ryan (Univ. d'Edimbourg), Asmadi Saad (Univ. de Jambi), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Michaela Shope (MSU), Denis Sonwa (WRI), Jocelyne Sze (UAB)

**Groupe de travail sur la modélisation et la synthèse des données :** Shivani Agarwal (Université de Columbia), Rachel Albrecht (Université de São Paulo, USP), Luciana Alves (UCLA), Andrés Baresch (Université du Maryland), Ana Bastos (Université de Leipzig), Carly Batist (Raiforest Connection), Anthony Bloom (JPL), Damien Bonal (INRAE, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva), Santiago Botia (Institut Max Planck de Biogéochimie), Na Chen (MIT), Bradley Christoffersen (Université du Texas Rio Grande Valley), Michael Coe (Woodwell Climate Research Center, WCRC), Matteo Dettò (Université de Princeton), Hannes De Deurwaeder (Université de Princeton), Michael Dietze (Université de Boston), Francina Dominguez (Université de l'Illinois Urbana-Champaign, UIUC), Christopher Doughty (Northern Arizona University), Kim Ely (LBNL), Jianing Fang (Columbia University), Rosie Fisher (Centre for International Climate and Environmental Research Oslo, CICERO), Saulo Freitas (Institut national brésilien de recherche spatiale [INPE]), Pierre Gentine (Columbia University), Viola Heinrich (Helmholtz Centre Potsdam), Marina Hirota

(Université fédérale de Santa Catarina), Forrest Hoffman (ORNL), Jennifer Holm (LBNL), Ruofei Jia (MIT), Trevor Keenan (Université de Californie, Berkeley), Nancy Kiang (NASA GISS), Charles Koven (LBNL), Jennifer Kowalczyk (LBNL), Jeremy Lichstein (Université de Floride), Yanlan Liu (Ohio State University), Nima Madani (JPL), Landing Mané (Central Africa Forest Satellite Observatory), Isabelle Maréchaux (INRAE, AMAP), Bassil El Masri (Murray State University), Guilherme Gerhardt Mazzochini (Université fédérale de Rio de Janeiro, UFRJ), David Medvigy (University of Notre Dame), Leila Mirzagholi (MIT), Gislain Il Mofack (Université de Yaoundé I), Paul Moorcroft (Harvard University), Neil-Yohan Musadji (Masuku University of Science and Technology), Jessica Needham (LBNL), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (Université de Bamenda), Rogelio Omar Corona Núñez (Université nationale autonome du Mexique, UNAM), Rolf Mabicka Obame (Université des sciences et technologies de Masuku), Grace Jopaul Loubota Panzou (Université Denis Sassou Nguesso), Gilberto Pastorello (LBNL), Mateus Dantas de Paula (Senckenberg - Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research), Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Université fédérale du Ceará), Thomas Pugh (Université de Lund), Celso von Radow (INPE), Natalia Restrepo-Coupe (Université de l'Arizona, Cupoazu LLC), Evandro Marcos Sáidel Ribeiro (USP), Bianca Fazio Rius (Université de Campinas, Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement), Leila Hernandez Rodriguez (LBNL), Iris Roitman (Université de Brasilia), Sergio Rojas (Institut Humboldt), Thais Rosan (Université d'Exeter), Lina María Sánchez-Clavijo (Institut Humboldt), André Santos (LBNL), Rosa Maria Nascimento dos Santos (Université de l'État d'Amazonas ; in memoriam), Shawn Serbin (NASA/GSFC), Alexander Shenkin (Northern Arizona University), Alexey Shiklomanov (NASA/GSFC), Jacquelyn Shuman (NASA Ames Research Center), Anna Spiers (LBNL), Ying Sun (Cornell University), Abigail Swann (Université de Washington), Anna Trugman (Université de Californie, Santa Barbara), María Uriarte (Université de Columbia), María del Rosario Uribe-Diosa (Climate Focus), Rodrigo Vargas (Université du Delaware/Arizona State University), Hans Verbeeck (Université de Gand), Marco Visser (Université de Leiden), Weile Wang (NASA Ames Research Center), Rachel Ward (Université de Californie, Berkeley), Mathew Williams (Université d'Edimbourg), Chonggang Xu (Laboratoire national de Los Alamos, LANL), Xiangtao Xu (Université Cornell), Julia Yang (Université de Californie, Berkeley), Jevan Yu (MIT), Maurício Rumenos Guidetti Zagatto (USP), Wenli Zhao (Université de Columbia)

**Groupe de travail sur l'engagement communautaire et les applications de la recherche :**

Yoseline Angel (GSFC), Shivani Argawal (Columbia University), Kemen Austin (WCS), Carly Batist (Raiforest Connection), Ruksan Bose (IITA), Glenn Bush (Woodwell), Rogelio O. Corona-Núñez (Université nationale autonome du Mexique, UNAM), Fanny Djomkam (IITA), Marius Ekué (Bioversity), Matt Hansen (UMD), Simon Hoyte (UCL), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Chima Iheaturu (Univ. de Berne), Yovita Ivanova (Alliance Bioversity & CIAT), Gerbrand Koren (Université d'Utrecht), Matthias Kunz (Helmholtz Centre Potsdam), Patrick Meyfroidt (Université catholique de Louvain), Catherine Nakalembe (UMD), Tatiana Nana (UMD), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (Université de Bamenda), Kevin Njabo (Texas A&M), Carl Norlen (US) (Université d'Utrecht).M), Carl Norlen (USGS), Florence Palla (OFAC), Catherine Potvin (McGill), Danielle Rappaport (UMD), Nick Russo (Harvard), Denis Sonwa (WRI), Hannah Stouter (UCLA), Lucie Félicité Temgoua (University of Dschang), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaoundé I), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera)

# Table des matières

1	Introduction et motivation .....	1
1.1	Vue d'ensemble des thèmes, questions et objectifs scientifiques .....	11
1.2	Le besoin urgent de PANGEA .....	14
1.3	Rôle des observations par télédétection .....	15
1.4	Nécessité d'une collecte de données coordonnée et d'un travail d'équipe .....	16
1.5	Campagne de terrain et domaine d'étude PANGEA sur l'écologie terrestre .....	18
1.6	La science de la terre à l'œuvre .....	23
2	PANGEA Thèmes scientifiques .....	23
2.1	Cycles biogéochimiques .....	24
2.2	Biodiversité .....	28
2.3	Interactions et rétroactions climatiques .....	33
2.4	Systèmes socio-écologiques .....	36
2.5	Dynamique des perturbations .....	40
3	Lacunes et questions en matière de connaissances .....	43
3.1	Modèle .....	44
3.1.1	Modèle : Stocks et flux de carbone .....	44
3.1.2	Modèle : Biodiversité et composition fonctionnelle .....	46
3.1.3	Modèle : Interactions terre-atmosphère et seuils .....	48
3.2	Processus .....	49
3.2.1	Processus : Interactions et résilience des espèces .....	49
3.2.2	Processus : Réactions entre les perturbations et les fonctions de l'écosystème .....	51
3.2.3	Processus : Dynamique et gestion de la récupération .....	53
3.2.4	Processus : Rétroactions du cycle hydrologique .....	54
3.3	Projections .....	56
3.3.1	Projections : Cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments .....	56
3.3.2	Projections : Résilience hétérogène des forêts .....	57
4	Progrès scientifiques et techniques de PANGEA .....	59
5	Rôle essentiel de la télédétection de la NASA .....	61
6	Stratégie de recherche et conception de l'étude .....	62
6.1	Approche globale de l'étude .....	63
6.1.1	Stratégie de mise à l'échelle de la science de PANGEA .....	63
6.1.2	Calendrier théorique du projet .....	66
6.2	Composants scientifiques essentiels .....	67
6.2.1	Stratégie de référence, de seuil et de réduction des risques .....	68
6.2.2	Paysages candidats .....	73

6.2.3	Observations de télédétection par satellite .....	74
6.2.4	Observations par télédétection aéroportée .....	76
6.2.5	Observations et études sur le terrain .....	78
<b>6.3</b>	<b>Modélisation, synthèse des données et analyses intégratives.....</b>	<b>82</b>
6.3.1	Approche de la modélisation et de l'intégration des données .....	82
6.3.2	Coordination avec d'autres communautés de modélisation et d'intégration de données .....	88
6.3.3	Activités de modélisation et d'intégration des données .....	90
<b>7</b>	<b>Renforcement des capacités, formation et éducation .....</b>	<b>91</b>
7.1	Développement de la main-d'œuvre.....	91
7.2	Former une cohorte d'étudiants diplômés.....	92
<b>8</b>	<b>Stratégie d'engagement communautaire .....</b>	<b>94</b>
8.1	Co-développement et partenaires de PANGEA .....	96
8.2	Stratégie d'engagement.....	97
<b>9</b>	<b>Permettre à la science de la Terre de passer à l'action.....</b>	<b>99</b>
9.1	Applications des résultats de la recherche PANGEA .....	100
9.1.1	Stabilité de la séquestration du carbone et flux de méthane.....	100
9.1.2	Conservation de la biodiversité.....	102
9.1.3	Agriculture et moyens de subsistance durables.....	104
9.2	Processus de mise en œuvre des sciences de la Terre .....	106
9.2.1	Engagement des utilisateurs.....	106
9.2.2	Soutenir l'application de la recherche PANGEA .....	107
<b>10</b>	<b>Faisabilité technique et logistique.....</b>	<b>110</b>
10.1	Organisation et gestion .....	111
10.1.1	Gestion des programmes.....	111
10.1.2	Bureau des projets.....	112
10.1.3	Définition de la science.....	112
10.1.4	Mise en œuvre du projet .....	113
10.1.5	Équipe scientifique et direction scientifique .....	113
10.1.6	Compétences disciplinaires requises.....	115
10.2	Possibilités de cofinancement .....	116
10.3	Science ouverte - Gestion et partage des données.....	117
10.4	Calendrier.....	121
10.5	Évaluation des risques.....	122
<b>11</b>	<b>Crédits de figure .....</b>	<b>124</b>
<b>12</b>	<b>Glossaire .....</b>	<b>125</b>
<b>13</b>	<b>Acronymes et abréviations .....</b>	<b>128</b>

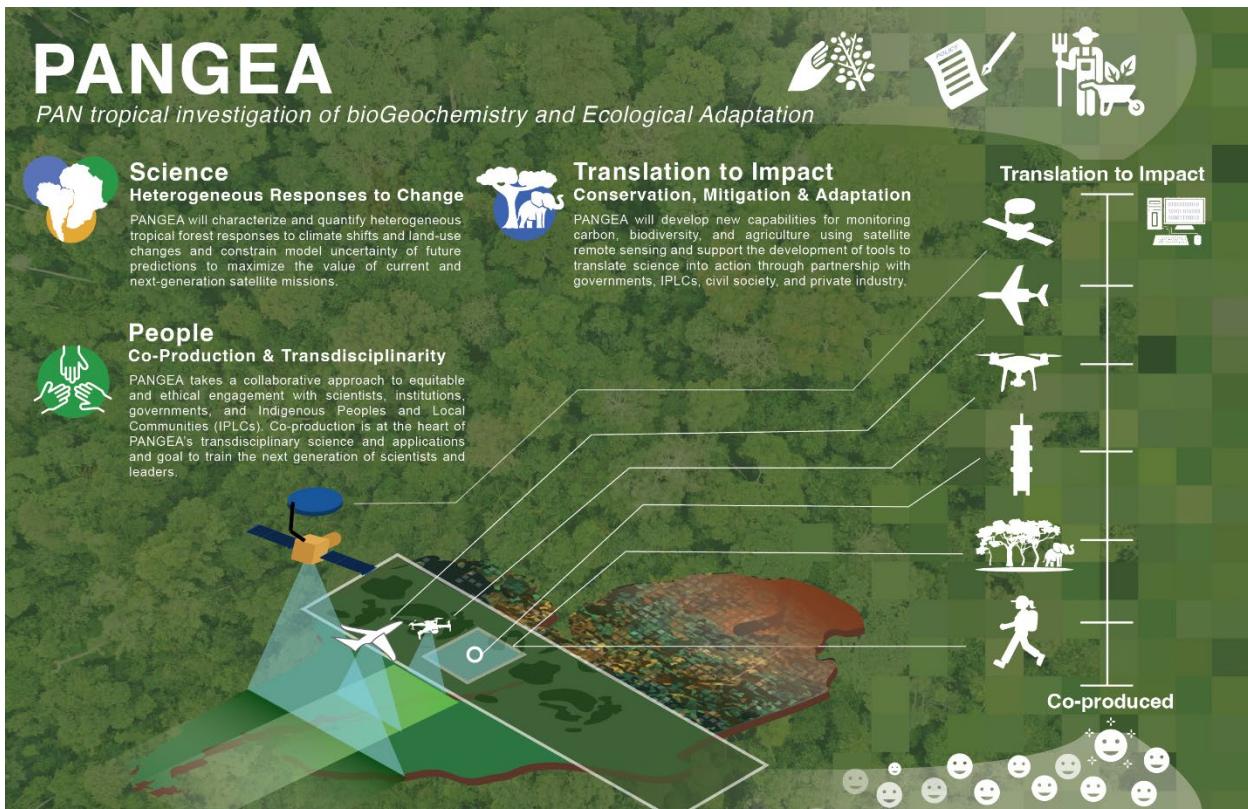
14 Annexes .....	138
A. Lettres de soutien .....	138
B. Partenaires et activités d'engagement de PANGEA.....	138
C. Engagement au cours de l'étude exploratoire .....	138
D. Activités de recherche et de surveillance prévues et en cours .....	138
E. Tableau détaillé des mesures PANGEA .....	138
F. Réponses au retour d'information .....	138
G. Sujets hors du champ d'application de PANGEA.....	138

# 1 Introduction et motivation

**PANGEA est un projet de collaboration et de transformation à l'échelle mondiale qui permettra de déterminer si les forêts tropicales des différents continents réagissent différemment aux changements climatiques et d'utilisation des sols.**

**PANGEA est nécessaire de toute urgence pour**

1. Maximiser la valeur des missions satellitaires actuelles et de la prochaine génération en comblant les lacunes dans les données et en intégrant des connaissances écologiques mécanistes.
2. Combler les lacunes critiques en matière de connaissances pour soutenir les objectifs mondiaux en matière de climat et de biodiversité en se fondant sur la compréhension des processus qui contrôlent l'hétérogénéité de la vulnérabilité des forêts tropicales.
3. Développer de nouvelles capacités d'observation, de prévision et de suivi des réactions des forêts tropicales, tout en favorisant la formation de la prochaine génération de scientifiques et de leaders mondiaux.



Les forêts tropicales ont des impacts considérables, englobant des quantités importantes de carbone, de nutriments et d'eau à l'échelle mondiale, des flux de carbone et d'énergie, ainsi que la plus grande proportion de la biodiversité de la Terre. Plus de 75 % des plantes à fleurs, des amphibiens, des mammifères terrestres, des poissons d'eau douce et de mer, et 91 % des oiseaux terrestres ont des aires de répartition qui recoupent les latitudes tropicales (Barlow et al., 2018). Les forêts tropicales stockent de grandes quantités de carbone dans les sols et la biomasse, les forêts tropicales humides représentant environ 40 % de la biomasse végétale mondiale (Xu et al., 2021a). En tant que plus grand puits de carbone parmi toutes les forêts du monde (Pan et al., 2024), elles jouent un rôle essentiel dans l'atténuation de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique (CO<sub>2</sub>).

agissant comme des tampons essentiels contre le changement climatique. Les forêts tropicales atténuent également la hausse des températures mondiales grâce au refroidissement par évaporation (Bonan, 2008 ; Artaxo et al., 2022). En outre, les forêts tropicales interagissent avec l'atmosphère par le biais de rétroactions complexes qui régulent les conditions météorologiques locales et le climat régional et mondial. En fin de compte, les forêts tropicales influencent l'ensemble du système terrestre. Par exemple, la déforestation de l'Amazonie menace les régimes pluviométriques aux États-Unis, réduisant potentiellement les précipitations dans le Midwest et le Nord-Ouest (Lawrence & Vandecar, 2015) et entraînant une diminution de 50 % du manteau neigeux de la Sierra Nevada en Californie, qui répond aux besoins en eau de l'agriculture et des villes (Medvigy et al., 2013). Ces changements pourraient modifier la disponibilité de l'eau, réduire les rendements agricoles et déstabiliser les écosystèmes, ce qui poserait des risques pour la sécurité alimentaire et la stabilité sociétale. En outre, de nombreux produits de base d'importance mondiale tels que le café, l'huile de palme, le cacao et le bois proviennent des tropiques, soutenant les marchés mondiaux et les chaînes d'approvisionnement tout en contribuant aux besoins de base des ménages américains.

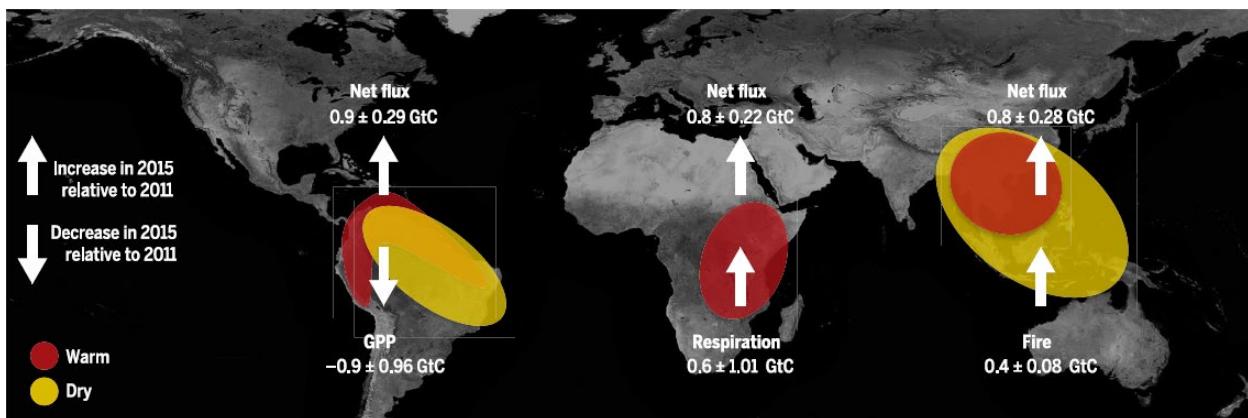
**Les forêts tropicales subissent des changements rapides.** Les régions forestières équatoriales connaîtront bientôt les températures les plus élevées connues depuis l'Éocène, ce qui, combiné au changement d'affectation des terres, entraînera une augmentation de la sécheresse atmosphérique et du stress hydrique (Barkhordarian et al., 2019 ; Ukkola et al., 2020). Les taux de mortalité des arbres augmentent sous les tropiques en raison de l'accroissement de la durée et de la gravité des sécheresses, ainsi que de l'intensité des tempêtes (Allen et al., 2010, Choat et al., 2012, McDowell et al., 2018, Urquiza-Munoz et al 2024). La hausse des températures s'approche des limites thermiques hypothétiques de la fonction foliaire, bien que ces limites restent très discutées (Smith et al., 2020, Doughty et al., 2023 ; Winter et Roelfsema, 2024). Au cours des dernières décennies, l'évolution rapide des systèmes socio-écologiques a entraîné des taux sans précédent de changements anthropiques dans l'utilisation des terres (DeFries et al., 2004 ; Hosonuma et al., 2012 ; Hansen et al., 2020 ; Pendrill et al., 2022), qui ont directement alimenté les changements climatiques dans les tropiques (Smith et al., 2023). En conséquence, le sud-est de l'Amazonie devient une source nette de carbone dans l'atmosphère (Gatti et al., 2021).

**La déforestation et la dégradation des forêts tropicales ont représenté 22 % des émissions anthropiques annuelles de CO<sub>2</sub> entre 1990 et 2020** (Pan et al., 2024), bien que ces émissions soient partiellement compensées par la régénération des forêts tropicales secondaires (Aragão et al., 2014 ; Rosan et al., 2024). Des conditions chaudes et sèches prolongées augmentent la vulnérabilité des forêts aux incendies et les forêts déjà brûlées deviennent à leur tour plus chaudes et plus sèches, entraînant une rétroaction positive qui a été appelée "tempête de feu" (Brando et al., 2020a). La déforestation, la dégradation des forêts, l'exploitation directe (par exemple, la chasse, la récolte) et le changement climatique ont radicalement modifié la dynamique des perturbations dans les forêts tropicales et menacent désormais d'extinction de nombreuses espèces tropicales (Feeley et al., 2012 ; Barlow et al., 2016 ; Benítez-López et al., 2017 ; Alroy 2017 ; Dirzo et al., 2014). Cette perte de biodiversité pourrait à son tour compromettre la résilience de la structure et des fonctions des forêts tropicales, des cycles biogéochimiques et des systèmes socio-écologiques (Bunker et al., 2005 ; Peres et al., 2016). Même en tenant compte de la plus grande diversité des espèces, les régions tropicales connaissent le taux de défaunation le plus élevé au monde (Dirzo et al., 2014).

**Les études réalisées au cours des dix dernières années ont révélé que les tendances et la variabilité interannuelle de l'échange net de carbone entre les biomes des forêts tropicales varient**

considérablement d'un continent à l'autre (Brienen et al., 2015 ; Liu et al., 2017 ; Hubau et al., 2020). De 1985 à 2015, le puits de carbone des forêts tropicales de plaine africaines intactes, mesuré sur des placettes d'inventaire forestier, est resté constant, tandis que le puits de carbone des forêts tropicales de plaine amazoniennes a diminué d'un tiers entre 2005 et 2015 par rapport aux années 1990 (Hubau et al., 2020 ; Brienen et al., 2015). Dans les conditions El Niño de 2015-2016, l'Amérique tropicale, l'Afrique et l'Asie sont temporairement devenues des sources nettes d'émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (Liu et al., 2017). Toutefois, ces pertes nettes de carbone semblent être sous-tendues par des mécanismes distincts qui indiquent des différences dans la stabilité du puits de carbone sur les différents continents, dont l'atténuation nécessitera une compréhension et une gestion spécifiques à chaque région. Les sources des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, telles qu'observées par l'Observatoire orbital du carbone-2 (OCO-2), le Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT) et Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPPIT), suggèrent que dans les Amériques tropicales, la baisse des taux de photosynthèse a entraîné une réduction de l'absorption de carbone qui a transformé le bilan du CO<sub>2</sub> en émissions nettes (**figure 1**). En Afrique, la hausse des températures a entraîné une augmentation de la respiration, qui l'a emporté sur les avantages des forêts tropicales d'Afrique centrale en matière de séquestration (Liu et al., 2017). En Asie, une surface terrestre plus chaude et plus sèche a entraîné une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux incendies (Liu et al., 2017).

**De nombreuses forêts tropicales comportent des plaines inondables et sont entrecoupées d'écosystèmes humides et aquatiques, qui jouent un rôle essentiel dans les bilans mondiaux de méthane (CH<sub>4</sub>) ainsi que dans le cycle du CO<sub>2</sub> (Sjögersten et al., 2014 ; Peng et al., 2022).** Les zones humides tropicales et les systèmes d'eau douce intérieurs contribuent à la grande majorité des émissions naturelles mondiales de CH<sub>4</sub> et représentent environ 20 % du budget mondial total de CH<sub>4</sub> d'environ 575 Tg CH<sub>4</sub> par an<sup>-1</sup> (Saunois et al., 2020 ; Peng et al., 2022). Les sources tropicales de CH<sub>4</sub> sont également la composante la plus incertaine du budget mondial du carbone (Saunois et al., 2020, 2024). L'expansion de la déforestation et de la dégradation des forêts, combinée aux changements climatiques, a un impact significatif sur les flux d'eau de surface, le débit des rivières et la qualité de l'eau. Ceux-ci affectent à leur tour les cycles biogéochimiques, l'adéquation de l'habitat pour les



**Figure 1.** L'analyse des données satellitaires OCO-2, GOSAT et MOPPIT sur les continents tropicaux a révélé que chacun d'entre eux est devenu une source nette d'émissions de carbone dans l'atmosphère en réponse à l'épisode El Niño de 2015. Il est essentiel que chaque continent présente des trajectoires régionales distinctes qu'il convient de mieux comprendre. Adapté de (Liu et al., 2017).

communautés de plantes, d'animaux, d'algues et de micro-organismes d'eau douce, les ressources en eau pour les humains et la production d'énergie hydroélectrique (Castello et Macedo, 2016 ; Guimberteau et al., 2017 ; Taniwaki et al., 2017 ; Arias et al., 2020).

Les données issues des missions satellitaires et des campagnes aéroportées de la NASA, validées par des mesures au sol, jouent un rôle essentiel dans la compréhension de la manière dont les écosystèmes forestiers et la biodiversité réagissent aux changements environnementaux (Cavender-Bares et al., 2022). **Cependant, avant que les données satellitaires puissent être utiles pour l'analyse scientifique ou l'utilisation opérationnelle, les mesures au sol sont essentielles pour calibrer et valider les observations satellitaires. La rareté des mesures au sol et des récupérations aériennes dans les régions tropicales a conduit à des défis importants dans l'amélioration des produits satellitaires et dans l'interprétation des résultats scientifiques tirés de ces produits.** Par exemple, les cycles du carbone et de l'eau dans les tropiques dépendent fortement de la dynamique de l'humidité du sol ; cependant, de récentes observations au sol ont révélé que les données récupérées par le satellite SMAP (Soil Moisture Active Passive) présentent de forts biais dans les écosystèmes tropicaux (Cho et al., 2024). Il est important de noter que ces mêmes données au sol ont permis d'améliorer les extractions d'humidité du sol de SMAP dans les forêts tropicales (Wang et al., 2024). Un autre exemple de la rareté des mesures dans les tropiques est le manque de données de validation au sol pour les récupérations spatiales de CO<sub>2</sub> au-dessus des tropiques, en particulier de l'Afrique tropicale, ce qui a conduit à un débat permanent sur l'ampleur des échanges nets de la biosphère au-dessus de l'Afrique tropicale (Palmer et al., 2019 ; Gaubert et al., 2023). De même, malgré le besoin urgent d'évaluer la biodiversité mondiale à l'échelle afin d'évaluer l'efficacité des efforts de conservation de la biodiversité, les capacités de surveillance de la biodiversité par télédétection satellitaire n'en sont qu'à leurs balbutiements.

La réduction des biais dans l'extraction de l'humidité du sol et de la colonne atmosphérique de CO<sub>2</sub> et le développement de nouvelles capacités de mesure directement liées à la biodiversité (par exemple, la diversité bêta des arbres de la canopée) et aux indicateurs (par exemple, les réseaux de diversité) sont essentiels pour faire progresser la compréhension du cycle de l'eau, des flux de carbone, de la biodiversité et de la dynamique de l'écosystème. La validation des observations satellitaires et aériennes par des mesures au sol est essentielle au succès des missions d'observation de la Terre de la NASA, en particulier avec l'arrivée d'une flotte passionnante de capteurs nouveaux et à venir qui ont le potentiel de capturer la multidimensionnalité des systèmes observés (par exemple, via les missions SAR [NISAR] et Surface Biology and Geology [SBG] de la NASA et de l'Organisation indienne de recherche spatiale). Le développement de produits satellitaires plus précis, en particulier dans les régions tropicales peu étudiées, soutient directement la mission de la NASA qui consiste à améliorer la surveillance de l'environnement mondial et à faire progresser les modèles prédictifs.

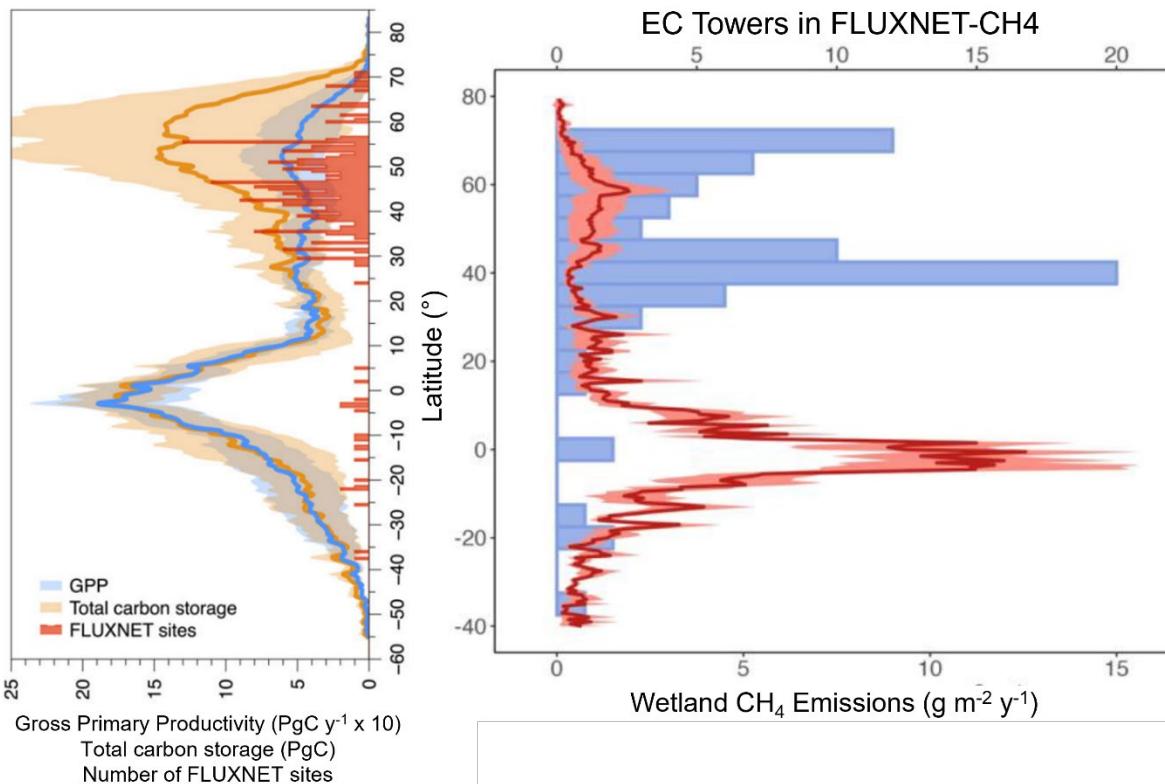
**Les forêts tropicales sont les moins étudiées de tous les grands biomes terrestres de la planète.**

**Les méthodes de validation des observations satellitaires et aériennes utilisées dans le cadre de PANGEA comprennent des parcelles d'inventaire forestier, des sites de tour à flux turbulent, d'autres mesures au sol et des connaissances écologiques autochtones, traditionnelles et locales (IEK, TEK, LEK) qui fournissent des informations précieuses sur la biodiversité, la dynamique forestière et les fonctions des écosystèmes** (par exemple, ForestPlots.net et al., 2021 ; Anderson-Teixeira et al., 2014,

Davies et al., 2021, Delwiche et al., 2024). Toutefois, en raison de problèmes d'accessibilité et de financement, la couverture actuelle de ces mesures sous les tropiques, en particulier en Afrique, est faible et suit rarement un modèle d'échantillonnage aléatoire ou systématique requis pour la puissance statistique et la réduction des biais (Goetz et al., 2015 ; Bustamante et al., 2016). Par conséquent, l'extrapolation à partir d'un nombre limité de placettes peut entraîner des incertitudes et des biais importants (Saatchi et al., 2015 ; Tejada et al., 2019). La répartition latitudinale des placettes d'inventaire forestier et des tours de flux à covariance d'eddy démontre la sous-représentation des forêts tropicales dans les efforts de recherche mondiaux, révélant que les régions forestières tropicales comptent le moins de tours et de placettes, bien qu'elles aient la productivité primaire brute et les émissions de méthane d'origine naturelle les plus élevées (Baldocchi, 2020, Schimel et al., 2015) (**figure 2**). Il n'existe qu'une seule tour de flux dans toute l'Afrique centrale (Sibret et al., 2022). En outre, les lacunes flagrantes en matière de données, de méthodes et de connaissances dans les tropiques limitent actuellement les efforts visant à élaborer des cartes mondiales de la diversité à l'aide de données hyperspectrales (par exemple, des cartes de traits fonctionnels) (Dechant et al., 2024). L'élargissement des observations des traits structurels et fonctionnels et des mesures de la fonction écosystémique dans les régions forestières tropicales fournira des données d'étalonnage et permettra d'améliorer considérablement la caractérisation des modèles et des processus qui régissent la dynamique des forêts tropicales très diversifiées. Outre les modèles statistiques et les modèles basés sur les processus, les techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique se sont considérablement développées au cours de la dernière décennie et peuvent désormais être utilisées pour mettre rigoureusement à l'échelle les mesures au sol par rapport aux observations aéroportées et satellitaires à l'échelle régionale et mondiale (Aguirre-Gutiérrez et al., 2021 ; Dalagnol et al., 2022 ; Lines et al., 2022).

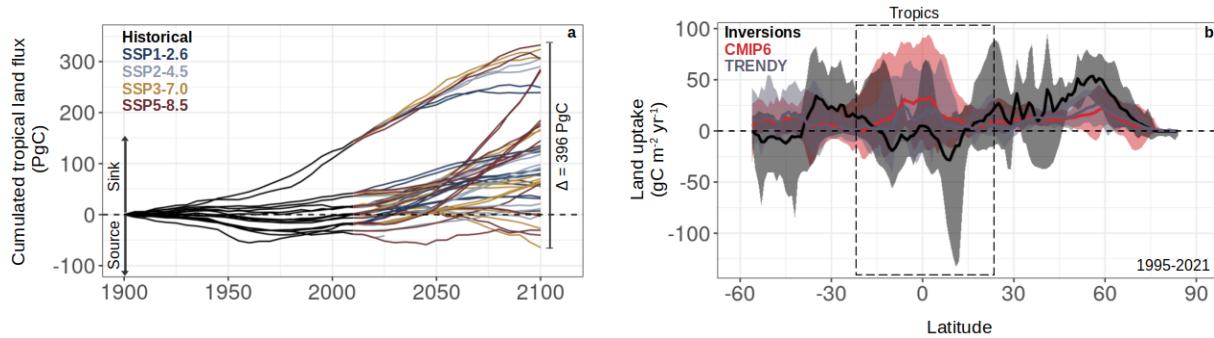
**Le manque de données sur l'impact de la diversité structurelle et fonctionnelle des forêts tropicales sur les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie limite notre capacité à comprendre le rôle des forêts tropicales dans le système terrestre.  
dans le système terrestre.**

**Les prévisions du modèle du système terrestre (MSE) concernant les flux de carbone sont trois fois plus incertaines sous les tropiques qu'à d'autres latitudes** (Cavalieri et al., 2015 ; **figure 3**). Des produits robustes basés sur la télédétection décrivant les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie des forêts tropicales, ainsi qu'une meilleure caractérisation des processus, sont essentiels pour comprendre les interactions et les rétroactions entre les forêts tropicales et le climat et pour contraindre les prévisions des modèles du système terrestre. Les prévisions des modèles ESM participant au Projet de comparaison des modèles couplés (CMIP) divergent nettement en termes d'ampleur et de conclusions quant à la question de savoir si les terres sont un puits ou une source de carbone (Arora et al., 2020 ; Friedlingstein et al., 2006 ; Friedlingstein et al., 2014 ; Negron-Juarez et al., 2015). Si le développement de modèles entre la phase 5 du CMIP (CMIP5) et la phase 6 du CMIP (CMIP6) a permis de franchir une étape importante dans la limitation de l'incertitude des flux de carbone tropicaux, ces réductions étaient principalement liées à l'inclusion des limitations en nutriments dans les modèles (Friedlingstein et al., 2023). Traditionnellement, les ESM ignorent la majeure partie de la biodiversité et représentent la végétation tropicale de manière simple et agrégée, ce qui ne permet pas de saisir les réactions des forêts tropicales aux variations climatiques et aux perturbations et contribue à l'échec des modèles (Levine et al., 2016 ; Yang et al., 2023 ; Sakchewski et al., 2016 ; Schmitt et al., 2020).



**Figure 2.** La fonction forestière fait référence aux rôles écologiques des forêts, tels que la régulation du climat, le soutien de la biodiversité, le cycle des nutriments et la fourniture d'habitats, qui contribuent à la santé et à la stabilité globales des écosystèmes. Les fonctions forestières comprennent la productivité primaire brute (PPB), la productivité ligneuse, la respiration de l'écosystème et l'évapotranspiration. Le panneau (a) est adapté de Schimel et al. (2015). Le panneau (b) a été réalisé par Alison Hoyt, Clarice Perryman et Fa Li.

**Pour limiter cette incertitude, il faut améliorer la représentation des processus écologiques de divers écosystèmes** (Bonan et al., 2024). Les nouvelles générations de modèles de biosphère terrestre et de modèles de démographie végétale, tels que Ecosystem Demography Model version 2 (ED2), Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) et BiomeE, incluent des canopées forestières plus diversifiées sur le plan structurel et fonctionnel (Fisher et al., 2018 ; Longo et al., 2019 ; Koven et al., 2020 ; Weng et al., 2022). Bien que les modèles de démographie végétale représentent plus directement les processus de dynamique forestière, la complexité supplémentaire crée deux défis pour les simulations régionales et mondiales. Premièrement, les conditions initiales nécessitent des données détaillées sur la structure et la composition des forêts, qui ne peuvent actuellement être obtenues que pour de petites zones d'intérêt à partir de parcelles forestières (Marvin et al., 2014). Deuxièmement, les systèmes d'étalonnage des modèles existants, tels que l'International Land Model Benchmarking (ILAMB ; Collier et al., 2018), sont insuffisants, car la nouvelle génération de modèles peut prédire des propriétés agrégées raisonnables (par exemple, la biomasse aérienne totale) en compensant les erreurs de représentation des processus (par exemple, une productivité et une mortalité trop élevées). Les progrès récents de la télédétection lidar, radar et hyperspectrale offrent une occasion unique de collecter des données sur la structure, la composition et la biodiversité des écosystèmes tropicaux à l'échelle du paysage et d'améliorer ainsi le paramétrage, l'initialisation,

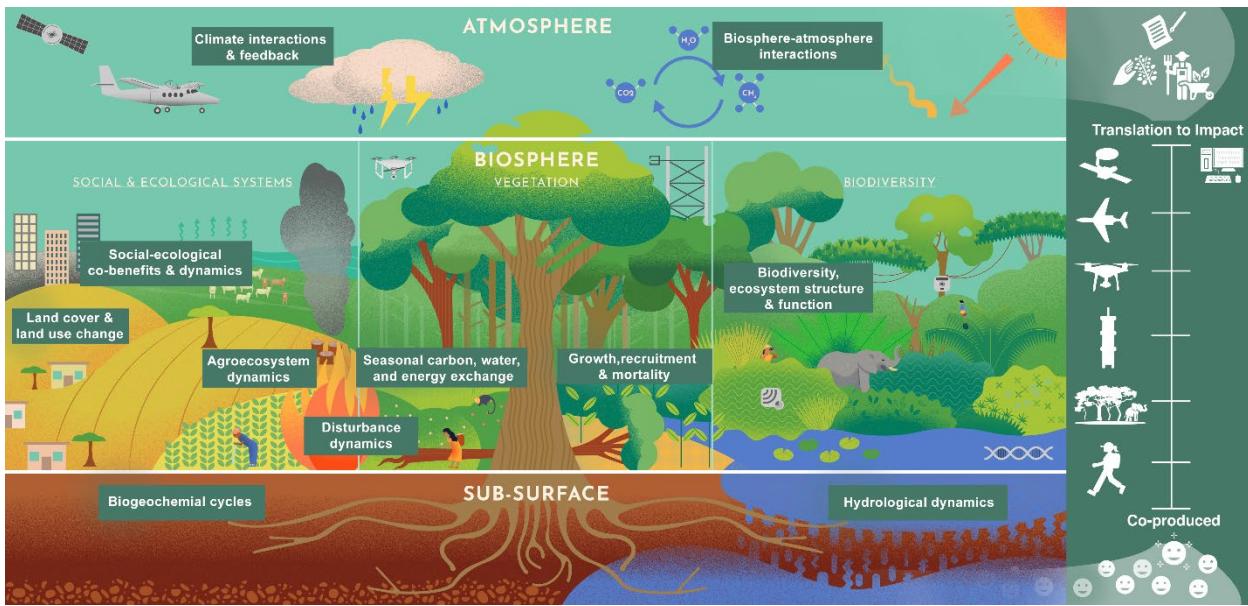


**Figure 3.** Flux de carbone terrestre cumulé historique et futur des tropiques selon les modèles CMIP6 avec végétation dynamique et scénarios d'émissions multiples (a). Moyenne zonale de l'absorption de carbone terrestre selon les modèles d'inversion (noir), les modèles CMIP6 avec modèles de végétation dynamique et les modèles de surface terrestre TRENDY pour la période récente (b). L'étendue de la région tropicale et sa grande incertitude sont mises en évidence par le rectangle en pointillés. Le panneau (a) a été adapté de Friedlingstein et al., 2014 (mise à jour de CMIP5 à CMIP6). Le panneau (b) a été redessiné à partir de l'AR6 du GIEC avec des données récentes.

l'étalonnage et le développement des processus des modèles (Schimel et al., 2019 ; Schimel et Carroll, 2024).

Pour répondre à ces besoins et en réponse à un appel du programme d'écologie terrestre de la NASA, nous présentons ci-dessous la portée d'un projet d'écologie terrestre sur le terrain, l'étude PAN tropical de la bio-géochimie et de l'adaptation écologique (PANGEA), qui permettra de mieux comprendre les processus contrôlant les changements dans les biomes forestiers pantropicaux et leurs rétroactions intégrées avec le climat de la Terre (**figure 4**).

**PANGEA utilise une stratégie de la science à l'échelle, en adoptant une approche de systèmes intégrés qui englobe des mosaïques de paysages complexes allant des forêts aux zones humides et aux tourbières, et des systèmes socio-écologiques agricoles intacts aux systèmes perturbés.** La transdisciplinarité et la coproduction collaborative sont au cœur de PANGEA. PANGEA garantira une collaboration équitable et transdisciplinaire entre les chercheurs, les gouvernements, les institutions et les peuples autochtones et les communautés locales (IPLC) afin d'intégrer des expertises et des connaissances diverses. Cette approche permettra de mieux comprendre le rôle des forêts tropicales dans le système terrestre et de trouver des solutions locales au changement climatique et à la perte de biodiversité. La conception imbriquée de PANGEA, avec une approche scientifique à l'échelle décrite plus en détail à la section 6.1.1, fera progresser la surveillance par satellite, le développement de produits de télédétection, l'assimilation de données et l'évaluation comparative de divers processus dans les modèles d'écosystème de nouvelle génération, ce qui peut faire progresser de manière significative les capacités de prédiction à long terme. Afin de garantir la coordination des mesures et des analyses, PANGEA a été conçu en collaboration avec de nombreuses activités actuelles et à venir, notamment les campagnes et missions de l'Agence spatiale européenne (ESA), le Groupe sur l'observation de la Terre et les arbres (GEO-TREES) et l'initiative "One Forest Vision" (OFVi). Les données de télédétection suborbitales (par exemple, par drone et par avion) sont des éléments essentiels de PANGEA, qui sont nécessaires pour faire la transition entre les mesures au sol et les observations satellitaires à plus haute résolution. À cet égard, PANGEA s'appuie sur les projets aériens et de terrain très réussis de la NASA en Afrique et dans les Amériques, notamment SAFARI 2000,



**Figure 4. Mesures et mise à l'échelle de PANGEA.** PANGEA adopte une approche intégrée et transdisciplinaire de la science et des applications, et recueillera des données au sol, sur des tours, des drones et des avions dans des paysages de forêts tropicales à travers l'Afrique et les Amériques. Des analyses de modélisation et de télédétection par satellite intégreront ces informations afin de faire progresser la compréhension des forêts à l'échelle pantropicale.

AfriSAR-1 et -2, Biodiversity Survey of the Cape (BioSCape) et plusieurs missions Earth Venture Suborbital (EVS).

**Pertinence de l'action terrestre : La mise en œuvre de PANGEA permettra aux décideurs de bénéficier pleinement des missions satellitaires d'observation de la Terre actuelles et futures pour prendre des mesures efficaces et adaptées aux régions afin d'atténuer les impacts du changement climatique et de l'utilisation des terres et de conserver et de régénérer les biomes forestiers tropicaux d'importance mondiale.** Les objectifs de PANGEA (section 1.1) sont directement alignés sur les programmes Earth Action de la NASA, notamment Climat et résilience, Ressources en eau, Conservation écologique et Agriculture. Afin d'atténuer les effets du changement climatique et de l'utilisation des terres sur la fonction et la biodiversité des écosystèmes tropicaux, et de conserver ces biomes d'importance mondiale, des mesures doivent être prises. Cette action nécessite une meilleure compréhension des diverses manières dont les forêts tropicales des différents continents réagissent au changement, ainsi que des méthodes et des technologies de pointe pour déployer des solutions.

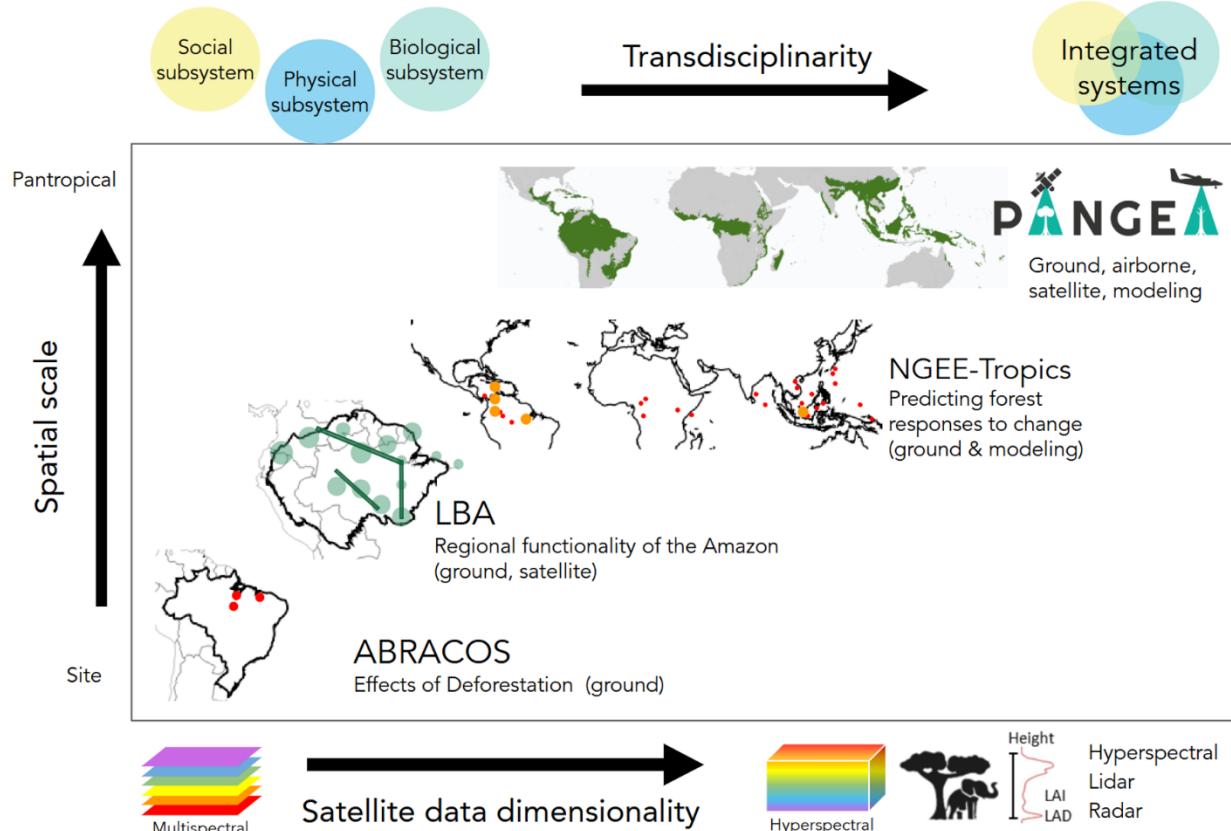
**PANGEA développera la science nécessaire pour adapter les mesures au sol aux capacités de surveillance par satellite et pour adapter les connaissances et les actions locales aux solutions mondiales.** PANGEA cartographiera et quantifiera la stabilité à long terme du piégeage du carbone et des flux de méthane afin d'améliorer les prévisions futures et de soutenir les efforts d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. PANGEA fera également progresser les méthodes de cartographie de la biodiversité et des processus écosystémiques afin d'améliorer la compréhension des forêts tropicales, de soutenir la conservation de la biodiversité et de couvrir les variations de la biodiversité au niveau des gènes, des espèces, des communautés et des écosystèmes. Ces efforts seront réalisés par le biais d'activités équitables, collaboratives et co-développées avec les communautés autochtones et locales qui

tisseront des connaissances écologiques autochtones, traditionnelles et locales (IEK, TEK et LEK) avec des données de télédétection et d'autres formes de données et de connaissances (voir les sections 6.2.4, 7.2 et 8 pour plus de détails). En outre, les avancées scientifiques et techniques de PANGEA, guidées par des partenaires actifs, soutiendront le développement régional des stratégies d'adaptation au changement climatique des agriculteurs, le développement des socio-bioéconomies, l'amélioration de la traçabilité des produits agricoles jusqu'à leur origine et la création d'alertes aux catastrophes pour guider une réponse rapide. Ces éléments recourent les questions scientifiques (section 3) et la *stratégie de mise en pratique des sciences de la terre* (section 9) de PANGEA.

PANGEA sera

- **Répondre à des** questions scientifiques urgentes et pertinentes au niveau mondial en mettant l'accent sur les comparaisons entre les principales formations forestières tropicales de notre planète par le biais d'analyses et d'interprétations efficaces des observations de télédétection (satellitaires et aériennes) combinées à des mesures au sol et à la modélisation de l'environnement et des écosystèmes.
- **Fournir des** informations qui contribueront à la conservation et à la régénération des forêts tropicales, ainsi qu'à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à celui-ci.
- **Assurer des** collaborations transdisciplinaires et l'établissement de nouvelles relations entre divers partenaires, notamment des scientifiques des États-Unis et des pays possédant des forêts tropicales, des agences spatiales internationales, des peuples autochtones et des communautés locales, des décideurs et des communautés d'action sous les tropiques.
- **Former et éduquer** la prochaine génération de scientifiques et l'ensemble de la main-d'œuvre aux États-Unis et dans les pays tropicaux où la recherche sur le terrain sera menée.
- **Créer un** héritage de données et de sciences ouvertes pour renforcer les partenariats entre les scientifiques et les institutions aux États-Unis, dans les pays tropicaux et dans d'autres pays, afin de servir de base aux recherches et aux applications futures.

**PANGEA ira au-delà de l'expérience LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) et au-delà de l'Amazonie, en utilisant de nouvelles technologies satellitaires et des observations non disponibles pendant l'expérience LBA, afin de faire progresser la science et les capacités de surveillance à l'échelle pantropicale (figure 5).**



**Figure 5. L'évolution de PANGEA.** PANGEA s'appuie sur des efforts antérieurs dont la portée géographique, l'accès aux données et/ou la transdisciplinarité étaient plus limités, en tirant parti de la richesse des données et des modèles, de l'avancée des calculs et de l'opportunité de coordonner les activités pantropicales.

Le PANGEA a été élaboré sur la base des contributions de plus de 800 personnes représentant plus de 300 organisations de 42 pays répartis sur les cinq continents, au cours de l'exercice de délimitation du champ d'application, par le biais d'activités de groupes de travail, de 5 ateliers, de 10 réunions publiques, de 18 conférences et symposiums, et de plus de 150 réunions bilatérales (**figure 6**). Des ateliers ont été organisés à Washington DC, au Cameroun, au Pérou, au Brésil et en Thaïlande, avec plus de 275 participants en personne et 298 participants virtuels. Les participants au processus de définition du champ d'application représentaient de nombreuses communautés, notamment la communauté universitaire sous les tropiques, ainsi qu'aux États-Unis et en Europe, les communautés autochtones et locales des tropiques, la communauté de la NASA et d'autres agences fédérales américaines, les agences spatiales internationales, les agences gouvernementales étrangères, les organisations de la société civile et l'industrie privée. Cet effort de cadrage a mis en évidence l'impérieuse nécessité de PANGEA et l'occasion opportune qu'il offre de coordonner de nombreuses activités en cours et à venir, telles qu'elles sont exposées dans ce livre blanc.

Dans le reste de la section 1, nous présentons une vue d'ensemble de PANGEA. Nous détaillons ensuite le concept PANGEA, y compris les thèmes scientifiques PANGEA (section 2), les lacunes dans les connaissances et les questions scientifiques (section 3), les avancées scientifiques et techniques découlant de PANGEA (section 4), le rôle essentiel de la télédétection de la NASA (section 5), la stratégie de recherche et la conception de l'étude PANGEA (section 6), les priorités de PANGEA en

matière de renforcement des capacités, de formation et d'éducation (section 7), la stratégie d'engagement communautaire (section 8), la capacité à mettre les sciences de la Terre en action (section 9) et la faisabilité technique et logistique (section 10).

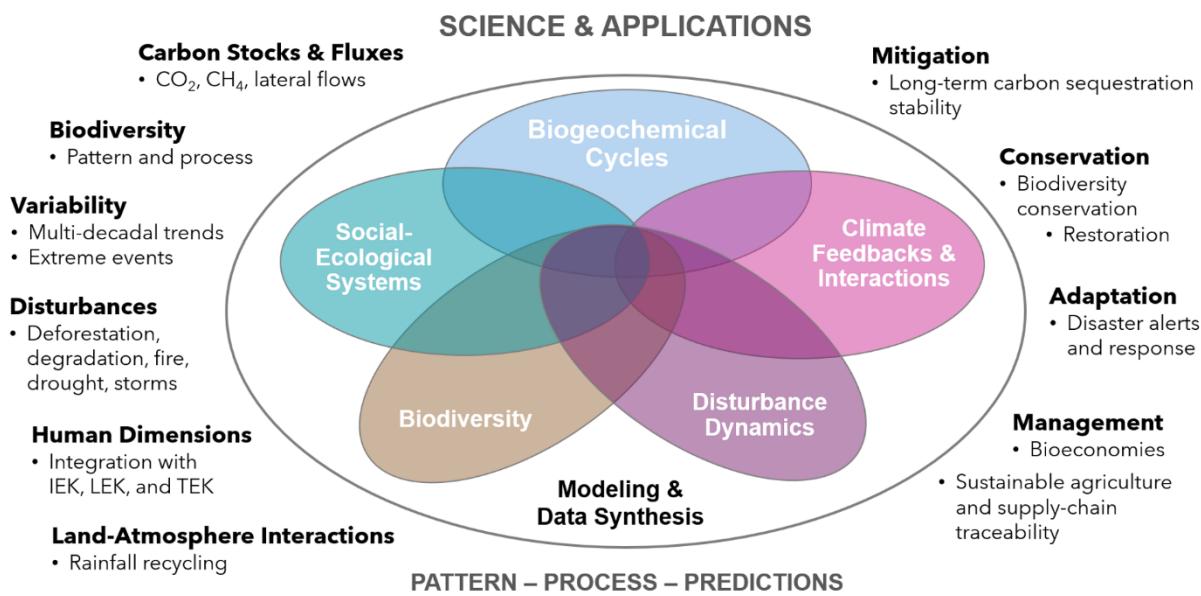
## 1.1 Vue d'ensemble des thèmes, questions et objectifs scientifiques

**La connaissance des cycles biogéochimiques des forêts tropicales, de la biodiversité, des rétroactions et interactions climatiques, des systèmes socio-écologiques et de la dynamique des perturbations est essentielle pour prévoir la réponse des forêts tropicales aux changements climatiques et d'utilisation des sols.** La compréhension de ces facteurs est également essentielle pour prévoir l'avenir du système terrestre et pour élaborer des stratégies de conservation des forêts et de la biodiversité et d'atténuation des changements. Les thèmes et les questions de recherche de PANGEA ont été élaborés dans le cadre d'un processus consultatif global auquel ont contribué des centaines de scientifiques des cinq continents (voir section 8.1). Les thèmes et questions qui en résultent mettent l'accent sur la résolution des incertitudes liées aux tendances multidécennales et aux réponses aux événements extrêmes dans cinq domaines thématiques (**figure 7**) :

- **Les cycles biogéochimiques** englobent le mouvement et la transformation d'éléments essentiels (par exemple, le carbone, l'azote et le phosphore) à travers la biosphère, l'atmosphère, l'hydroosphère et la lithosphère de la Terre. Dans les forêts tropicales, ces cycles sont très dynamiques, avec un renouvellement rapide des nutriments et de la biomasse ; néanmoins, les forêts tropicales jouent un rôle important dans le stockage du carbone à l'échelle mondiale.
- **La biodiversité** est la variété de la vie sur Terre, y compris ses variations au sein et entre les espèces et les écosystèmes (diversité génétique, phylogénétique, taxonomique et fonctionnelle). Dans les forêts tropicales, la biodiversité est exceptionnellement élevée au sein des forêts et d'une forêt à l'autre, favorisant des interactions complexes et le fonctionnement des écosystèmes, et entraînant une hétérogénéité dans les réponses et la résilience au climat.
- **Les interactions et rétroactions climatiques** sont les interactions bidirectionnelles entre les systèmes climatiques et les écosystèmes. Les forêts tropicales régulent directement les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie. Les changements climatiques (tels que les variations de température et de précipitations) et les changements dans l'utilisation et la couverture des sols (tels que les incendies et la



**Figure 6. PANGEA en chiffres.** L'effort de délimitation du champ d'application de PANGEA en 2024 a impliqué plus de 800 personnes de plus de 396 institutions au cours d'ateliers, de réunions publiques, de conférences, de réunions bilatérales et d'activités de groupes de travail.



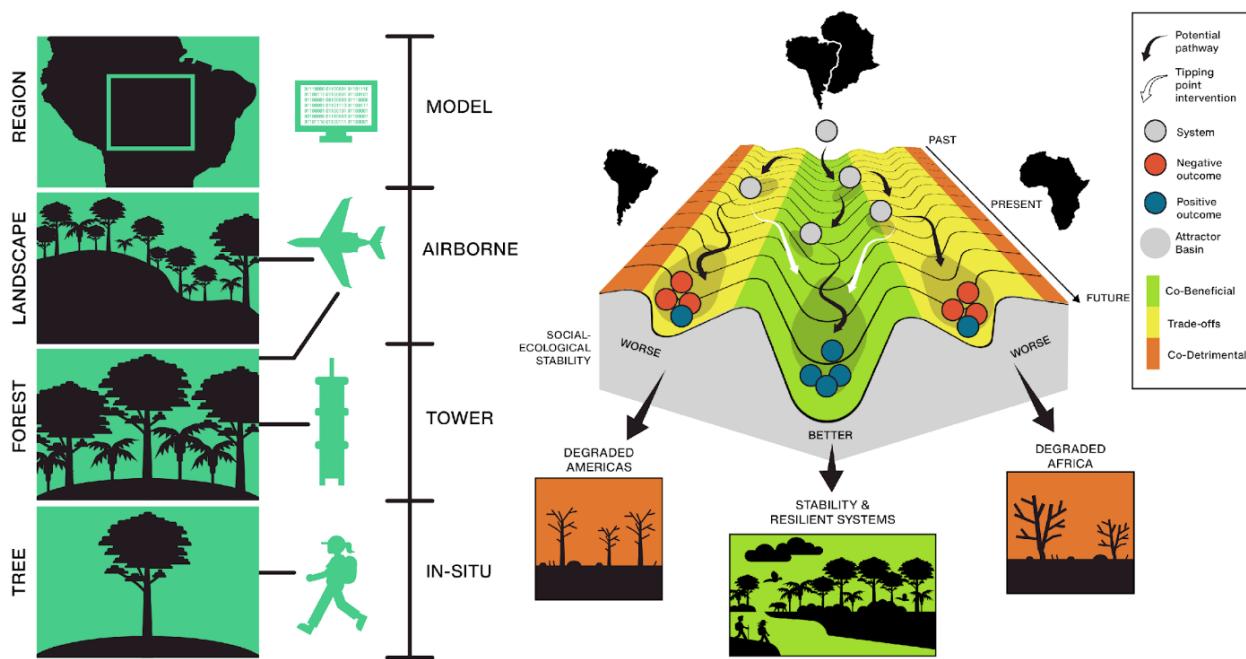
**Figure 7. Thèmes scientifiques de PANGEA.** Les thèmes scientifiques et applicatifs de PANGEA mettent l'accent sur la résolution des incertitudes liées aux tendances multidécennales et aux réponses aux événements extrêmes dans cinq domaines thématiques.

dégradation des forêts) peuvent modifier la dynamique des écosystèmes forestiers, créant ainsi des boucles de rétroaction qui affectent la stabilité du climat mondial.

- **Les systèmes socio-écologiques** sont des systèmes interconnectés entre l'homme et la nature, où les composantes écologiques et sociales interagissent et s'influencent mutuellement. Dans les forêts tropicales, ces systèmes sont façonnés par les moyens de subsistance, les pratiques culturelles et l'utilisation des ressources des communautés locales et mondiales, tandis que les changements écologiques ont un impact sur le bien-être social, créant des rétroactions complexes entre les activités humaines et la stabilité de l'écosystème.
- **Perturbations Les dynamiques** varient en fonction du type, de l'intensité et de la fréquence et impliquent des événements naturels ou induits par l'homme, tels que les incendies, les tempêtes, la sécheresse et l'exploitation forestière, qui perturbent les écosystèmes et affectent leur structure et leur fonction. Dans les forêts tropicales, ces perturbations peuvent entraîner des changements dans les cycles biogéochimiques, la biodiversité et les rétroactions sur le climat et les systèmes socio-écologiques.

À l'aide de ces thèmes, PANGEA répondra à la question générale (**figure 8**) : **Quel est le degré de vulnérabilité ou de résilience des paysages forestiers tropicaux face aux changements climatiques et d'utilisation des terres et quelles sont les rétroactions des changements forestiers sur le cycle mondial du carbone et sur le climat ?**

Pour répondre à cette vaste question de la vulnérabilité des forêts tropicales et des rétroactions, et pour informer la conservation des forêts et de la biodiversité, ainsi que les stratégies d'atténuation et d'adaptation au climat, PANGEA doit répondre à trois sous-questions transdisciplinaires :



**Figure 8.** PANGEA étudie le degré de vulnérabilité ou de résilience des paysages forestiers tropicaux, ainsi que leurs répercussions sur le cycle du carbone et le climat à l'échelle mondiale. La science, les applications et les collaborations de PANGEA utilisent une approche intégrée pour combler le fossé entre les progrès rapides de la science et de la technologie et la capacité de la société à les exploiter pour un monde plus résilient.

1. Quels sont les **schémas** des changements récents (5-30 ans) et en cours dans les états, dynamiques et rétroactions des paysages forestiers tropicaux, et comment varient-ils géographiquement ?
2. Quels **processus** contrôlent l'hétérogénéité de la vulnérabilité des paysages forestiers tropicaux aux changements structurels et fonctionnels dans l'Anthropocène ?
3. Comment les changements actuels et futurs **prévus** dans les paysages forestiers tropicaux modifieront-ils les rétroactions sur les climats locaux, régionaux et mondiaux et sur les systèmes socio-écologiques ?

Pour répondre aux questions ci-dessus, nous avons établi cinq **objectifs PANGEA** :

1. **Caractériser et quantifier les réponses hétérogènes des forêts tropicales** aux changements climatiques et d'utilisation des sols ;
2. **Répondre aux besoins en matière d'étalonnage, de validation et de développement d'algorithmes** afin de garantir que les mesures peuvent être extraites avec précision des **ensembles de données de télédétection par satellite** au-dessus des forêts tropicales, ce qui permettra en fin de compte de faire progresser l'utilité globale des missions satellitaires ;
3. **Limiter l'incertitude des modèles de prévision des flux de carbone tropical et d'autres cycles biogéochimiques, de la biodiversité et des rétroactions entre la forêt et le climat** en améliorant la compréhension des processus et en faisant progresser l'intégration des données de télédétection et des modèles.

4. **Développer de nouvelles capacités de surveillance du carbone, de la biodiversité et de l'agriculture à l'aide de la télédétection par satellite** et soutenir le développement d'outils permettant de traduire la science en action.
5. **Former la prochaine génération de scientifiques et de dirigeants** pour poursuivre ce travail au-delà de PANGEA.

Idéalement, PANGEA devrait être mis en œuvre dans l'ensemble des tropiques. En réalité, PANGEA devra avoir une portée plus limitée en raison de contraintes budgétaires et d'une priorisation de ce qui est réalisable dans un délai de 6 à 9 ans. Limiter PANGEA à un seul continent tropical l'empêche toutefois d'effectuer des comparaisons à l'intérieur d'un même continent et entre les continents. C'est pourquoi les recherches et les activités de PANGEA donneront la priorité à l'étude des différences entre les deux plus grandes étendues de forêts tropicales de la planète, à savoir les **Amériques** et **l'Afrique centrale**. Ces deux continents dépendent fortement des précipitations recyclées (Baker et Spracklen, 2022) mais ont réagi différemment aux tendances décennales à l'assèchement (Asefi-Najafabady & Saatchi, 2013 ; Saatchi et al., 2013) et ont été soumis à des régimes contrastés d'utilisation des terres (Malhi et al., 2013 ; Berenguer et al., 2021a). Ces continents présentent également des projections contrastées, bien qu'incertaines, en ce qui concerne les tendances des précipitations (Cook et al., 2020 ; Dobler et al., 2024). L'accent mis sur ces deux continents, tout en intégrant des ensembles de données et des recherches provenant d'activités existantes et complémentaires dans l'ensemble des tropiques, mettra en lumière l'importance des états et des processus actuels plus qu'en se concentrant sur une seule région.

## 1.2 Le besoin urgent de PANGEA

La mise en œuvre du PANGEA est urgente pour trois raisons. Premièrement, des études suggèrent l'effondrement potentiel des écosystèmes forestiers tropicaux dans les décennies à venir, ce qui pourrait avoir un impact considérable sur les cycles mondiaux du carbone et de l'eau, exacerbant ainsi le changement climatique (Lovejoy et Nobre 2018, Malhi et al., 2009 ; Boulton et al., 2022 ; Wunderling et al., 2022). Étant donné le rôle essentiel de ces écosystèmes dans les cycles mondiaux du carbone et de l'eau, l'effondrement des écosystèmes forestiers tropicaux aurait des effets puissants sur l'ensemble du système terrestre, exacerbant les tendances actuelles du changement climatique (Wunderling et al., 2024). Deuxièmement, la recherche au sol reste rare, et les connaissances nécessaires pour comprendre correctement les données scientifiques des missions satellitaires actuelles - par exemple **GEDI** (Global Ecosystem Dynamics Investigation), **EMIT** (Earth Surface Mineral dust source Investigation), **OCO-2/3** et **ECOSTRESS** (Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station) - et futures - par exemple **NISAR\***, **BIOMASS\***, **EDGE\*** et **SBG\*** - sont insuffisantes. PANGEA offrira une occasion unique d'obtenir des mesures au sol et des récupérations aériennes grâce à des efforts internationaux coordonnés et bien programmés, de comprendre les signaux émis par ces missions, de développer et d'établir des méthodes de synthèse et d'assimilation des données, ainsi que de piloter et d'établir des modèles de la biosphère terrestre et du système socio-écologique. Si l'on ne tire pas parti de ces missions pour les coordonner avec les mesures au sol, on manquera une occasion unique de réduire les incertitudes dans les régions où les stocks de carbone sont les plus élevés et où les écosystèmes terrestres apportent une contribution majeure aux cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments (Schimel et al., 2015 ; Schimel et al., 2019). Troisièmement, le risque de transitions critiques dans les forêts tropicales diffère selon les biomes forestiers tropicaux (Liu et al., 2017), des exemples récents montrant des différences

prononcées entre l'Afrique et les Amériques (Hubau et al., 2020 ; Bennett et al., 2021 ; 2023). Nous commençons à peine à comprendre les mécanismes à l'origine de ces différences, ainsi que la diversité structurelle et fonctionnelle sous-jacente des forêts tropicales. PANGEA comblera les lacunes critiques en matière de connaissances, permettant des avancées opportunes qui soutiennent directement le domaine d'intérêt du cycle du carbone et des écosystèmes de la NASA, en accord avec les domaines d'intérêt du cycle de l'eau et de l'énergie et de la variabilité et du changement climatiques, l'utilité des missions telles que NISAR et SBG, ainsi que les outils permettant de mettre en œuvre et d'évaluer les engagements en matière de climat et de biodiversité à l'échelle planétaire.

### 1.3 Rôle des observations par télédétection

**PANGEA comblera les lacunes critiques en matière de données et de méthodes afin de faire progresser la mise à l'échelle d'une multitude de mesures au sol et d'observations satellitaires et aériennes.** Nous vivons une période sans précédent, riche en données, en modèles et en calculs. Ces dernières années, les lidars spatiaux, les radars à micro-ondes, les capteurs hyperspectraux, les altimètres et d'autres capacités de télédétection sont devenus opérationnels à de multiples échelles. Les capteurs satellitaires et aériens permettent de récupérer plus directement les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, les flux d'eaux souterraines et de surface qui peuvent révéler les flux latéraux de carbone et de nutriments, ainsi que la diversité structurelle, fonctionnelle et, dans certains cas, taxonomique des forêts. Toutefois, dans les régions forestières tropicales, les mesures au sol sont rares, ce qui limite l'utilité globale des observations par satellite. Peu de pays forestiers tropicaux disposent d'inventaires forestiers et fauniques systématiques et régulièrement répétés, de tours à flux ou de données météorologiques, en particulier en Afrique tropicale. Cependant, même le nombre limité de sites de recherche et de mesures au sol fournira des informations essentielles sur les processus biogéochimiques, écologiques et hydrologiques. La rareté de ces données rend difficile l'extension des mesures et des analyses à des régions régionales, continentales ou pantropicales. Le projet PANGEA permettra de coordonner la collecte de données et de faire progresser les méthodes afin de mettre à l'échelle de manière plus précise les mesures au sol et sur tour, d'une part, et les observations aéroportées et spatiales, d'autre part.

**Pour exploiter pleinement les nouvelles observations satellitaires provenant de nouveaux capteurs, nous avons besoin de données d'étalonnage et de validation coordonnées. Les lacunes importantes en matière de données et les incertitudes liées aux processus dans les forêts tropicales limitent actuellement le développement d'algorithmes et de produits, ce qui empêche de tirer pleinement parti de l'utilité mondiale de ces capteurs satellitaires.**

**La constellation de satellites internationaux d'observation de la Terre en service aujourd'hui, ceux qui sont sur le point d'être lancés et ceux qui en sont aux premiers stades de la planification et de la mise en œuvre offrent de nombreuses dimensions d'informations qui n'étaient pas disponibles auparavant ni largement utilisées dans les études sur les forêts tropicales.** L'expérience à grande échelle sur la biosphère et l'atmosphère en Amazonie (LBA) (Avissar et al., 2002 ; Davidson et al. ; 2012 ; Keller et al., 2009), le précédent projet de la NASA sur les forêts tropicales, a débuté en 1998, avant le lancement des satellites EOS Terra et Aqua. Landsat était alors le principal outil de surveillance de la déforestation (Skole et Tucker, 1993) et, au cours de la première décennie de recherche LBA, il a été utilisé pour estimer l'exploitation forestière (Asner et al., 2005) et les incendies de forêt en sous-étage (Morton et al., 2011). Les informations de télédétection des premiers modèles écologiques, tels que le

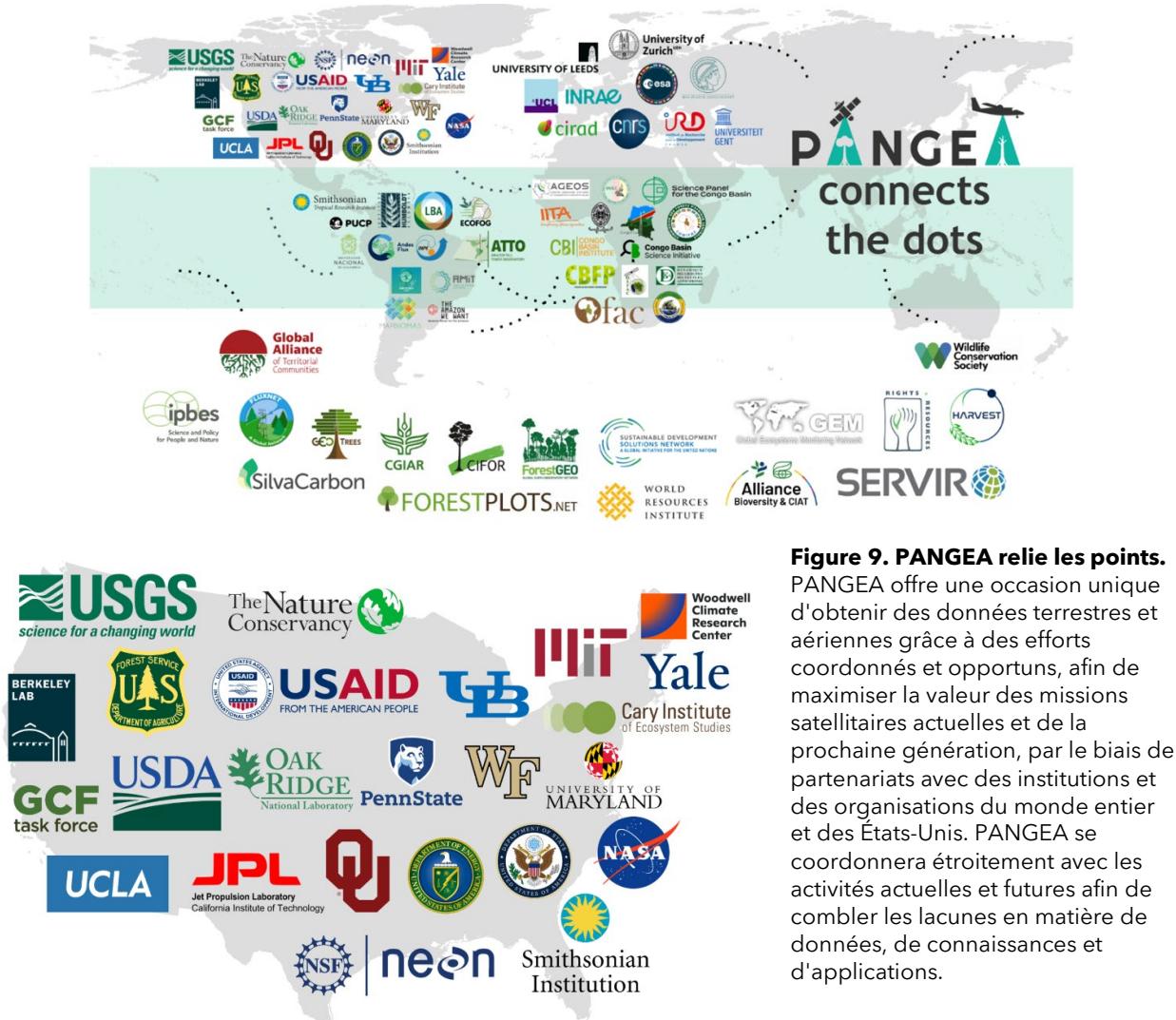
modèle de biosphère de Carnegie-Ames-Stanford (CASA) (Potter et al., 1993), intégraient à l'origine des données d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) provenant de satellites météorologiques en orbite polaire (AVHRR), calibrées en fonction de la productivité primaire nette. La compréhension de ces difficultés de mise en correspondance des données a motivé l'établissement de nouveaux liens avec des données de télédétection plus sophistiquées. L'interprétation des données MODIS a permis d'observer que la région amazonienne présente un signal saisonnier distinct de verdissement et de brunissement (Huete et al., 2006). Le LBA a comblé un vide dans les connaissances, en développant une compréhension de base de la vulnérabilité de l'Amazonie au changement climatique. En outre, l'approche LBA a créé une communauté de recherche autonome et dynamique qui a prospéré au Brésil et continue d'influencer l'ensemble de l'Amérique du Sud. Le LBA était limité par la zone focale de l'Amazonie, ainsi que par le type et la disponibilité des observations sur le terrain et des données de télédétection. Le projet en cours Next Generation Ecosystem Experiment in the Tropics (NGEE-Tropics, <https://ngee-tropics.lbl.gov>) se concentre sur la prévisibilité des processus des écosystèmes tropicaux à l'échelle d'un site spécifique et l'augmentation de la capacité à étendre ces connaissances aux niveaux continental et pantropical reste un défi majeur. PANGEA s'attaquera aux limites des efforts précédents en exploitant des données de télédétection plus récentes et futures pour mettre à l'échelle les états et les processus des écosystèmes. Cette approche ouvre la voie à une compréhension plus complète et prédictive des écosystèmes tropicaux, de l'échelle locale à l'échelle pantropicale. **Les nouvelles technologies de capteurs satellitaires vont au-delà de l'évaluation de la verdure (voir section 5) et fournissent des informations beaucoup plus approfondies sur la fonction des forêts tropicales, permettant des mesures plus directes des flux des écosystèmes, de la biodiversité et des réponses aux changements.**

**La compréhension des forêts tropicales à l'échelle nécessite une télédétection par satellite associée à des mesures au sol.** Les lacunes en matière de connaissances (voir section 3) auxquelles PANGEA s'attaquera ne peuvent être comblées sans observations satellitaires pantropicales, analyses intégratives et modèles. Pour faire progresser efficacement l'utilisation de la télédétection par satellite, il faut une intégration réfléchie, créative et rigoureuse de différentes formes de données à toutes les échelles spatiales et temporelles. L'abondance des nouvelles données satellitaires, associée aux progrès de l'informatique en nuage, de l'apprentissage automatique et de l'IA, permettra une analyse des données plus robuste que dans les précédents projets TE de la NASA, tels que le LBA. Actuellement, la rareté des observations au sol et les disparités d'échelle avec les données satellitaires tropicales empêchent la validation des mesures de télédétection et le développement de modèles d'IA. PANGEA aborde ces questions en intégrant des données au sol, des tours, des drones, des avions et des satellites avec des approches de mise à l'échelle affinées dans des projets antérieurs tels que l'expérience sur la vulnérabilité de l'Arctique et de la forêt boréale (ABoVE).

## 1.4 Nécessité d'une collecte de données coordonnée et d'un travail d'équipe

Reconnaissant l'empreinte profonde que le colonialisme a laissée sur la recherche sur les forêts tropicales, ainsi que la science parachutée et survolée (Culotta et al., 2024), PANGEA adopte une approche interactive et imbriquée pour garantir un engagement équitable et éthique avec les scientifiques, les institutions et les partenaires des gouvernements, ainsi que les peuples autochtones et les communautés locales (IPLC). Plusieurs sections décrivent l'approche de PANGEA en matière d'engagement communautaire (section 8), une structure organisationnelle inclusive (section 10.1),

Earth Science to Action (section 9), la formation et l'éducation (section 7), la science ouverte et la gestion des données (section 10.3), et les accords internationaux lors de la réalisation de campagnes aéroportées (section 6.2.4). L'approche de PANGEA repose sur la reconnaissance du fait que la science du système terrestre est intrinsèquement multiforme et complexe. Le programme d'écologie terrestre de la NASA a promu le modèle multi-investigateurs pendant des décennies de campagnes sur le terrain qui couvrent la première expérience de terrain de l'ISLSCP (FIFE), l'étude de l'atmosphère et de l'écosystème boréal (BOREAS), l'expérience à grande échelle sur la biosphère et l'atmosphère en Amazonie (LBA), et ABoVE. PANGEA favorisera également une collaboration étroite avec les principales institutions américaines, notamment l'**USDA**, l'**USFS**, le **DOE**, l'**USGS**, le **Smithsonian**, les grandes universités, notamment **Penn State**, l'**université d'Oklahoma**, **UCLA** et l'**université du Maryland**, les communautés autochtones, notamment l'**Alliance mondiale des communautés territoriales (GATC)**, et les partenaires internationaux, dont plus de 390 institutions, organisations et universités de pays tropicaux (**figure 9**).



**Figure 9. PANGEA relie les points.**

PANGEA offre une occasion unique d'obtenir des données terrestres et aériennes grâce à des efforts coordonnés et opportuns, afin de maximiser la valeur des missions satellitaires actuelles et de la prochaine génération, par le biais de partenariats avec des institutions et des organisations du monde entier et des États-Unis. PANGEA se coordonnera étroitement avec les activités actuelles et futures afin de combler les lacunes en matière de données, de connaissances et d'applications.

Ces partenariats couvrent divers efforts de recherche, intégrant l'expertise de plusieurs disciplines pour combler les lacunes critiques en matière de connaissances et les multiples facteurs et processus en interaction pour la compréhension des forêts tropicales. De nombreuses variables requièrent des connaissances spécialisées, allant de l'acquisition et de l'utilisation d'observations par satellite et d'instruments tels qu'un spectromètre imageur à haute performance à l'identification botanique des espèces d'arbres ou aux connaissances traditionnelles sur les interactions entre les espèces. Aucun individu ou petit groupe d'individus ne possède à lui seul toutes les connaissances et tous les outils nécessaires à une étude scientifique du système terrestre. Pour répondre aux besoins d'analyses intégratives des biomes tropicaux, il faut une grande équipe de spécialistes travaillant ensemble. PANGEA nécessite une collaboration étroite pour garantir que les mesures sont coordonnées dans le temps et l'espace afin de maximiser leur valeur dans l'interprétation et la modélisation. Cet objectif ne peut être atteint que par une équipe coopérative, coordonnée et transdisciplinaire. **Afin d'inclure, d'autonomiser et de faire progresser les groupes historiquement sous-représentés dans les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques (STEM) - par exemple, les personnes qui s'identifient comme noires, indigènes, hispaniques, les femmes ou les personnes handicapées - PANGEA donnera la priorité à un engagement éthique et équitable tout au long du projet.**

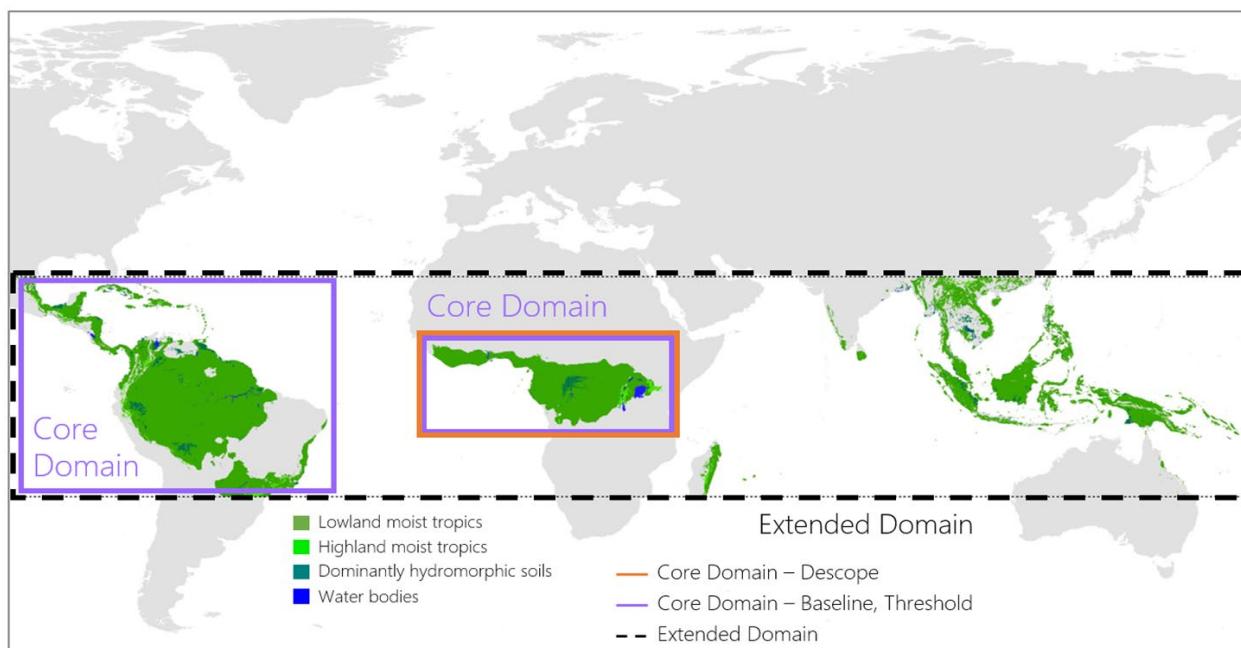
## 1.5 Campagne de terrain et domaine d'étude PANGEA sur l'écologie terrestre

**PANGEA est un projet pluriannuel en plusieurs phases qui comprend des activités de télédétection satellitaire et aérienne, des mesures au sol et des campagnes à l'échelle du paysage.** Les activités de PANGEA permettront de mesurer une série de variables afin de caractériser la structure, la fonction, la dynamique, les flux et les systèmes socio-écologiques de divers paysages forestiers sous les tropiques. Grâce à une conception modulaire et flexible des campagnes, PANGEA fera progresser les capacités de télédétection par satellite dans les tropiques afin de comprendre les réponses hétérogènes des forêts tropicales aux changements climatiques et d'utilisation des sols. PANGEA permettra d'acquérir des mesures au sol colocalisées avec des données de télédétection aéroportées (par exemple, hyperspectrales, lidar, SAR, flux de carbone) qui ont été collectées jusqu'à présent dans seulement quelques endroits à travers les tropiques à différents moments, par différentes organisations, et avec différentes méthodes.

PANGEA comprendra un domaine **principal** et un domaine **étendu**. Le domaine central est celui dans lequel la composante financée par la NASA des campagnes coordonnées au sol, à la tour, par drone et par avion se déroulera dans plusieurs paysages de grande taille (environ 10 000 km<sup>2</sup>). La section 6.2.2 présente les paysages candidats évalués au cours du processus de cadrage qui seront évalués au cours de la phase de définition scientifique de PANGEA, avant la sélection finale. Le domaine étendu englobera les forêts humides pantropicales et constituera la zone d'intérêt scientifique la plus large, où des projets supplémentaires pourront être menés dans le cadre de partenariats et où les analyses par satellite et par modélisation seront privilégiées. L'encadré 1 décrit une évaluation préliminaire de l'hétérogénéité au sein de paysages géographiques clés dans le domaine étendu de PANGEA. Le domaine PANGEA (central et étendu) couvre les systèmes socio-écologiques des forêts tropicales et les paysages associés des zones tropicales humides, ainsi que l'échelle spatiale requise pour répondre aux questions principales (section 3). Les domaines central et étendu engloberont les forêts tropicales humides, y compris les forêts inondées, les zones humides et les tourbières.

PANGEA tirera parti de l'investissement de la NASA dans le domaine de l'écologie terrestre pour ses ressources de base. Pour tenir compte d'un éventail de scénarios de financement de la NASA pour PANGEA, nous avons dérivé les niveaux de **référence**, de **seuil** et de **descope** des **mesures scientifiques essentielles** à partir des objectifs scientifiques de PANGEA (voir la section 6.2.1 pour plus de détails). Les mesures scientifiques essentielles permettront à PANGEA (1) de comprendre les différences entre les stocks et les flux de carbone tropicaux et les forces à l'origine de l'hétérogénéité, (2) de résoudre les problèmes de mise à l'échelle entre les données de terrain et les données satellitaires en faisant progresser la compréhension des processus et les méthodes de mise à l'échelle, et (3) de prévoir les différentes réponses des écosystèmes forestiers tropicaux aux changements climatiques et aux changements d'utilisation des terres. Comme indiqué ci-dessus, le domaine principal de PANGEA couvre les forêts tropicales humides d'Afrique et, selon le niveau de mesure scientifique essentielle, les forêts tropicales humides des Amériques (**figure 10**).

Nous présentons ici une vue d'ensemble de la stratégie et de la conception de l'étude, décrites en détail dans la section 6. Nous nous concentrerons sur les campagnes paysagères et les activités de mesure de PANGEA au début et à la fin des saisons sèches. Au début de la saison sèche, les mesures captureront la dynamique du système à une période de stress réduit, immédiatement après la saison humide intense. Cette période permet de coordonner des mesures à plusieurs échelles, ce qui n'est pas possible pendant le pic de la saison des pluies, lorsque la couverture nuageuse limite la télédétection optique sous les tropiques. Les campagnes de mesure menées à la fin de la saison sèche permettront de saisir les moments où les systèmes socio-écologiques tropicaux sont les plus sollicités en termes d'eau et de température. Bien que nous reconnaissions que les données collectées



**Figure 10. Domaine d'étude PANGEA.** Le domaine principal de PANGEA, sous les niveaux Baseline et Threshold (lignes violettes pleines) et Descope (ligne orange pleine) des mesures scientifiques essentielles, et le domaine étendu (ligne noire pointillée). Les limites proviennent des zones agroécologiques GAEZv4 suivantes : zones tropicales humides de basse altitude, zones tropicales humides de haute altitude, sols à dominante hydromorphe et terres présentant de graves limitations en termes de sol/terrain.

uniquement pendant la saison sèche risquent de fausser la compréhension des forêts tropicales en raison des fortes différences saisonnières dans la dynamique et les processus, y compris le cycle du carbone, l'hydrodynamique, les interactions entre les espèces et les activités d'utilisation des terres (par exemple, les incendies et le défrichement), la nécessité d'obtenir des mesures terrestres, aériennes et satellitaires simultanées fait de cette décision une décision pragmatique. À la fin de la saison des pluies, la plupart des processus opérant pendant le pic de la saison des pluies seront encore présents. C'est pourquoi PANGEA sera toujours en mesure de saisir les différences saisonnières en se concentrant sur le début et la fin de la saison sèche. Pour répondre aux objectifs de PANGEA en matière de science et d'applications, trois stratégies potentielles sont présentées :

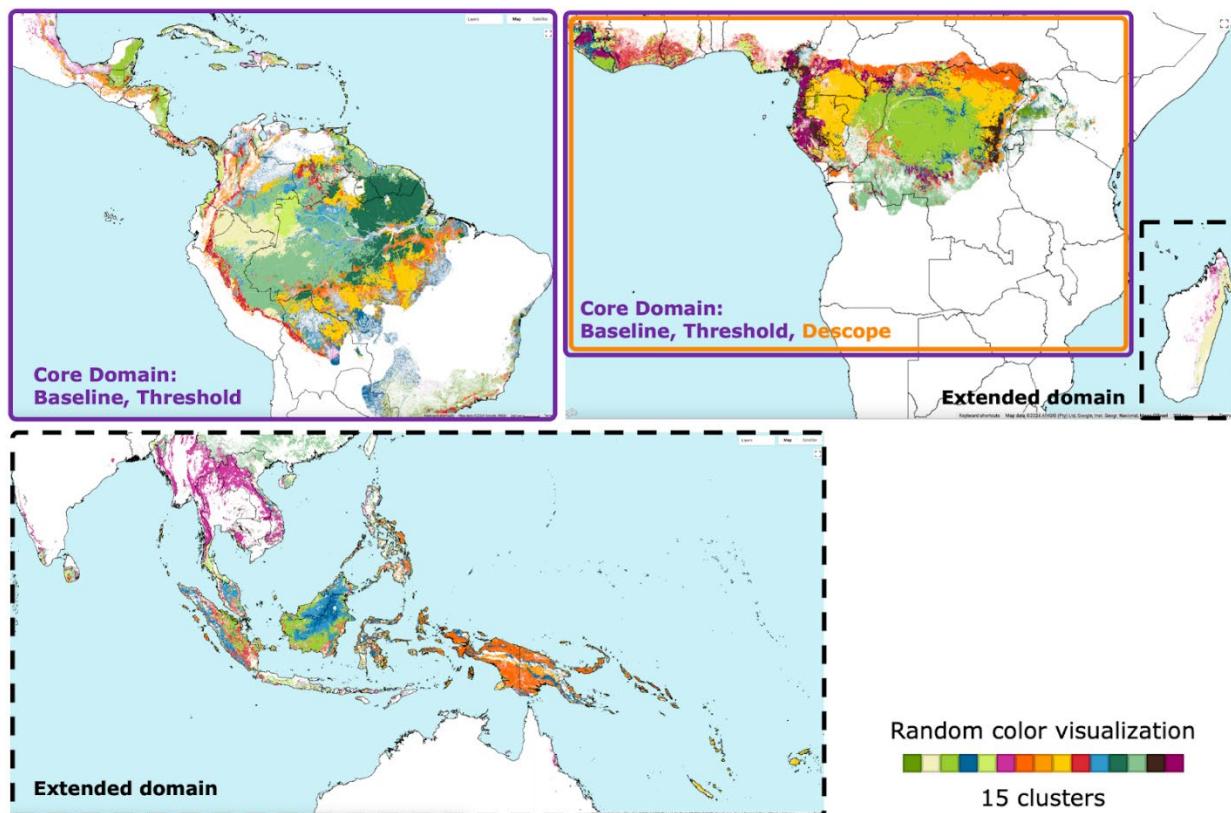
- **Base de référence** : Les mesures PANGEA englobent ~3-6 paysages d'Afrique tropicale et ~3-6 paysages d'Amérique tropicale qui capturent la fin de la saison des pluies et la fin de la saison sèche.
- **Seuil** : Les mesures PANGEA englobent 2 paysages d'Afrique tropicale et 2 paysages d'Amérique tropicale qui capturent la fin de la saison des pluies et la fin de la saison sèche.
- **Descope** : Les mesures PANGEA englobent 2 paysages tropicaux africains qui capturent la fin des saisons humides et sèches, qui seront comparées aux informations pour les tropiques américains recueillies à partir des données existantes, d'autres projets et campagnes menés par des collaborateurs, des achats de données commerciales et des drones déployables. Cette option répond partiellement aux objectifs de PANGEA tout en tenant compte d'éventuelles restrictions de financement ou d'incertitudes géopolitiques.

Les mesures Baseline, Threshold et Descope détaillées dans la *section 6.2.1* représentent des projets autonomes financés par la NASA, sans aucune dépendance à l'égard de fonds non NASA ou d'efforts synergiques (**tableau 1**). Les campagnes intensives menées dans le cadre de ces stratégies sont conçues pour être mises en œuvre en tant que modules autonomes avec des dépendances limitées, de sorte que le calendrier et le budget globaux puissent être flexibles. Compte tenu de l'urgence et de l'importance du sujet, et de l'intérêt généralisé de la communauté, il existe un fort potentiel pour augmenter ou même dépasser les contributions de la NASA (voir la *section 10.3* pour plus de détails). Sauf indication contraire, le domaine central dans le livre blanc se réfère à celui défini pour le niveau de référence des mesures scientifiques essentielles.

**Tableau 1.** Résultats de PANGEA pour les versions Baseline, Threshold et Descope.

RÉALISABLE	BASE DE RÉFÉRENCE	SEUIL	DESCOPE
VARIABILITÉ ENTRE LES CONTINENTS	Oui	Oui	Non
VARIABILITÉ AU SEIN DES CONTINENTS	Oui	Limitée	Limitée
FONCTIONNEMENT DES FORÊTS TROPICALES LE LONG DES GRADIENTS ENVIRONNEMENTAUX	Gradients multiples. Comparaisons intercontinentales.	Gradient unique. Effets indirects par le biais de gradients intercontinentaux.	Gradient unique ou colinéaire.
CAPACITÉ À FOURNIR DES DONNÉES D'ÉTALONNAGE DANS LES RÉGIONS CRITIQUES	Très forte	Fort	Modéré
LE SUCCÈS DÉPEND DE PARTENARIATS ET DE FINANCEMENTS EXTERNE	Pas de contingence	Assez contingent	Très contingent
CAPACITÉ À RÉPONDRE AUX QUESTIONS SCIENTIFIQUES CLÉS DE PANGEA	Entièrement	En grande partie	Partiellement

L'emplacement de ces principaux domaines de recherche dans le domaine central sera basé sur (1) les possibilités de mener des recherches intégrées sur plusieurs thèmes scientifiques (*section 2*) ; (2) l'occurrence d'une variabilité clé en ce qui concerne les dynamiques biotiques, abiotiques et de perturbation (**figure 11**) ; et (3) l'existence de recherches en cours ou prévues financées par la NASA, ainsi que les relations avec des collaborateurs et des institutions locales et internationales et les activités en cours menées par ces derniers. Au cours de l'étude de cadrage, une première analyse de la variabilité dans le domaine étendu a été réalisée afin d'évaluer l'hétérogénéité spatiale (voir **encadré 1**).



**Figure 11. Analyse de la variabilité.** Résultats d'une première analyse de variabilité décrite dans l'encadré 1. Pour chaque continent, nous avons défini 15 groupes décrivant l'hétérogénéité des forêts dans les paysages, en utilisant des ensembles de données sur le climat, la structure, la composition et la fonction des forêts, la biodiversité, l'utilisation des terres, la couverture terrestre et l'historique des perturbations. Les groupes de chaque continent ont été définis indépendamment et sont représentés par des couleurs aléatoires différentes. La même couleur sur différents continents n'indique pas une correspondance des conditions environnementales entre les continents.

Les campagnes aéroportées constitueront une composante majeure des acquisitions de données à l'échelle du paysage (Baseline, Threshold ou Descope). Elles comprendront des données d'observation des flux aéroportés pour mesurer les flux de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , de chaleur sensible et de chaleur latente à haute résolution spatiale ; la réflectance hyperspectrale et le lidar à petite échelle pour mesurer les caractéristiques des feuilles de la canopée et la structure de la végétation ; les données du radar à synthèse d'ouverture (SAR) pour mesurer les zones humides, les systèmes saisonnièrement inondés et la dynamique des perturbations ; et le lidar à petite échelle pour mesurer l'hétérogénéité verticale et horizontale à haute fidélité dans la structure de l'écosystème et l'indice de surface des plantes. Les mesures et les connaissances au sol sont essentielles pour (1) valider les observations aériennes et satellitaires, (2) découvrir les mécanismes écologiques et (3) évaluer les

### **Encadré 1. Évaluation de l'hétérogénéité au sein du domaine étendu de PANGEA.**

Les écosystèmes forestiers tropicaux sont hétérogènes et les modèles de structure forestière, de composition des espèces et de fonction émergent des interactions entre le climat, l'histoire géologique, les sols, la topographie, la biogéographie, les perturbations naturelles, les interactions biotiques et les changements d'utilisation et d'occupation des sols. Les campagnes de terrain de PANGEA seront conçues pour capturer et échantillonner des forêts couvrant plusieurs paysages hétérogènes. Pour guider la sélection des paysages, l'équipe PANGEA a effectué une analyse des écosystèmes forestiers tropicaux en tenant compte de plusieurs facteurs d'hétérogénéité (figure 11). Cette analyse était basée sur (1) la structure forestière à partir de la biomasse vivante et des flux nets de carbone (Harris et al., 2021) et de la hauteur de la canopée (Lang et al., 2023) ; (2) les mesures de la biodiversité à partir de la richesse des espèces pour les taxons non végétaux (par exemple, l'IUCN, 2024) ; et (3) les mesures de la biodiversité à partir de la richesse des espèces pour les taxons non végétaux, IUCN, 2024) ; (3) la fluorescence de la chlorophylle induite par le soleil (SIF) (Li et Xiao, 2019) comme indicateur de la productivité primaire brute (PPB) ; (4) la température annuelle moyenne et les précipitations totales de l'ERA5 (Hersbach et al, 2020) et le déficit hydrique climatique à long terme (Chave et al. 2014) ; (5) la teneur en azote et en argile du sol provenant de SoilGrids2.0 (Poggio et al., 2021) ; (6) les informations topographiques provenant de la hauteur au-dessus du drainage le plus proche (Donchyts et al. 2016) ; et (7) un ensemble de données sur les modifications humaines à l'échelle mondiale (établissements humains, agriculture, transport, exploitation minière, énergie et infrastructure) (Kennedy et al. 2019). Pour s'assurer que les paysages étaient cohérents avec l'histoire de l'évolution, chaque continent a été analysé séparément, ce qui a conduit à 15 groupes uniques pour chaque région (Amériques tropicales, Afrique et Australasie). Cette évaluation initiale n'a pas tenu compte de l'incertitude des ensembles de données et n'a pas cherché à identifier le nombre de groupes le plus parcimonieux. PANGEA affinera cette approche au cours de la phase de définition scientifique et combinera ces résultats avec la liste des paysages candidats (*section 6.2.2*), les régions qui dominent l'incertitude du modèle et de la synthèse des données (*section 6.3.1*), et l'évaluation de la faisabilité technique (*section 10*) pour définir les paysages prioritaires dans le plan d'expérience concis (*section 10.5*).

dépendances d'échelle dans les écosystèmes tropicaux. PANGEA comble ces trois lacunes dans les forêts tropicales grâce à des partenariats avec des organisations locales et à l'infrastructure existante afin d'étendre les observations sur le terrain et de faire progresser l'intégration des données et des connaissances, y compris les données manuelles *in situ* et les CET (par exemple, la diversité floristique, faunistique et phylogénétique, les interactions entre les espèces, la dynamique des perturbations, les activités d'utilisation des terres) ; les données automatisées *in situ* (par exemple, les mesures de flux de sève, les pièges photographiques, les systèmes d'irrigation et les systèmes d'irrigation), mesures de flux de sève, pièges photographiques et capteurs bioacoustiques) ; flux de covariance de Foucault et données météorologiques ; télédétection proximale sur tour (par exemple, SIF, rayonnement infrarouge thermique, VOD et caméras phénologiques [PhenoCams]) ; et télédétection proximale par drone. Une série de modèles sera développée à partir des données et des informations collectées, ainsi que des produits de synthèse dérivés des ensembles de données acquises, qui seront utilisés pour initialiser, fournir des conditions limites et étalonner les modèles basés sur les processus (*section 6.3*). La télédétection et les mesures au sol de PANGEA pour l'intégration des données et des modèles permettront de généraliser les capacités de cartographie sous les tropiques et de modéliser les flux de carbone, d'eau et d'énergie et leurs relations avec la biodiversité afin d'examiner la stabilité des forêts tropicales dans le cadre des projections climatiques futures.

## 1.6 La science de la terre à l'œuvre

Le système terrestre, avec ses systèmes géophysiques, biologiques et sociaux interconnectés, vit un moment particulièrement unique de son histoire. Nous devons saisir l'occasion de bénéficier des progrès incroyables des outils modernes, de la puissance de calcul (y compris l'IA) et des infrastructures de recherche. Ces progrès aideront les gens à prendre des mesures décisives pour préserver les forêts et la biodiversité, atténuer le changement climatique et le changement d'affectation des terres et s'y adapter, et améliorer la sécurité alimentaire et hydrique ainsi que la santé humaine. L'accélération du rythme des changements dans les tropiques rend urgente l'application des connaissances issues des frontières des sciences de la Terre de la NASA. Depuis le lancement du programme Earth Science Enterprise Applications en 2001 (ESE Strategic Plan) jusqu'au lancement de la stratégie Earth Science to Action en 2024 (St Germain, 2024 - [ES2A Strategic Plan](#)), la NASA a innové en adoptant une approche systémique pour faciliter la collecte d'observations de la Terre et les prévisions en outils d'aide à la décision et à la gestion pour divers utilisateurs et collaborateurs afin de faire progresser leurs initiatives locales qui fournissent des services essentiels à la société. L'étude décennale de 2017 nous demande de "poursuivre des objectifs de plus en plus ambitieux et des solutions innovantes qui améliorent et accélèrent la valeur scientifique/applicative des observations et analyses spatiales de la Terre pour la nation et le monde d'une manière qui apporte une grande valeur" (Decadal Survey, 2017).

**PANGEA s'appuiera sur les investissements stratégiques et les collaborations internationales pour combler le fossé entre les progrès rapides de la science et de la technologie et la capacité de la société à les exploiter pour un monde plus résilient.**

Les contributions de PANGEA au programme Earth Science to Action (ES2A) visant à faire progresser et à intégrer les connaissances en sciences de la Terre afin de permettre à l'humanité de créer un monde plus résilient sont décrites en détail dans la section 9. En résumé, PANGEA soutient la stratégie ES2A de la NASA en

- *Étudier les risques de franchissement de seuils critiques et le potentiel d'impacts environnementaux et sociaux en cascade.*
- *Soutenir les efforts visant à renforcer la résilience de la Terre par l'évaluation des risques et des éventualités et par l'élaboration de stratégies d'atténuation et d'adaptation pour faire face aux changements mondiaux.*
- *Développer des outils, des modèles et des systèmes d'évaluation efficaces et interactifs de bout en bout, avec des temps de latence, des échelles temporelles et spatiales et une quantification de l'incertitude appropriés, afin de permettre aux communautés, aux responsables politiques et aux décideurs de prendre des mesures fondées sur des données scientifiques.*

## 2 PANGEA Thèmes scientifiques

En raison de la complexité inhérente aux écosystèmes terrestres tropicaux et de leurs rétroactions avec le système terrestre, PANGEA adopte une approche intégrée et transdisciplinaire dans le cadre des cinq thèmes scientifiques présentés à la section 1.1 : Cycles biogéochimiques, biodiversité,

interactions et rétroactions climatiques, systèmes socio-écologiques et dynamique des perturbations. La compréhension des modèles et des processus et la limitation de l'incertitude des projections futures requièrent des compétences diverses et une collaboration coordonnée. PANGEA jette un pont entre les disciplines et les modes de connaissance afin de coproduire une science qui comblera des lacunes spécifiques en matière de connaissances et soutiendra des applications urgentes.

Dans cette section, nous analysons l'état actuel de la science par domaine thématique. Dans la section 3, nous présentons les questions scientifiques intégrées de PANGEA en réponse aux lacunes de connaissances liées aux modèles, aux processus et aux projections futures dans l'ensemble des thèmes scientifiques. La section 4 décrit comment la réponse à ces questions permettra des avancées scientifiques majeures. (Voir l'annexe G pour les sujets dépassant le cadre de PANGEA).

## 2.1 Cycles biogéochimiques

*Ce thème scientifique PANGEA étudiera les modèles de variabilité spatiale et temporelle des stocks et des flux de carbone, y compris les interactions avec d'autres cycles biogéochimiques, ainsi que les processus qui contrôlent les changements hétérogènes, en fournissant des informations qui amélioreront les projections futures.*

**Échange net de dioxyde de carbone avec la biosphère tropicale :** Le dioxyde de carbone atmosphérique (CO<sub>2</sub>) est un gaz à effet de serre (GES) qui a un impact majeur sur le système climatique mondial. La biosphère terrestre est un grand puits de CO<sub>2</sub> atmosphérique avec un échange biosphérique net (EBN) mondial actuel estimé à 3,3 Pg par an<sup>-1</sup>, compensant ~30% du CO<sub>2</sub> émis par les combustibles fossiles chaque année (Friedlingstein et al., 2023). L'EBN fait référence au bilan total du CO<sub>2</sub> échangé entre un écosystème et l'atmosphère. Les écosystèmes terrestres tropicaux contribuent jusqu'à 0,6±0,4 PgC par an<sup>-1</sup> de ce puits (Friedlingstein et al., 2023) et contribuent fortement à la variabilité interannuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique global (Friedlingstein et al., 2023). Au cours des trois dernières décennies, la déforestation tropicale a annulé environ deux tiers des avantages tirés du puits forestier mondial (2,2±0,5 Pg C an<sup>-1</sup>, 1990-2019 ; Pan et al., 2024). Les différences d'efficacité du puits de carbone de la forêt tropicale au sein des continents et entre eux sont évidentes. Des recherches antérieures ont indiqué que, de 2001 à 2019, la région amazonienne (5,14 millions de km<sup>2</sup>) était un puits de carbone net faible (-0,03 Pg C an<sup>-1</sup>), avec une absorption brute (-0,4 Pg C an<sup>-1</sup>) et des émissions brutes (0,3 Pg C an<sup>-1</sup>). Cela représente presque un ordre de grandeur de plus que le puits net. La biomasse vivante de l'Amazonie brésilienne était à elle seule une source nette de carbone (0,06 Pg C an<sup>-1</sup> ; Harris et al., 2021). En revanche, le bassin africain du Congo, plus petit (2,98 millions de km<sup>2</sup>), était un puits de carbone beaucoup plus important (-0,17 Pg C an<sup>-1</sup>) que les forêts amazoniennes, malgré des taux d'absorption brutes similaires (-0,3 Pg C an<sup>-1</sup>). L'ampleur des émissions brutes dans le bassin du Congo (0,14 Pg C an<sup>-1</sup>) était environ la moitié de celle des émissions en Amazonie (Harris et al., 2021).

La compréhension des mécanismes à l'origine des différences de flux de carbone entre les régions forestières tropicales, afin de quantifier la distribution spatio-temporelle des flux de carbone et leur rôle dans les cycles mondiaux du carbone, est une priorité de la recherche.

**Méthane :** Le méthane atmosphérique (CH<sub>4</sub>) est un GES 25 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub> et contribue, selon les estimations, à 30 % de l'augmentation du forçage radiatif dû aux émissions anthropiques (Masson-Delmotte et al., 2021). Les tropiques contribuent à environ 65 % des émissions mondiales totales (anthropiques + naturelles) de CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère (364 Tg CH<sub>4</sub> an<sup>-1</sup>) (Saunois et al., 2024).

Environ 40 % des émissions totales de CH<sub>4</sub> provenant des tropiques sont issues des zones humides, des plaines inondables et des écosystèmes d'eau douce intérieurs (151 Tg CH<sub>4</sub> yr<sup>-1</sup>), ce qui représente environ 20 % du budget total de CH<sub>4</sub> et est responsable de la variabilité interannuelle du taux de croissance du CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère mondiale (Feng et al., 2022 ; Saunois et al., 2024). Les taux de croissance récents du CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère ont augmenté de manière incompatible avec notre compréhension actuelle des sources et des puits de CH<sub>4</sub> à l'échelle mondiale (Turner et al., 2019). PANGEA explorera le cycle du CH<sub>4</sub> dans les tropiques afin de développer des modèles et une compréhension améliorée pour contribuer aux options de gestion.

**Mesures du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> dérivées des satellites :** L'échange net de la biosphère (ENB) au-dessus de l'Amérique du Sud tropicale a montré une récupération du carbone plus lente que prévu après le phénomène El Niño de 2015/2016, peut-être en raison de l'augmentation de l'aridité et des déficits hydriques (Liu et al., 2024a). Les signaux à partir de 2009 indiquent un puits de carbone persistant dans le bassin du Congo qui contraste avec d'importantes sources d'émissions dans les parties occidentale et orientale de l'Afrique tropicale (Palmer et al., 2019). Compte tenu de l'impact mondial de l'augmentation des GES et des incertitudes des mesures récentes, PANGEA utilisera des capteurs avancés et les mesures améliorées du CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>) et du CH<sub>4</sub> (XCH<sub>4</sub>) intégrées dans la colonne dérivée des satellites et utilisées dans les modèles atmosphériques inverses pour contraindre les bilans tropicaux du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> (par ex, Liu et al., 2016 ; Lunt et al., 2019 ; Crowell et al., 2019 ; Palmer et al., 2019 ; Yang et al., 2021a ; Liu et al., 2020 ; Gaubert et al., 2023 ; Wang et al., 2023c ; Liu et al., 2024a ; Byrne et al., 2024). Le récent projet de comparaison de modèles (MIP) de l'OCO-2, basé sur 14 modèles, a montré des sources nettes de carbone dans le nord-est de l'Amazonie et le nord de l'Afrique tropicale, contrastant avec des puits nets de carbone dans l'ouest de l'Amazonie et le bassin du Congo (Bryne et al., 2023). Les émissions de CH<sub>4</sub> provenant des zones humides tropicales, estimées à l'aide de récupérations satellitaires de XCH<sub>4</sub> à partir de GOSAT et TROPOMI (par exemple, Parker et al., 2018 ; Ma et al., 2021 ; Feng et al., 2022 ; Yu et al., 2023) suggèrent que les émissions des zones humides et aquatiques tropicales ont été sous-estimées par rapport aux inventaires CH<sub>4</sub> au sol (Yu et al., 2023), bien que la prévalence de la couverture nuageuse empêche les extractions par satellite (Ganesan et al., 2019 ; Melack et al., 2022). Les capacités de détection des émissions ponctuelles de méthane à l'aide de données hyperspectrales progressent rapidement (Hulley et al., 2016 ; Růžička et al., 2023), PANGEA étudiera la capacité à détecter les émissions naturelles de méthane à l'aide de ces capteurs ou d'autres capteurs de plus grande fidélité.

**Besoins de validation :** Les résultats de l'inversion du CO<sub>2</sub> par satellite ne sont pas cohérents dans les tropiques. Par exemple, les résultats des inversions atmosphériques de GOSAT et d'OCO-2 ont toujours montré une source importante de carbone dans le nord de l'Afrique tropicale (Palmer et al., 2019), due à des rejets de carbone pendant la saison sèche, lorsque ces satellites ont une couverture sans nuages plus régulière de la région. D'autre part, une étude récente combinant quatre cas de mesures aériennes du CO<sub>2</sub> avec des inversions basées sur des satellites a suggéré que l'Afrique tropicale septentrionale est proche de la neutralité carbone (Gaubert et al., 2023). Ces résultats contradictoires soulignent le besoin urgent de recherches supplémentaires pour résoudre ces divergences.

**Nouvelles perspectives grâce aux satellites :** Les observations des satellites OCO-2/3 et GOSAT ont permis de mieux comprendre les cycles saisonniers et la variabilité interannuelle du cycle du carbone tropical (Lei et al., 2024 ; Philip et al., 2022 ; Liu et al., 2017 ; 2024 ; Wang et al., 2023b). Il est intéressant de noter que le cycle saisonnier de l'ENB au-dessus des tropiques, tel qu'il est déduit

d'OCO-2, présente une amplitude beaucoup plus importante que celle simulée par les modèles biogéochimiques de pointe. Ce résultat suggère que la biosphère terrestre tropicale réagit aux variations climatiques saisonnières de manière plus dynamique qu'on ne le pensait jusqu'à présent (Lei et al., 2024 ; Philip et al., 2020). Les observations satellitaires ont également grandement amélioré la compréhension, au niveau des processus, de la réponse du cycle du carbone tropical à la variabilité climatique interannuelle (Liu et al., 2017 ; 2024 ; Wang et al., 2023b). Par exemple, Wang et al. (2023b) ont montré que la variabilité du stockage total de l'eau était à l'origine de l'hétérogénéité spatiale de la réponse du cycle du carbone de l'Amazonie à la sécheresse de 2015-2016, tandis que la température jouait un rôle plus important en influençant la variabilité du flux de carbone dans l'ensemble de la région tropicale. Une étude récemment publiée (Stinecipher et al., 2022) a montré que les observations par satellite du sulfure de carbonyle (COS) fournissent une contrainte sur la PPB régionale de l'Amazonie cohérente avec d'autres mesures, suggérant qu'une quantification affinée des flux de ce gaz aux échelles locale et régionale pourrait améliorer les estimations de la PPB (Berry et al., 2013).

**Le carbone dans la biomasse végétale vivante :** Les forêts tropicales stockent près de 50 % de la biomasse végétale aérienne totale des écosystèmes terrestres (Santoro et al., 2021). La quantité et le traitement du carbone dans la biomasse sont déterminés par la productivité primaire nette, qui équilibre l'absorption du CO<sub>2</sub> et son émission par les plantes et certains micro-organismes (Bonan 2008). Pour comprendre l'impact du changement climatique et de l'utilisation des terres sur les forêts tropicales, il est essentiel de quantifier la structure et la fonction des forêts tropicales et les interactions entre les plantes et le carbone dans l'atmosphère. La biomasse vivante et la productivité varient énormément dans l'espace et dans le temps au sein des forêts tropicales (Sullivan et al., 2020 ; Xu et al., 2021a ; Muller-Landau et al., 2021 ; Wang et al., 2023a, Sagang et al., 2024a). Les régions à forte pluviométrie abritent généralement des forêts denses et sempervirentes avec d'importants stocks de carbone et des stocks de productivité élevés, tandis que les zones à pluviométrie saisonnière ou plus faible abritent des forêts partiellement ou totalement à feuilles caduques avec des stocks de carbone et une productivité plus faibles, et une plus grande variation saisonnière des flux de carbone (Malhi et al., 2002 ; Bonan 2008 ; Muller-Landau et al., 2021). La température influe également sur le cycle du carbone forestier, à la fois directement et par le biais d'interactions avec la disponibilité de l'eau (Taylor et al., 2017 ; Muller-Landau et al., 2021). Les différences entre les tropiques et au sein des régions tropicales en matière de géomorphologie, de climat, de composition des espèces et de phénologie entraînent des variations des taux de photosynthèse, de productivité ligneuse, de respiration, de mortalité des arbres et de flux de carbone dans les forêts tropicales (Sullivan et al., 2020 ; Muller-Landau et al., 2021 ; Wang et al., 2023a ; Townsend et al., 2008 ; Quesada et al., 2010). La productivité primaire nette augmente généralement avec la fertilité du sol (Quesada et al., 2012), bien qu'il n'y ait pas de relations cohérentes entre la fertilité du sol et la biomasse vivante, probablement parce que le renouvellement augmente et que le temps de résidence des ligneux diminue avec la fertilité du sol (Muller Landau et al., 2021). Malheureusement, les études sur la biomasse et la dynamique du carbone basées sur des mesures au sol ne représentent qu'une fraction minuscule de la superficie des forêts tropicales, un sous-ensemble restreint et biaisé des paysages tropicaux, ce qui soulève des questions quant à la généralisation de ces résultats (Malhi et al., 2014 ; Marvin et al., 2014 ; Schimel et al., 2019 ; Hughes et al., 2021 ; Chapman et al., 2024). Les régimes de perturbation jouent également un rôle crucial dans la dynamique des forêts tropicales, en influençant la mortalité des arbres, le renouvellement de la biomasse et le cycle du carbone, comme indiqué plus en détail à la section 2.5.

**Zones humides tropicales :** Les vastes zones de forêts tropicales qui sont des zones humides inondées en permanence ou de façon saisonnière, qui comprennent des tourbières boisées, des marécages et des plaines d'inondation (Aselmann et Crutzen, 1989), contribuent de façon importante au cycle du carbone mondial. Par exemple, les forêts inondables du fleuve Amazone couvrent jusqu'à 250 000 km<sup>2</sup>, la plupart des zones étant inondées six mois par an (Richey et al., 2002 ; Goulding et al., 2003). La plaine d'inondation de l'Amazone représente la plus grande source naturelle d'émission de CH<sub>4</sub> dans les tropiques et rivalise avec les sources de CH<sub>4</sub> de l'Arctique (Pangala et al., 2017). Outre l'importante source de CH<sub>4</sub> provenant du sol inondé, les tiges des arbres de la plaine inondable de l'Amazone contribuent aux émissions de CH<sub>4</sub> qui, selon les estimations, sont 200 fois plus importantes que celles des forêts humides des zones tempérées (Pangala et al., 2017). Le nombre de mesures et l'étendue de la couverture des flux de CH<sub>4</sub> dans les tropiques sont extrêmement limités par rapport à ceux des régions tempérées et boréales (Johnson et al., 2022 ; Melack et al., 2022 ; Stanley et al., 2023). Les émissions de CH<sub>4</sub> des zones humides des forêts tropicales sont contrôlées par le climat, l'hydrologie, le couvert végétal, la dynamique des perturbations et les pratiques d'utilisation des terres (Parker et al., 2018 ; Ma et al., 2021). Le manque de mesures des flux de carbone dans les zones humides a conduit à une mauvaise quantification des émissions de CH<sub>4</sub> des zones humides tropicales et des systèmes d'eaux intérieures (Ganesan et al., 2019 ; Rosentreter et al., 2021). Les modèles mécanistes existants ont produit de grandes différences dans les émissions tropicales de CH<sub>4</sub> (Melton et al., 2013 ; Bloom et al., 2017) et ne rendent pas compte de la saisonnalité observée du CH<sub>4</sub> dans les régions tropicales dominées par les zones humides forestières (Melack et al., 2022). Cette différence s'explique en grande partie par l'absence de mesures à petite échelle détaillant les facteurs d'émissions des zones humides et aquatiques (Melack et al., 2022) et par le triplement de la couverture des zones humides et des étendues d'inondation appliquées dans les différents modèles (Peng et al., 2022).

**Tourbières tropicales :** Les tourbières tropicales riches en matière organique stockent les réserves de carbone les plus importantes et les plus denses qui sont irrécupérables à l'échelle de temps des décisions humaines (Noon et al., 2021). Les tourbières tropicales stockent environ 100 Pg de C, mais il existe de grandes incertitudes quant à l'étendue spatiale et aux stocks de carbone associés de ces tourbières. Par exemple, les vastes stocks de carbone des tourbières du centre du bassin du Congo et du bassin de l'avant-pays Pastaza-Marañón en Amazonie péruvienne ont été récemment cartographiés et représentent plus d'un tiers du carbone stocké dans les sols tourbeux tropicaux (Dargie et al., 2017 ; Crezee et al., 2022 ; Lahteenoja et al., 2012). D'importantes zones de tourbières non documentées restent probablement à évaluer (Hastie et al., 2024). Le changement d'affectation des terres, par la déforestation ou le drainage, et le changement climatique menacent la capacité de puits de carbone des tourbières tropicales (Page et al., 2022 ; Wang et al., 2018). En Asie du Sud-Est, le drainage extensif des tourbières a transformé les tourbières de cette région en une source de CO<sub>2</sub> équivalente aux émissions régionales de combustibles fossiles (Hoyt et al., 2020). Les incendies de plus en plus étendus et intenses dans les tourbières, en particulier en Asie équatoriale et pendant les années El Niño, sont également devenus une source majeure d'émissions de carbone, d'autres gaz à l'état de traces et de particules dans l'atmosphère (Page et al., 2009 ; Yokelson et al., 2022). Les perturbations anthropiques continuant de menacer les tourbières tropicales (Hastie et al., 2022 ; Page et al., 2022), il est nécessaire de mieux comprendre la répartition, la densité du stock de carbone et les émissions des tourbières tropicales (Roucoux et al., 2017 ; Deshmukh et al., 2021).

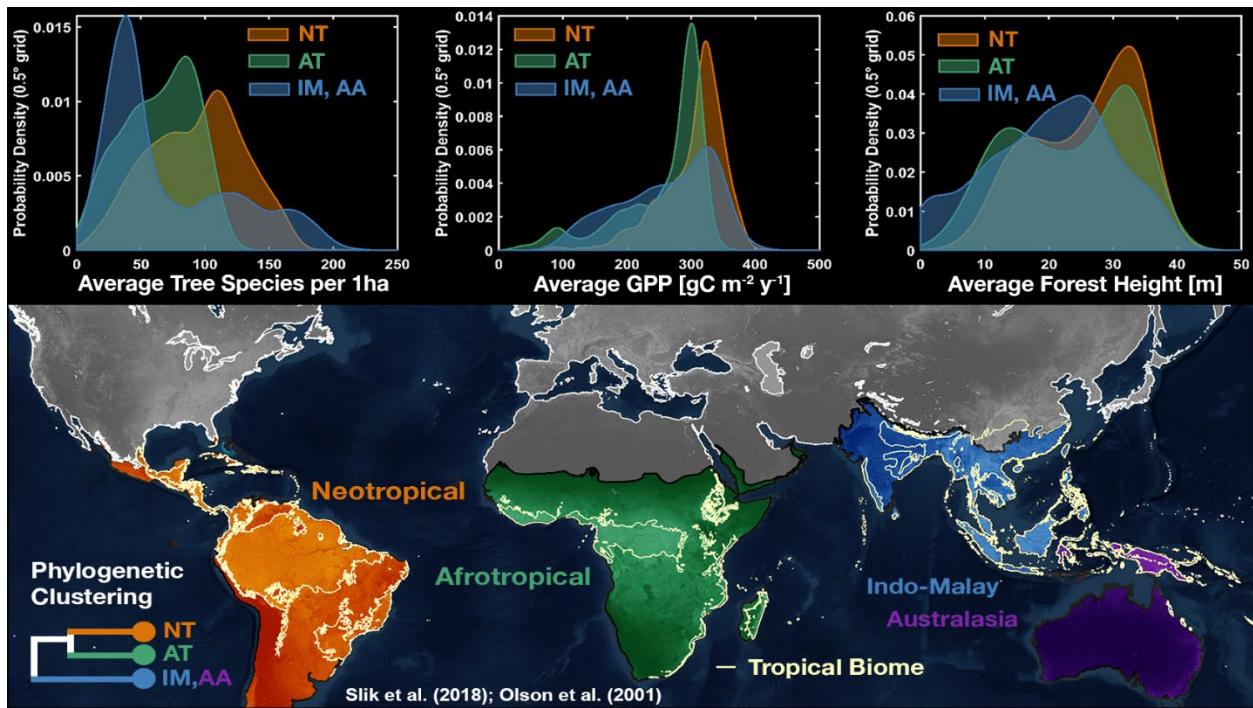
**Cycle des nutriments :** La projection de la productivité future des forêts tropicales repose sur la compréhension des interactions entre la disponibilité des nutriments dans les sols, la composition

fonctionnelle des plantes et l'impact de l'augmentation de la température, des concentrations de CO<sub>2</sub> et des événements extrêmes. La disponibilité généralement faible des éléments nutritifs des sols tropicaux fortement altérés devrait limiter la fertilisation par le CO<sub>2</sub> car davantage d'éléments nutritifs sont fixés dans les tissus végétaux (Fleischer et Terrer, 2022). Le phosphore limitera probablement de moitié environ le potentiel d'augmentation du taux de croissance des forêts en réponse à l'augmentation du CO<sub>2</sub> (Fleischer et al., 2019 ; Braghieri et al., 2022). Alors que le phosphore est largement considéré comme le nutriment le plus limitant dans les forêts tropicales de plaine (par exemple, Cunha et al., 2022), des observations récentes révèlent l'hétérogénéité de la limitation des nutriments dans les forêts tropicales, y compris la limitation et la co-limitation par l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium (Davidson et al., 2004, Wright et al., 2011, Manu et al., 2022). Le potassium joue un rôle essentiel dans la régulation des réponses des plantes à la sécheresse (Manu et al., 2024). Le changement d'affectation des terres peut encore induire une limitation des nutriments en déplaçant de grandes quantités de nutriments (Bauters et al., 2022 ; 2018 ; 2021, Kauffman et al., 1995), ce qui entraîne une redistribution et des pertes de nutriments au niveau local. La télédétection offre des possibilités de saisir l'impact des réserves de nutriments disponibles et des pertes de nutriments dues aux perturbations grâce à l'observation des variations de la chimie foliaire, des traits fonctionnels et de la structure du couvert à grande échelle (Townsend et al., 2008, Chadwick et Asner 2016b ; 2018, Martins et al., 2018).

## 2.2 Biodiversité

*Ce thème scientifique PANGEA étudiera comment la biodiversité tropicale varie dans l'espace et dans le temps à l'échelle locale, régionale et continentale, comment la biodiversité façonne la fonction des écosystèmes et réagit aux changements climatiques et anthropiques, et comment elle contribue ainsi à l'hétérogénéité de la résilience des forêts et se répercute sur le climat mondial et les systèmes socio-écologiques.*

**Biodiversité tropicale :** La biodiversité est la variabilité de tous les organismes vivants et écosystèmes, y compris la diversité taxonomique, phylogénétique, fonctionnelle et génétique au sein des espèces et entre elles, ainsi qu'au sein des sites et entre eux. Les forêts tropicales sont les biomes les plus riches en biodiversité de la planète selon toutes ces mesures et abritent plus de la moitié des espèces décrites sur Terre (Lewis et al., 2015 ; Barlow et al., 2018 ; Dinerstein et al., 2017 ; Pillay et al., 2022). Le nombre total élevé d'espèces que l'on trouve dans les forêts tropicales (diversité gamma élevée) reflète à la fois un nombre extraordinaire d'espèces au sein des sites (diversité alpha) et un renouvellement important des espèces entre les sites (diversité bêta) (Condit et al., 2002 ; Basset et al., 2012 ; Jenkins et al., 2013 ; Slik et al., 2015). À petite échelle, la variation de la composition de la biodiversité végétale d'un site à l'autre reflète largement le filtrage et la stochasticité de l'environnement (Condit et al., 2002 ; Fyllas et al., 2009 ; Condit et al., 2013 ; Asner et al., 2014a ; Chadwick et Asner 2018). Les histoires évolutives divergentes des différents continents tropicaux ont donné lieu à des assemblages d'espèces et à des compositions phylogénétiques très différents (Slik et al., 2018 ; **figure 12**). La grande diversité taxonomique et phylogénétique des forêts tropicales s'accompagne d'une grande diversité fonctionnelle, les espèces présentant un large éventail de stratégies d'histoire de vie, de traits fonctionnels et de réponses environnementales (Fyllas et al., 2009 ; Condit et al., 2013 ; Slot et Winter 2017 ; Rüger et al., 2018 ; Homeier et al., 2021 ; Bialic-Murphy et al., 2024).

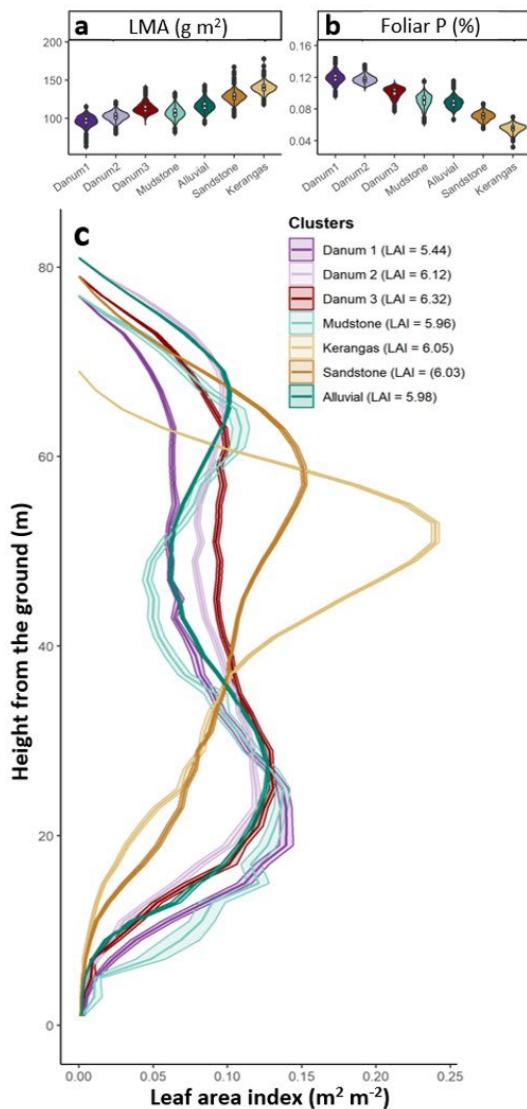


**Figure 12.** Les forêts tropicales varient fortement en termes de structure (hauteur), de fonction (GPP) et de diversité au sein des principales régions floristiques et entre elles (couleurs cartographiées), façonnant ainsi les réponses aux changements climatiques et d'utilisation des terres. La luminosité de chaque couleur indique la PPB cartographiée. Source : Cavender-Bares et al : Cavender-Bares et al. (2022).

**Diversité fonctionnelle, structurelle et des espèces :** La biodiversité tropicale est d'une importance cruciale pour le fonctionnement des écosystèmes tropicaux et leurs rétroactions sur le système terrestre (Cardinale et al., 2012 ; Dirzo et al., 2014 ; Sakschewski et al., 2016 ; Berzaghi et al., 2018 ; Schmitt et al., 2020). Les espèces présentes dans une zone, ainsi que leurs caractéristiques et leur abondance, ont une incidence sur la structure, la fonction et la résilience des forêts, ainsi que sur les interactions avec le climat local et mondial et les systèmes socio-écologiques (par exemple, Dirzo et al., 2014 ; Del-Claro et Dirzo, 2021). La grande variation de la structure et de la fonction des écosystèmes dans les forêts tropicales est étroitement liée à la variation de la biodiversité, reflétant non seulement les influences des facteurs environnementaux abiotiques sur la biodiversité, la structure et la fonction, mais aussi leurs interactions complexes (Muller-Landau et al., 2021). La composition des espèces et des fonctions des plantes ligneuses, qui constituent la majeure partie de la biomasse aérienne, est particulièrement importante pour façonner la structure et la fonction des forêts, qui à son tour affecte les microclimats, l'habitat et les ressources alimentaires pour les animaux et les microbes. Il est essentiel de comprendre les interactions entre la diversité fonctionnelle et structurelle,

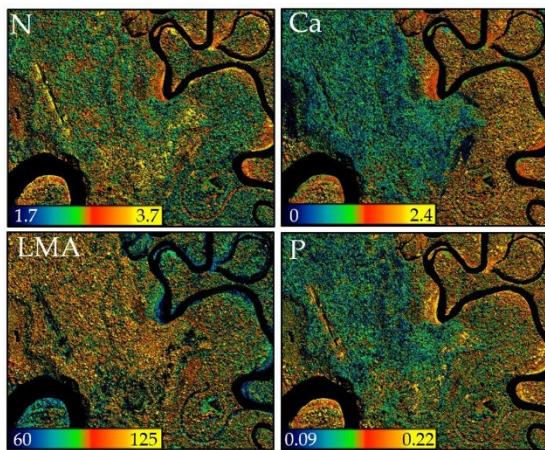
la diversité des espèces et la dynamique du cycle du carbone, étant donné les incertitudes qui entourent la question de savoir si les forêts tropicales survivront et resteront un puits de carbone tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle (Arora et al., 2020 ; Brienen et al., 2015 ; Hubau et al., 2020 ; Sabatini et al., 2019). Une biodiversité fonctionnelle élevée crée une plus grande stabilité et résilience des écosystèmes, ce qui peut contribuer à atténuer les effets négatifs du changement climatique (Sakschewski et al., 2016 ; Longo et al., 2018 ; Schmitt et al., 2020). L'évolution des régimes climatiques pourrait réduire la biodiversité, ce qui pourrait avoir une incidence sur le climat en raison de la diminution du piégeage du carbone (Thomas et al., 2004 ; Cavanaugh et al., 2014). Van der Plas (2019) a passé en revue 258 études portant sur des communautés naturellement assemblées et a

constaté que, si la plupart des études se concentraient sur les effets de la diversité taxonomique, les mesures de la diversité fonctionnelle étaient généralement de meilleurs prédicteurs du fonctionnement de l'écosystème. Bien que les tropiques abritent une immense diversité d'espèces botaniques, l'abondance de la plupart des espèces est faible. Les données des parcelles d'inventaire forestier révèlent que seulement 2 % des espèces des Amériques (174 espèces), de l'Afrique (77 espèces) et de l'Asie du Sud-Est (172 espèces) représentent 50 % des arbres tropicaux de ces continents (Cooper et al., 2024). La caractérisation de la diversité fonctionnelle de ces espèces hyperdominantes et de leurs interactions avec d'autres taxons est réalisable et entre dans le cadre de PANGEA.



**Figure 13.** Variation de la masse foliaire par surface (LMA), du phosphore foliaire (P) et de l'indice vertical de surface foliaire (LAI) dans sept types de forêts fonctionnellement distincts cartographiés à l'aide de données VSWIR et lidar aéroportées dans les forêts tropicales de Malaisie (Ordway et al., 2022).

**Variabilité des caractéristiques des plantes ligneuses et compromis :** La distribution des traits fonctionnels des plantes ligneuses est une manifestation importante de la biodiversité tropicale qui affecte la structure et la fonction des forêts (Li et Prentice, 2024). Les co-variations importantes entre les traits comprennent la stature, les axes rapides et lents du cycle biologique des plantes, et les stratégies d'autoportance par rapport aux stratégies d'escalade pour atteindre la canopée. La stature des adultes va de petits arbustes à des arbres émergents géants au-dessus de la canopée principale (Rüger et al., 2018 ; Maynard et al., 2022). La structure verticale de la forêt varie en fonction de la fonction de l'écosystème, même si les mesures intégrées verticalement, telles que l'indice de surface foliaire (LAI), ne le font pas (**figure 13**) (Ordway et al., 2022). L'axe rapide-lent fait référence aux espèces végétales ayant une acquisition et un traitement rapides des ressources (en particulier en termes d'efficacité d'utilisation des nutriments), une croissance rapide, des besoins élevés en ressources, des taux de mortalité élevés et une faible tolérance à l'ombre, par opposition



**Figure 14.** Variation à l'échelle du paysage de l'azote (N), du calcium (Ca), de la masse foliaire par surface (LMA) et du phosphore (P) en Amazonie péruvienne. Exemple de cartes de traits créées à partir de données de spectroscopie d'imagerie VSWIR tirées de (Chadwick & Asner, 2016). Il n'existe pas de données de ce type pour l'Afrique centrale.

aux espèces ayant une acquisition et un traitement lents des ressources, une croissance lente, des besoins faibles en ressources, des taux de mortalité faibles et une tolérance élevée à l'ombre (Reich 2014 ; Rüger et al., 2018). La variation de la composition fonctionnelle entre les écosystèmes est donc liée à l'état de la succession forestière, à la productivité ligneuse et au temps de résidence ligneuse. Des recherches antérieures ont montré que les distributions de traits associés au bois, aux feuilles et à la reproduction peuvent être presque orthogonales entre les espèces forestières tropicales (Baraloto et al., 2010 ; Fortunel et al., 2012). Néanmoins, l'axe rapide-lent englobe toujours la variation des traits foliaires tels que la masse foliaire par surface (LMA) et la teneur en nutriments des feuilles (par exemple, l'azote, le phosphore et le calcium). La teneur en nutriments des feuilles et la LMA peuvent être capturées par télédétection hyperspectrale, ce qui permet de quantifier à distance cette dimension de la composition fonctionnelle des plantes (**figure 14**)

(Asner et al., 2017 ; Chadwick et Asner 2016a). Des travaux récents ont également exploré les tendances en matière de diversité fonctionnelle et de redondance dans les forêts tropicales à l'aide de l'imagerie multispectrale (Aguirre-Gutiérrez et al., 2022).

**Lianes, palmiers et bambous :** Bien que la plupart des recherches sur les forêts tropicales se concentrent sur les arbres, d'autres formes de vie végétale telles que les lianes, les palmiers et les bambous ont un impact significatif sur le fonctionnement de l'écosystème, la succession et la réponse aux perturbations. Par exemple, les lianes (lianes ligneuses) sont des parasites structurels qui réduisent la croissance des arbres et augmentent leur mortalité par le biais de la concurrence, modifiant ainsi la structure et la fonction des forêts, ainsi que les stocks de carbone (van der Heijden et al., 2013 ; Muller-Landau et Pacala 2020 ; Estrada-Villegas et al., 2022). L'abondance des lianes varie considérablement d'une forêt tropicale à l'autre en fonction du climat, de l'historique des perturbations et d'autres facteurs (Dewalt et al., 2015), et elle augmente en moyenne (Phillips et al., 2002 ; Schnitzer et Bongers 2011, Rueda-Trujillo et al., 2024). Des recherches antérieures suggèrent que les lianes peuvent être vulnérables aux sécheresses (Nepstad et al., 2007 ; Meunier et al., 2021) et qu'elles sont favorisées par l'augmentation des taux de perturbation (Schnitzer et Bongers 2011, Schnitzer et al., 2021), tandis que l'augmentation de la croissance des arbres a été liée à l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> (Phillips et al., 2009, Brien et al., 2015). Les palmiers constituent un clade abondant dans les forêts tropicales humides (ter Steege et al., 2013), et plusieurs espèces sont culturellement et économiquement importantes (Laureto et Cianciaruso 2017). La répartition des palmiers dans les forêts tropicales dépend fortement du climat et des conditions édaphiques (Emilio et al., 2014 ; Muscarella et al., 2020). La forte résistance des palmiers aux dommages causés par le vent lors des tempêtes tropicales affecte le rétablissement des forêts après les perturbations (Uriarte et al., 2019 ; Zhang et al., 2022). Les différences intercontinentales dans l'abondance des palmiers sont marquées, les palmiers arborescents étant omniprésents dans les Amériques, alors qu'ils sont rares

par rapport aux palmiers de sous-étage et aux palmiers grimpants en Afrique (Muscarella et al., 2020). Les bambous sont des herbes hautes présentes dans un large éventail d'habitats sous les tropiques (Fadrique et al., 2020). Leur taux de croissance rapide, associé à la reproduction clonale, permet aux bambous de dominer de vastes étendues de terre, ce qui peut arrêter la succession forestière et réduire considérablement l'accumulation de carbone dans les forêts (Griscom et Ashton 2003 ; Lima et al., 2012), et ils peuvent également devenir envahissants là où ils sont introduits (Montti et al., 2014). Les bambous sont largement récoltés dans les forêts tropicales pour des raisons économiques, ce qui peut avoir un impact sur la faune locale qui dépend des forêts de bambous pour son alimentation (Sheil et al., 2012). Les lianes, les palmiers et les bambous diffèrent des arbres par leurs caractéristiques foliaires et leur architecture végétale, ce qui permet de quantifier leur abondance grâce à la télédétection multispectrale, hyperspectrale et lidar (de Carvalho et al., 2013 ; Dalagnol et al., 2022 ; van der Heijden et al., 2022).

**Phénologie des feuilles :** Les plantes tropicales présentent diverses stratégies phénologiques foliaires, allant du feuillage persistant au feuillage caduc, avec des variations dans la durée, le moment, l'exhaustivité de la caducité et le caractère obligatoire ou facultatif de la caducité (Borchert, 1994 ; Eamus, 1999 ; Kushwaha et Singh, 2005 ; Williams et al., 2008 ; Kearsley et al., 2024). La forte demande en carbone nécessaire à la poussée des nouvelles feuilles signifie que la plupart des espèces à feuilles caduques et sèches des tropiques ont des feuilles plus fines pour réduire les coûts de construction, et une forte demande en nutriments pour augmenter la capacité photosynthétique pendant les saisons de croissance plus courtes (Eamus et Prior, 2001 ; Oliveira et al., 2021a). La durée de vie des feuilles et le calendrier saisonnier de production des feuilles sont également des facteurs importants pour les espèces à feuilles persistantes et à feuilles caduques, avec des implications pour la variation saisonnière de la qualité des feuilles et de la capacité photosynthétique (Wu et al., 2016 ; Lopes et al., 2016 ; Wu et al., 2017a,b ; Albert et al., 2018). L'abondance relative des différentes stratégies phénologiques varie systématiquement entre les forêts tropicales en fonction du climat, de la géomorphologie, des sols et d'autres facteurs (Condit et al., 2000) et contribue de manière importante à la forte variation de la phénologie des feuilles et de la reproduction entre les sites au niveau du peuplement (Bohlman, 2010 ; Guan et al., 2015 ; Fisher et al., 2020 ; Fadrique et al., 2021 ; Yang et al., 2021b). La phénologie des feuilles varie aussi considérablement d'une année à l'autre au sein d'un même site, ce qui contribue à la variation interannuelle de la fonction forestière (Pau et al., 2010 ; Detto et al., 2018 ; Lamjiak et al., 2021). Les facteurs climatiques de la phénologie des feuilles comprennent la disponibilité de l'eau et la lumière. De nombreux arbres, espèces et peuplements tropicaux verdissent aux périodes de l'année où ils reçoivent le plus de lumière (moins de nuages), même lorsque l'augmentation de la lumière s'accompagne de conditions plus sèches (Wright et van Schaik, 1994 ; Lopes et al., 2016 ; Wagner et al., 2017 ; Li et al., 2021). Les changements climatiques à long terme, en particulier dans les régions où les saisons sèches s'allongent, peuvent accroître l'avantage concurrentiel et l'abondance des espèces à feuilles caduques et sèches (Vico et al., 2017 ; Aguirre-Gutiérrez, 2019).

**Animaux et microbes :** Les animaux et les microbes déterminent également la fonction des écosystèmes et sont influencés par les changements environnementaux mondiaux de manière conséquente. Les animaux et les microbes contribuent à des services essentiels tels que la pollinisation, la dispersion des graines et le cycle des nutriments, et façonnent la biodiversité végétale, ainsi que la structure et la fonction des forêts, par le biais de ces interactions mutualistes. Les interactions entre les plantes et les animaux peuvent également être antagonistes, par exemple par le biais de l'herbivorie et des maladies (Dirzo et al., 2014). La mégafaune comme les éléphants de forêt

(*Loxodonta cyclotis*) - que l'on trouve aujourd'hui en Afrique, mais pas en Amérique - a des effets particulièrement importants sur la structure et la fonction des forêts en raison du broutage et des perturbations physiques. Les éléphants contribuent également à la redistribution des nutriments et à la dispersion des grosses graines, ce qui se traduit par une plus grande abondance d'espèces d'arbres à forte densité de bois dans le paysage (Berzaghi et al., 2018 ; 2019 ; Campos-Arceiz et Blake, 2011). Il a été démontré que les exclos expérimentaux pour vertébrés augmentent la densité des plantes du sous-étage et l'abondance des semis (Beck et al., 2013a ; Camargo-Sanabria et al., 2015 ; Kurten et Carson, 2015). Une grande majorité des espèces d'arbres tropicaux et environ la moitié des espèces de lianes dépendent des vertébrés pour la dispersion des graines, la plupart des espèces restantes dépendant du vent (Muller-Landau et Hardesty, 2005). La défaune des forêts tropicales par la chasse et d'autres activités humaines menace donc directement la régénération des plantes et peut modifier la composition des espèces végétales et la dynamique du cycle du carbone (Wunderly, 1997 ; Estrada-Villegas et al., 2023). La défaune peut finalement conduire à une diminution des stocks de carbone forestier (Brodie et Gibbs, 2009 ; Jansen et al., 2010 ; Bello et al., 2015 ; Osturi et al., 2016 ; Peres et al., 2016). Sur certains sites du Panama, par exemple, l'augmentation de la défaune a été associée à des changements dans la composition des communautés d'espèces dans la couche de semis, avec notamment plus d'espèces dispersées par le vent et l'eau et plus de lianes (Wright et al., 2007 ; Kurten et al., 2015).

## 2.3 Interactions et rétroactions climatiques

*Ce thème scientifique PANGEA étudiera les rétroactions et les interactions complexes entre les forêts tropicales et le système climatique, ainsi que la manière dont les changements dans ces processus influenceront la dynamique future des puits et des sources de carbone dans les forêts tropicales.*

**Interactions entre la terre et l'atmosphère :** Les interactions entre la terre et l'atmosphère dans les forêts tropicales modulent le temps et le climat à l'échelle locale et régionale. Les plantes recyclent les précipitations par évapotranspiration et influencent le début et le calendrier des saisons des pluies (Wright et al., 2017 ; Sori et al., 2022 ; Worden et al., 2021a ; van der Ent et al., 2010 ; Staal et al., 2018 ; Dirmeyer et al., 2009, Zemp et al., 2017 ; Nyasulu et al., 2024). Par l'émission de composés organiques volatils biogènes, les plantes influencent la formation des nuages, l'albédo et la disponibilité de la lumière pour la végétation (Artaxo et al., 2022). Les couverts forestiers régulent également l'albédo, les flux de chaleur latente et sensible, ainsi que la rugosité, qui entraînent des rétroactions climatiques biophysiques (Bonan, 2008 ; Chen et al., 2020 ; Lee et al., 2011). En outre, les bilans énergétiques et hydriques dépendent de l'humidité du sol, contrôlée par les racines, la texture du sol et la géomorphologie (Fan et al., 2017 ; Seneviratne et al., 2010 ; Zhou et al., 2021).

**Effets du temps et du climat sur les forêts tropicales :** Les systèmes convectifs à méso-échelle fournissent une grande partie des précipitations en Afrique centrale et en Amazonie (Andrews et al., 2024 ; Rehbein et al., 2017 ; Negrón-Juarez et al., 2024). Les tempêtes, à leur tour, affectent la structure forestière et la mortalité des arbres via le chablis (par exemple, Negrón-Juárez et al., 2018 ; Feng et al., 2023a), ainsi que le fonctionnement des écosystèmes, y compris les processus qui influencent la prévalence des espèces résistantes aux tempêtes (Uriarte et al., 2019 ; Liu et al., 2017). Les forêts de plaine se sont adaptées à la submersion et à l'engorgement, car les précipitations provoquent des cycles d'inondation (Alsdorf et al., 2016 ; Hawes et Peres, 2016), qui peuvent réduire la disponibilité en oxygène, la photosynthèse et la conductance de l'eau (Parolin et al., 2004 ; Parolin et al., 2016 ; Hawes et Peres, 2016). Les inondations entraînent également une augmentation de la

production de CH<sub>4</sub> par les micro-organismes. Les précipitations affectent également les cycles des nutriments par le dépôt humide de nutriments tels que l'azote (Bauters et al., 2018, 2021), la photosynthèse et la reproduction par la couverture nuageuse et le brouillard (Philippon et al., 2019 ; Pohl et al., 2021), et l'évapotranspiration par le dépôt de rosée (par exemple, Gerlein-Safdi et al., 2018 ; Binks et al., 2019).

**Facteurs de la variabilité interannuelle du climat :** Le climat tropical est directement impacté par la variation de la température de surface de la mer (SST), qui contrôle le transport d'énergie transéquatorial (Cook et Vizy 2015 ; Zhou et al., 2019) et affecte les régimes de précipitations via des changements dans la zone de convergence intertropicale (ITCZ ; Schneider et al., 2014, Byrne et al., 2018), les moussons (Cook et Vizy 2019) et les systèmes dynamiques à l'échelle régionale (Cook et Vizy 2019 ; Creese et al., 2019 ; Montini et al., 2019). Des phénomènes tels que l'oscillation australe El Niño (ENSO), l'oscillation de Madden-Julian, le dipôle de l'océan Indien et la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique contribuent à la variabilité interannuelle de la convection tropicale (Raghavendra et al., 2020 ; Dias et al., 2017 ; Gu et Adler 2018). Les différentes phases de ces phénomènes sont fortement associées à des sécheresses (Marengo et al., 2016 ; Ndehedehe et al., 2018 ; Jiménez-Muñoz et al., 2016), à des saisons sèches plus longues (Jiang et al., 2019 ; Staal et al., 2020), ainsi qu'à des déplacements de la saison des pluies et à l'intensification des tempêtes (Taylor et al., 2018 ; Rehbein et Ambrizzi, 2023 ; Balaguru et al., 2018). Les réactions aux changements climatiques varient d'une région à l'autre. Les forêts africaines semblent moins vulnérables aux sécheresses que les forêts amazoniennes (Tao et al., 2022 ; Asefi-Najafabady et Saatchi 2013 ; Saatchi et al., 2012 ; Bennett et al., 2021), et les forêts tropicales plus humides font preuve de résilience face aux changements climatiques (Bennett et al., 2023), bien que les conséquences de conditions plus sèches ou plus variables restent inconnues.

**Les perturbations anthropiques ont un impact sur le temps et le climat :** Les activités humaines, sous la forme de déboisement, d'agriculture, d'élevage et d'incendies, interagissent avec le changement climatique pour exercer d'importantes rétroactions sur les cycles hydrologiques terrestres (Li et al., 2022 ; Li et al., 2024). Il s'agit notamment de changements à la surface, tels que le débit des rivières et les inondations (Ndehedehe et al., 2022 ; Bogning et al., 2022 ; Oliveira et al., 2021b), ainsi que de changements dans le développement convectif ou dans les conditions dynamiques et thermodynamiques de la couche limite atmosphérique (Taylor et al., 2022 ; Commar et al., 2023 ; Sierra et al., 2023 ; Wright et al., 2017 ; Leite-Filho et al., 2019 ; Jiang et al., 2019). Les modifications de cette dynamique atmosphérique entraînent des changements dans l'activité des tempêtes tropicales, qui a augmenté de 5 à 25 % par décennie au cours des cinquante dernières années et qui semble devoir se poursuivre à l'avenir (Taylor et al., 2018 ; Raghavendra et al., 2018 ; Lavigne et al., 2019 ; Harel et Price, 2020). Parallèlement à l'augmentation de l'activité orageuse, les forêts tropicales connaissent des saisons sèches plus longues, un stress hydrique atmosphérique plus important et des sécheresses plus fréquentes (Fang et al., 2022 ; Boiser et al., 2015 ; Duffy et al., 2015 ; Trenberth et al., 2014). La déforestation et la dégradation des forêts augmentent le réchauffement de la surface du sol en raison de la diminution du refroidissement par évaporation (Devaraju et al., 2018 ; Li et al., 2015), l'ampleur de cet effet étant influencée par la quantité de couverture forestière perdue (Alkama et Cescatti, 2016). Des températures plus élevées peuvent ensuite accroître la respiration des arbres, ce qui réduit la PPN et modifie le cycle du carbone dans les forêts tropicales (Choury et al., 2022 ; Das et al., 2023 ; Liu et al., 2017 ; Lloyd et al., 2023). La déforestation et la dégradation peuvent augmenter le débit des cours d'eau et avoir un impact sur la qualité de l'eau en raison des flux de sédiments (Levy et al., 2018), ainsi qu'augmenter le flux de chaleur sensible et diminuer l'évapotranspiration et

l'infiltration (Costa et al., 2003 ; Souza-Filho et al., 2016 ; Longo et al., 2020 ; de Oliveira et al., 2021 ; Rangel-Pinagé et al., 2023). La couverture terrestre et le changement d'affectation des terres peuvent affecter les régimes de précipitations en modifiant l'hétérogénéité de la surface et en influençant les flux d'humidité et de chaleur en aval (Mahmood et al., 2014 ; Snyder, 2010) et les cycles de nutriments transcontinentaux (Li et al., 2021 ; Barkley et al., 2019). En outre, la combustion de la biomasse génère des aérosols qui influent sur la formation et la dynamique des nuages (Liu et al., 2020 ; Zhang et al., 2008 ; Chaboureau et al., 2022 ; Tosca et al., 2015).

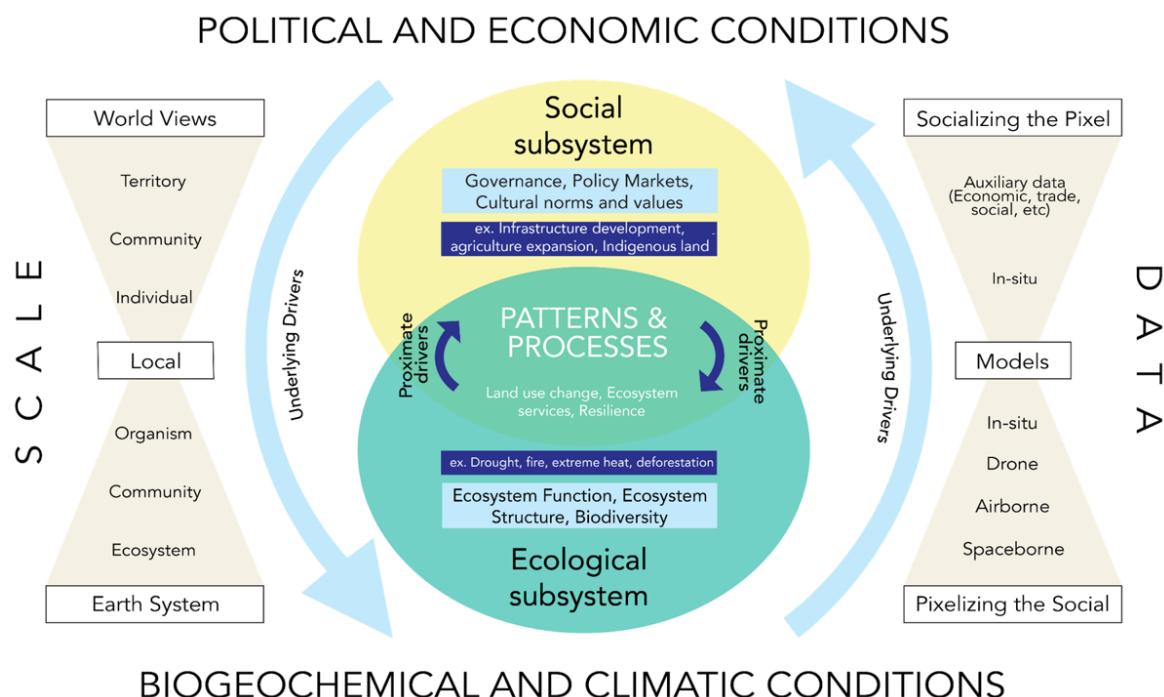
**Transitions critiques des forêts tropicales induites par le climat :** Avec l'apparition de nouveaux régimes climatiques, les forêts tropicales pourraient passer à des écosystèmes alternatifs à couvert ouvert (Hirota et al., 2011 ; Flores et al., 2024). Toutefois, la sensibilité de la végétation diffère d'un continent tropical à l'autre, et des interactions complexes avec d'autres changements, tels que l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, peuvent modifier la réponse de la végétation (Zhang et al., 2015 ; Bartlett et al., 2019). Par exemple, les forêts africaines, en particulier celles d'Afrique de l'Ouest, sont souvent exposées à des températures plus élevées que les forêts tropicales relativement plus fraîches et plus humides d'Asie du Sud-Est et peuvent donc être mieux adaptées au stress thermique (Malhi et al., 2013). Toutefois, cette adaptation peut se faire au prix d'un fonctionnement des forêts d'Afrique de l'Ouest plus proche de leur température critique ou de leurs seuils hydrauliques. En fin de compte, le dépassement des seuils climatiques historiques dans les tropiques pourrait conduire à des changements futurs vers des états de végétation alternatifs qui ne soutiennent pas les services écosystémiques contemporains des forêts tropicales (Aguirre-Gutiérrez et al., 2020 ; Flores et al., 2024 ; Nobre et al., 2016 ; Scheffer et al., 2001).

**Effets de rétroaction climat-biosphère sur les ressources en eau douce :** Les forêts tropicales de la planète abritent également un vaste réseau de rivières et de ruisseaux, dont deux des plus grands bassins fluviaux, l'Amazone et le Congo (Dai et Trenberth, 2002). Cependant, les changements de température et de régime des précipitations, ainsi que l'expansion de la déforestation et de la dégradation des forêts, modifient les cycles hydrologiques dans ces deux régions. Alors que la diminution des précipitations réduit l'apport brut d'eau douce au sommet des canopées, la déforestation et la dégradation des forêts peuvent augmenter l'apport d'eau douce aux rivières grâce à la combinaison de précipitations plus importantes et d'une évapotranspiration plus faible (Davidson et al., 2012). Dans le cas du bassin du fleuve Amazone, des études antérieures indiquent que l'effet net du changement climatique et de la déforestation est spatialement hétérogène, avec des réductions du débit des rivières dans les sous-bassins où les précipitations diminuent fortement ou où les taux de déforestation sont modestes, et des augmentations dans les zones fortement touchées par la déforestation (Coe et al., 2011 ; Lima et al., 2014 ; Arias et al., 2018). La modification des cycles hydrologiques dans les systèmes d'eau douce a également une incidence sur l'ampleur et la durée des inondations saisonnières dans les bassins fluviaux, ce qui a un impact supplémentaire sur les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> (Hamilton, 2010 ; Alsdorf et al., 2016). En outre, les modifications du couvert forestier ont des effets importants sur la qualité de l'eau, tels que des changements dans la concentration d'azote et de phosphore, le pH de l'eau, la disponibilité de l'oxygène et la transparence (Neill et al., 2001 ; Ríos-Villamizar et al., 2017). Ces effets, combinés aux changements de température dus au climat et aux pertes de couvert végétal, peuvent avoir un impact significatif sur les habitats d'eau douce et les communautés fluviales végétales, algales et animales (Lorion et Kennedy, 2009 ; Castello et Macedo, 2016 ; Taniwaki et al., 2017 ; Zeni et al., 2019).

## 2.4 Systèmes socio-écologiques

*Ce thème scientifique PANGEA étudiera les interactions et les rétroactions entre les systèmes sociaux et écologiques liés à la production et à la sécurité alimentaires, aux pratiques culturelles, aux moyens de subsistance, aux stratégies de gestion et à la résilience des systèmes tropicaux.*

**Systèmes socio-écologiques :** Pour comprendre pleinement la complexité des systèmes socio-écologiques (SES) des forêts tropicales et la manière dont ils sont affectés par le changement global, PANGEA adopte une approche systémique qui met l'accent sur les rétroactions et les interactions qui existent entre les populations, le climat et l'environnement (Figure 15). La recherche sur les SES a évolué au cours des dernières décennies pour comprendre et modéliser les relations entre et au sein des systèmes sociaux et écologiques, couvrant le cadre des moyens de subsistance durables (Scoones 1998), les sous-systèmes et les interactions des SES (Ostrom 2009), la résilience des SES (Folke 2006), la robustesse des SES (Andries et al., 2004), les systèmes couplés homme-nature (Liu et al., 2007), la socionature (Swyngedouw 1999), les services écosystémiques (Costanza et al., 2017 ; Daily et al., 1997), les contributions de la nature aux personnes (Díaz et al., 2018 ; Pascual et al., 2017) et les cobénéfices sociaux-écologiques (Levis et al., 2024). Bien que ces cadres puissent différer dans leurs définitions (Colding et Barthel, 2019), ils convergent sur des principes et des variables clés qui décrivent le système socio-écologique, y compris un accent central sur les interactions et les rétroactions qui peuvent faciliter ou entraver le changement dans le SES. La perspective des SES est particulièrement importante dans les tropiques où les terres et les forêts sont fortement sollicitées pour répondre aux besoins de sécurité alimentaire et de production, aux objectifs de conservation et de biodiversité, et pour soutenir les moyens de subsistance et le développement au niveau local. Il est



**Figure 15.** L'approche de PANGEA en matière de SES permettra de relier les facteurs de changement immédiats et sous-jacents dans les systèmes sociaux et écologiques à toutes les échelles afin de comprendre comment les interactions dans les SES ont un impact sur la vulnérabilité et la résilience des forêts tropicales.

nécessaire de comprendre les impacts sociaux et écologiques de ces compromis et les rétroactions qui les façonnent pour développer une compréhension globale des forces qui façonnent la vulnérabilité et la résilience des forêts tropicales et pour guider des stratégies d'adaptation et de gestion efficaces et sensibles à la culture.

**Modèles et facteurs de changement d'utilisation des terres :** Sous les tropiques, des moteurs et des modèles de changement d'affectation des terres distincts selon les régions, notamment la déforestation, la dégradation et la régénération des forêts, peuvent avoir un impact sur la résilience du puits de carbone tropical (Saatchi et al., 2021 ; Hubau et al., 2020). En Amazonie et en Asie du Sud-Est, la déforestation et la dégradation sont principalement dues à l'expansion de l'agriculture à grande échelle, axée sur les produits de base, pour répondre à la demande des marchés nationaux et internationaux (Curtis et al., 2018 ; Haddad et al., 2024). Plus précisément, en Amazonie, le changement d'affectation des terres est principalement dû à l'expansion des pâturages pour le bétail et à la production industrielle de soja (Barlow et al., 2018 ; Londres et al., 2023). La culture du soja et l'élevage bovin modifient les cycles biogéochimiques (par exemple, l'azote et le phosphore), les régimes hydrologiques et les régimes d'incendie, et sont l'une des principales causes de la déforestation (MapBiomas, 2023). En Asie du Sud-Est, où les grandes plantations s'étendent rapidement au détriment des forêts primaires et des tourbières, le changement d'affectation des terres est largement motivé par la demande mondiale d'huile de palme (Koh et Wilcove, 2008). En 2020, on estime que l'expansion du palmier à huile contribuera à hauteur de 20 % aux émissions de carbone de la région (Carlson et al., 2013). Il a été démontré que l'amélioration des moyens de subsistance des petits exploitants grâce à l'expansion du palmier à huile en Indonésie entraînait des compromis directs avec la fonction des écosystèmes (Clough et al., 2016). Contrairement à l'Amazonie et à l'Asie du Sud-Est, la majorité des changements d'affectation des terres dans le bassin du Congo se font à petite échelle et sont motivés par l'expansion de l'agriculture de subsistance et de l'agriculture de produits hyper locaux (Tyukavina et al., 2018). La demande persistante de cacao et de bois continue de façonner les changements d'affectation des terres en Afrique tropicale, bien que les changements d'affectation des terres à petite échelle et de subsistance jouent toujours un rôle prépondérant dans la conduite des changements d'affectation des terres (Hosonuma et al., 2012, Kamath et al., 2024 ; Fuller et al., 2019). Par exemple, alors que les cultures de produits de base comme le palmier à huile se développent dans toute l'Afrique tropicale depuis les années 1990, cette expansion est liée à la demande intérieure et satisfaite par les petits exploitants et les systèmes de marché informels (Ordway et al., 2017a ; Ordway et al., 2017b). La mesure dans laquelle ces différentes échelles, intensités et formes de changement d'affectation des terres entre les continents tropicaux ont un impact sur des trajectoires distinctes de la biodiversité et du cycle du carbone reste toutefois mal comprise.

**Interactions en retour :** Dans les systèmes socio-écologiques tropicaux, les rétroactions entre les populations et le système terrestre jouent un rôle essentiel dans le maintien de la résilience et l'orientation de la trajectoire de ces systèmes intégrés (Dearing et al., 2010). La dynamique des systèmes socio-écologiques dans les forêts tropicales implique des rétroactions avec une combinaison de forces proches et sous-jacentes, y compris les incitations politiques et/ou basées sur le marché, les cadres réglementaires, l'accès ou les barrières à l'information et aux ressources, et les liens de longue date entre les communautés locales, les peuples indigènes et les écosystèmes forestiers (Geist et Lambin, 2002, Lambin et al., 2003). Ces facteurs façonnent non seulement la dynamique écologique, notamment les cycles du carbone et de l'eau, les interactions entre les plantes et les animaux et les systèmes météorologiques et climatiques, mais aussi le sous-système social (**figure 15**), notamment la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance locaux (Sonwa et al., 2012 ; Flores et al., 2024). En

outre, les facteurs de changement façonnent les rétroactions et les interactions entre les sous-systèmes sociaux et écologiques, par le biais de changements, par exemple, dans l'utilisation et la couverture des terres, la résilience des écosystèmes et les régimes d'incendie (Whitfield et al., 2019 ; Gatti et al., 2023). Les rétroactions entre l'homme et les forêts tropicales sont étroitement liées à la fourniture de services écosystémiques et aux activités de conservation et de gestion, où, par exemple, la collecte de produits forestiers non ligneux tels que les graines, les feuilles, les fruits et les racines peut jouer un rôle important dans le soutien des moyens de subsistance et des cultures des communautés forestières tropicales. Si ces interactions se produisent sous les tropiques, les conditions politiques, économiques, culturelles et de gestion propres à chaque région influencent la réponse, la résilience et l'adaptation des forêts tropicales et des communautés locales à la dynamique du changement mondial (Saatchi et al., 2021 ; Geist et Lambin, 2002 ; Turner, 2014).

**Impacts sur la vulnérabilité et la résilience :** Les activités humaines créent des rétroactions complexes entre les systèmes sociaux et écologiques, entraînant une cascade d'impacts environnementaux et sociaux (Lambin & Meyfroidt, 2010). Il est essentiel de mieux comprendre non seulement les rétroactions qui amplifient la vulnérabilité, mais aussi celles qui augmentent la résilience des forêts tropicales, afin d'élaborer des plans de gestion adaptés au lieu et à la culture qui soutiennent à la fois la résilience de l'écosystème et les moyens de subsistance de la communauté. On peut citer à titre d'exemple les recherches récentes axées sur les "zones d'espoir" socio-écologiques - définies comme des zones pouvant avoir un impact significatif sur la résilience socio-écologique, où les communautés locales et l'engagement public peuvent être stratégiquement combinés avec la science, l'ingénierie et la technologie, y compris la télédétection, afin d'avoir le plus grand impact possible sur la conservation de la biodiversité vulnérable (Levis, et al., 2024). Les auteurs soulignent l'exemple du Xingu supérieur, situé dans l'arc de déforestation de l'Amazonie brésilienne, où des groupes autochtones comme les Kuikuro ont enrichi la biodiversité grâce à des millénaires de gestion du paysage, y compris la création de sols anthropogéniques, la domestication de diverses cultures et la culture de forêts culturelles, démontrant des pratiques culturelles et de gestion qui favorisent la résilience des forêts (Levis, et al., 2024). PANGEA offre la possibilité d'étendre des recherches similaires ailleurs sous les tropiques grâce à une collaboration et une coproduction équitables avec les communautés autochtones et locales afin d'identifier les pratiques qui favorisent les systèmes résilients profitant à la fois à la nature et aux populations, y compris celles qui ont le potentiel d'être mises à l'échelle. Il reste encore beaucoup à faire pour identifier des méthodes et des pratiques culturellement appropriées afin d'intégrer la télédétection et la science autochtone.

**Implications pour le système socio-écologique :** Les régions tropicales abritent de nombreuses communautés autochtones et locales dont les moyens de subsistance sont intimement liés à la santé de leur environnement. En comprenant les cycles de rétroaction entre les activités humaines et les fonctions des écosystèmes, les populations locales et mondiales peuvent prendre des décisions plus éclairées sur l'utilisation des terres, la gestion des ressources et les efforts de conservation qui s'alignent à la fois sur la résilience écologique et sur leurs besoins socio-économiques (Aguiar et al., 2020). Les décideurs infranationaux et nationaux peuvent également utiliser ces informations pour élaborer des politiques qui concilient les objectifs de développement avec la conservation de la biodiversité et des services écosystémiques, en veillant à ce que les avantages de ces écosystèmes soient équitablement partagés et maintenus pour les générations futures (Pörtner et al., 2021). PANGEA fera progresser la recherche sur les rétroactions socio-écologiques dans les tropiques afin d'améliorer la compréhension et de permettre des prévisions plus précises des impacts à long terme des actions humaines. Ce travail est essentiel pour prévoir les trajectoires futures du puits de carbone

tropical, la perte d'espèces, les changements dans les services écosystémiques et la résilience de ces écosystèmes face aux pressions extérieures (Leclère et al., 2020). Des prévisions précises sont nécessaires pour identifier les points de basculement potentiels, où de petits changements ou la poursuite des tendances en matière d'utilisation et de gestion des terres pourraient entraîner des changements de régime irréversibles, et pour concevoir des interventions susceptibles de prévenir ou d'atténuer ces résultats (Staal et al., 2020 ; Liu et al., 2024b ; Flores et al., 2024). Les progrès réalisés en matière de compréhension, de méthodes et de capacités de surveillance dans le cadre de PANGEA pourraient permettre aux populations autochtones, aux communautés locales et aux décideurs de disposer des informations dont ils ont besoin pour gouverner ces écosystèmes et s'y engager de manière plus durable. En fin de compte, la capacité à prévoir et à gérer les rétroactions complexes dans les écosystèmes tropicaux est essentielle pour favoriser la résilience environnementale et sociale dans ces régions critiques.

**Impacts mondiaux des forêts tropicales :** L'impact des forêts tropicales s'étend bien au-delà des tropiques. Les habitants des États-Unis et du monde entier sont touchés par les interactions entre la terre et l'atmosphère tropicale et sont également des agents de changement pour le climat et les écosystèmes tropicaux, par exemple par le biais des modes de consommation, des styles de vie et des changements dans l'utilisation des terres. L'Amazonie joue un rôle essentiel dans la stabilisation des systèmes climatiques à travers les Amériques, et la déforestation de l'Amazonie menace les régimes pluviométriques aux États-Unis, ce qui pourrait entraîner une réduction de 20 % des précipitations dans le nord-ouest des États-Unis et une diminution de 50 % du manteau neigeux de la Sierra Nevada en Californie, qui est la source d'eau pour l'agriculture et les zones urbaines dont dépendent tous les États-Unis (Medvigy et al., 2013). Si les régimes de précipitations dans le Midwest, le Nord-Ouest et certaines parties du Sud des États-Unis sont perturbés, cela pose de sérieux risques pour l'agriculture et les ressources en eau du pays (Lawrence et Vandecar, 2015). La déforestation de l'Amazonie pourrait entraîner une réduction de 20 % des précipitations dans le nord-ouest des États-Unis et une diminution de 50 % du manteau neigeux de la Sierra Nevada en Californie, qui est la source d'eau dont dépendent l'agriculture et les zones urbaines de l'ensemble des États-Unis (Medvigy et al., 2013). De tels changements dans les précipitations, combinés à des modifications de la circulation atmosphérique, pèseraient sur la disponibilité de l'eau, diminueraient les rendements agricoles et déstabiliseraient les écosystèmes des plaines centrales des États-Unis à la côte ouest, ce qui pourrait poser des problèmes de sécurité alimentaire. La disparition et la dégradation de la forêt amazonienne constituent des menaces directes et graves pour l'agriculture, les ressources en eau et la stabilité sociétale des États-Unis. Outre le rôle que jouent les forêts tropicales dans la régulation du climat mondial, de nombreux produits de base sont cultivés principalement ou entièrement sous les tropiques, notamment le cacao, le café, l'huile de palme et le caoutchouc. De nombreuses espèces de bois ne se trouvent également que sous les tropiques (Romero et al., 2017). PANGEA évaluera l'évolution de l'étendue de l'utilisation des terres pour soutenir ces cultures et l'exploitation du bois sur la déforestation tropicale et le changement climatique et examinera les compromis, les stratégies d'adaptation et d'atténuation.

## 2.5 Dynamique des perturbations

*Ce thème scientifique PANGEA étudiera comment les régimes de perturbation modifient les rétroactions du cycle biogéochimique par le biais du climat, de la biodiversité et du cycle hydrologique.*

**Dynamique des perturbations sous les tropiques :** Il existe deux principaux régimes de perturbation des forêts : (1) les perturbations humaines directes résultant de la couverture terrestre et du changement d'utilisation des terres, telles que la déforestation, la dégradation, le développement agricole et les incendies provoqués par l'homme, et (2) les perturbations naturelles qui sont largement associées aux températures élevées, au stress hydrique, aux tempêtes, aux agents biotiques et aux incendies naturels, qui sont exacerbées indirectement par les actions humaines qui contribuent au changement climatique. Ces deux régimes de perturbation contribuent énormément au renouvellement total des forêts et aux émissions de carbone des forêts tropicales (McDowell et al. 2020, Qin et al., 2021), mais ont des distributions spatiales, des intensités, des fréquences et des conséquences distinctes pour les régions tropicales. Dans l'Arc de déforestation du Brésil, la dégradation des forêts par l'exploitation forestière et les incendies a entraîné une perte de carbone plus importante que le déboisement entre 2016 et 2018 (Csillik et al., 2024). L'effet des tempêtes de vent sur la perte de carbone était presque aussi important que les incendies, et plus important que l'exploitation forestière (Csillik et al., 2024 ; Urquiza-Muñoz et al. 2024 ; Esquivel-Muelber et al. 2020). Les effets de l'évolution de la fréquence et de la gravité des sécheresses et des tempêtes, de la hausse des températures, de la déforestation et de la dégradation sont très variables d'un écosystème à l'autre et peuvent avoir un impact sur la mortalité des arbres, l'évapotranspiration, la respiration des écosystèmes, la composition des espèces et bien d'autres choses encore. Les interactions entre les perturbations peuvent être multiplicatives plutôt qu'additives, ce qui signifie que nous devons quantifier explicitement leur impact et leurs interactions pour comprendre leurs effets. Parmi les exemples, citons la sécheresse qui amplifie les effets du feu (Brando et al., 2014), la déforestation qui amplifie le vent (Schwartz et al., 2017) et les lianes qui amplifient la foudre (Gora et al., 2023). PANGEA quantifiera les effets des perturbations sur les gradients de biodiversité, de climat, d'édaphisme et d'utilisation des terres afin de comprendre leurs conséquences individuelles et multiplicatives.

**Perturbations humaines directes :** Au cours des dernières décennies, les perturbations humaines directes ont constitué le principal risque pour la persistance et le fonctionnement des forêts tropicales. L'homme défriche chaque année de vastes étendues de forêts tropicales et les dégrade par l'abattage sélectif, la chasse et les incendies. Les perturbations humaines directes ont généralement des effets intenses et durables, tels que l'élimination de la biomasse, la défaunation et la conversion des terres en écosystèmes non forestiers (Lewis 2015 ; Gibson et al., 2011, Wearn et al., 2012 ; Brodie et al., 2014 ; Silva Junior et al., 2020, Brando et al., 2014, Flores et al., 2024). La télédétection par satellite a révolutionné la détection rapide et la quantification des perturbations humaines directes et a permis de mieux comprendre les facteurs de ces perturbations (voir section 2.4). La déforestation et la modification de la couverture terrestre sont désormais activement cartographiées à haute résolution spatiale dans l'ensemble des tropiques et en association avec des secteurs et des pratiques spécifiques à l'origine de ces tendances (Curtis et al., 2018 ; Maxwell et al., 2019 ; Qin et al., 2021 ; Harris et al., 2021 ; Lapola et al., 2023 ; McGregor et al., 2024 ; Csillik et al., 2024). Avec l'avènement des réseaux de petits satellites (par exemple, PlanetScope), il est désormais possible de quantifier la déforestation et la dégradation dans certains systèmes en quelques jours ou quelques mois (Welsink et al., 2023 ; Dalagnol et al., 2023). Ces avancées ont démontré que la dégradation contribue autant,

voire plus, que la déforestation à l'ensemble des régimes de perturbation des forêts tropicales (Maxwell et al., 2019 ; Qin et al., 2021), soulignant l'importance des données à haute résolution et à haute fréquence pour la compréhension et le suivi de ces dynamiques. Pourtant, les interactions entre la déforestation et la dégradation et des facteurs tels que les cycles hydrologiques, les conditions micrométéorologiques, les interactions entre les espèces et les cycles biogéochimiques restent mal comprises, en particulier en Afrique tropicale.

**Incendie :** Dans les forêts tropicales humides, la dynamique des incendies interagit souvent avec la déforestation et la dégradation, où les incendies d'origine naturelle restent rares et les incendies d'origine humaine sont fréquents (Uhl et Kaufmann, 1990 ; Cochrane, 2003 ; Brando et al., 2019a). De 2003 à 2018, dans les forêts tropicales humides, on estime que  $41 \pm 14\%$  de toutes les pertes de forêts étaient liées aux incendies, bien que cela varie considérablement d'un continent à l'autre (van Wees et al., 2021). Sur l'ensemble des pertes de forêts tropicales liées aux incendies au cours de cette période, 69 % se sont produites dans les Amériques tropicales, 22 % en Asie du Sud-Est et seulement 8 % en Afrique subsaharienne (van Wees et al., 2021). Bien que les incendies soient associés à la déforestation, l'impact du déclin de la déforestation en Amazonie, depuis 2005, sur l'activité des incendies reste incertain. Certaines études ont montré un découplage entre les incendies et la déforestation (Aragão et al., 2018), tandis que d'autres ont fait état d'un déclin de l'activité des incendies (par exemple, Andela et al., 2017 ; Libonati et al., 2021). En Afrique, les pertes de forêts tropicales liées aux incendies ont augmenté, mais la majorité des incendies dans la région ne sont probablement pas détectés (Wimberly et al., 2024). Les incendies d'origine humaine se propagent généralement dans le sous-étage des forêts tropicales intactes, où ils provoquent la mortalité des arbres et rendent les forêts plus sensibles aux perturbations éoliennes ultérieures (Barlow et al., 2003 ; Brando et al., 2014 ; Silvério et al., 2019 ; Berenguer et al., 2021b). Les modifications de la structure forestière associées aux incendies et à la fragmentation des forêts peuvent accroître le risque d'incendies ultérieurs, à la fois en raison de l'abondance accrue des charges combustibles telles que les herbes et les plantes de sous-bois (Silvério et al., 2013, Sagang et al., 2024b) et de l'augmentation du rayonnement solaire atteignant le sol, qui favorise des conditions plus chaudes et plus sèches près de la surface (Brando et al., 2014 ; Longo et al., 2020 ; Nunes et al., 2022). En outre, les sécheresses périodiques amplifient les effets des incendies en augmentant l'inflammabilité des combustibles, et l'on s'attend donc à ce que l'augmentation des sécheresses sévères due au climat accroisse les effets des incendies (Alencar et al., 2006 ; Brando et al., 2014, 2019a ; Barbosa, 2024 ; Burton et al., 2024a,b ; da Veiga et al., 2024 ; Jones, 2024). Les incendies transfèrent l'azote de l'écosystème dans l'atmosphère par pyrodénitrification, ce qui a pour effet d'appauvrir l'azote et de réduire les taux de régénération de la végétation (Davidson et al., 2007). Les mesures par satellite et au sol ont révélé les effets étendus des incendies et leurs contributions majeures au cycle pantropical du carbone (Cochrane 2001 ; Berenguer et al., 2021a). Grâce à des mesures au sol coordonnées et co-localisées et à des observations satellitaires et aériennes avancées, PANGEA améliorera considérablement la compréhension de la dynamique des incendies et de leurs impacts.

**Dynamique des perturbations naturelles :** Les perturbations naturelles - principalement la sécheresse, les tempêtes et les agents biotiques - présentent des défis distincts en matière de détection, de quantification et d'attribution par rapport aux perturbations humaines directes telles que la déforestation et la dégradation des forêts - bien que la défaune reste essentiellement impossible à détecter à l'aide de la télédétection. La plupart des perturbations naturelles se produisent à de petites échelles spatio-temporelles, plus de 98 % de la mortalité de la biomasse due aux chutes d'arbres en Amazonie étant attribuable à des événements d'une superficie inférieure à 0,1 ha (Espírito-Santo et al.,

2014). Cependant, les petites perturbations peuvent collectivement causer environ 1,5 à 2 % du renouvellement de la biomasse chaque année, ce qui indique que les perturbations naturelles libèrent l'équivalent de l'ensemble du réservoir de carbone de la forêt tropicale tous les 50 à 75 ans (Galbraith et al., 2013 ; Espírito-Santo et al., 2014). Les perturbations naturelles peuvent également varier considérablement dans l'espace et dans le temps (Galbraith et al., 2013 ; Sullivan et al., 2020 ; Hubau et al., 2020 ; Dalagnol et al., 2021, Csillik et al., 2024, Negron-Juarez et al., 2023), avec des moteurs distincts dans différentes régions et des preuves solides que les régimes de perturbations naturelles évoluent avec le changement climatique (Gloor et al., 2013 ; McDowell et al., 2018, Gora et al., 2020a ; Sullivan et al., 2020 ; Gora et Esquivel-Muelbert 2021 ; Fang et al., 2022). Compte tenu de leur contribution considérable à la dynamique du cycle du carbone des forêts tropicales - par exemple, en Amazonie brésilienne, les perturbations naturelles représentaient plus de 50 % des pertes totales de carbone de la biomasse (Csilik et al., 2024) - , même de petites modifications des régimes de perturbations naturelles auront un impact sur la fonction des forêts tropicales, la biodiversité et le budget mondial du carbone.

**La sécheresse :** Les épisodes de sécheresse sont des facteurs majeurs de perturbation naturelle dans les forêts tropicales. Le stress hydrique atmosphérique associé aux températures élevées et aux déficits de pression de vapeur a augmenté au cours des dernières décennies (Fang et al., 2022), et les sécheresses épisodiques sont plus graves et plus fréquentes (Boiser et al., 2015 ; Duffy et al., 2015 ; Trenberth et al., 2014). Le stress hydrique lié à la sécheresse est associé à une augmentation de la mortalité et à une diminution de la croissance des arbres, détectables sur les placettes d'inventaire forestier et par télédétection satellitaire (Phillips et al., 2009 ; Saatchi et al., 2013 ; Qie et al., 2017 ; Hammond et al., 2022 ; Bauman et al., 2022 ; Bennett et al., 2023 ; Chen et al., 2024). Des travaux physiologiques et anatomiques détaillés ont révélé beaucoup de choses sur les mécanismes qui soutiennent la résilience des forêts au stress hydrique (McDowell et al., 2008 ; McDowell 2011 ; Trugman et al., 2018 ; Smith-Martin et al., 2023 ; Tavares et al., 2023). La recherche sur la sécheresse dans les forêts tropicales fournit des preuves solides de son importance, mais révèle également que les effets de la sécheresse sont très variables d'un écosystème à l'autre. Par exemple, le phénomène El Niño de 2015-2016 a eu des effets importants sur l'Amazonie (Bennett et al., 2023), mais n'a eu qu'un effet marginal sur les forêts tropicales africaines (Bennett et al., 2021) et a provoqué une augmentation substantielle de la PPB dans le centre du Panama (Detto et Pacala, 2022). Bien que les différences entre les années de sécheresse et les années sans sécheresse soient claires, la contribution des sécheresses aux tendances décennales de la dynamique forestière et les trajectoires futures des forêts tropicales restent très incertaines.

**Tempêtes :** Les tempêtes tropicales (appelées ouragans, cyclones ou typhons selon leur localisation géographique) augmentent en intensité et constituent une forme dominante de perturbation dans les forêts tropicales côtières situées à 10° au nord et au sud de l'équateur (Hoyos et al., 2006 ; Lugo 2008), bien qu'elles jouent un rôle limité dans les régimes de perturbation pantropicaux. En revanche, il existe de nombreuses preuves que le vent et la foudre associés aux orages sont des facteurs dominants de la mortalité des arbres et de la dynamique de la biomasse forestière (Chambers et al., 2013 ; Negrón-Juárez et al., 2018 ; Negron-Juarez et al., 2017, Negron-Juarez et al., 2023, Gora et al., 2020b ; Gora et Esquivel-Muelbert, 2021). En Amazonie, la mortalité des arbres due aux tempêtes a quadruplé depuis les années 1980 (Urquiza-Muñoz et al., 2024), mais peu d'études en Amazonie se sont penchées sur les facteurs de la dynamique et de la composition des forêts liés aux tempêtes. La variation temporelle de l'activité des tempêtes prédit les taux de perturbation de la canopée (Araujo et al., 2021) et la variation spatiale de l'activité des tempêtes est une forte corrélation de la variation

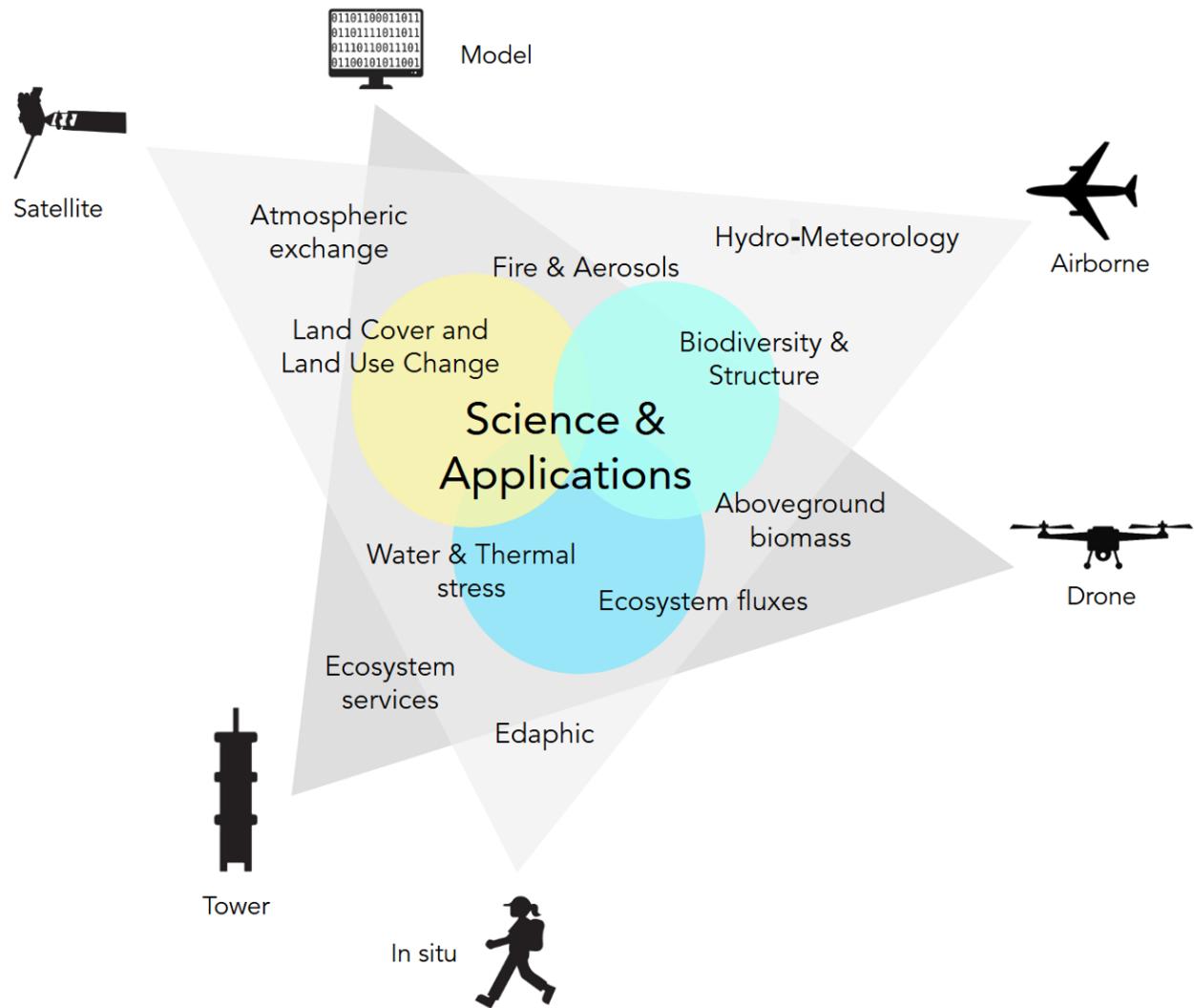
spatiale de la biomasse forestière, des taux de mortalité de la biomasse et de la composition des espèces (Gora et al., 2020 ; Gorgens et al., 2021 ; de Lima et al., 2023 ; Feng et al., 2023a). Par exemple, une faible activité des tempêtes est associée à une biomasse élevée dans le bouclier guyanais, tandis qu'une fréquence élevée des tempêtes est associée à une biomasse plus faible et à des taux de perturbation plus élevés dans l'ouest de l'Amazonie (Gorgens et al., 2021). Les tempêtes jouent probablement un rôle similaire dans d'autres forêts tropicales, mais les analyses des perturbations dues aux tempêtes dans les forêts tropicales africaines et indomalaises sont pratiquement inexistantes. Cette lacune dans les connaissances est préoccupante car toutes les données existantes suggèrent que la fréquence des tempêtes convectives a augmenté de 5 à 25 % par décennie au cours du siècle dernier, et que des augmentations continues sont attendues (Taylor et al., 2018 ; Raghavendra et al., 2018 ; Lavigne et al., 2019 ; Harel et Price 2020).

**Hausse des températures :** La plupart des forêts tropicales de plaine connaissent des températures moyennes élevées tout au long de l'année, avec une variabilité saisonnière et interannuelle relativement faible, ce qui peut rendre les forêts tropicales particulièrement vulnérables aux changements de température (Cunningham et Read, 2002). Les projections climatiques indiquent que les forêts tropicales connaîtront de plus en plus de températures annuelles moyennes sans analogie et d'épisodes de chaleur extrême tout au long du 21<sup>e</sup> siècle (Seneviratne et al., 2021). Les températures élevées peuvent augmenter rapidement et de manière non linéaire le déficit de pression de vapeur (DPV) (Barkhordarian et al., 2019), qui à son tour a un impact négatif sur la productivité primaire en raison de la fermeture des stomates (Lloyd et Farquhar, 2008). Des expériences ont montré que les espèces d'arbres tropicaux sont capables de maintenir leur productivité jusqu'à 38 °C si le DPV n'augmente pas (Smith et al., 2020). Toutefois, si les températures moyennes augmentent de plus de 4 °C par rapport aux niveaux actuels, les écosystèmes forestiers tropicaux pourraient connaître des périodes fréquentes de températures proches de 50 °C, ce qui pourrait causer des dommages irréversibles aux tissus et une perte persistante de la capacité photosynthétique (Doughty et al., 2023). Le seuil exact à partir duquel la température et le PDV causeront des dommages permanents et importants aux forêts tropicales reste très incertain (Slot et Winter, 2016 ; Winter et Roelfsema, 2024).

### 3 Lacunes et questions en matière de connaissances

Malgré l'importance mondiale des forêts tropicales, nous ne comprenons pas entièrement les modèles et processus fondamentaux qui sous-tendent leur survie, ce qui limite notre capacité à prévoir efficacement leur rôle futur dans le système terrestre. Il est important de noter que la plupart des lacunes actuelles en matière de connaissances sont intrinsèquement transdisciplinaires et nécessitent une compréhension approfondie des processus et des interactions entre les écosystèmes forestiers tropicaux structurellement, fonctionnellement et socialement divers et hétérogènes, l'effet du changement climatique, les changements dans les régimes de perturbation naturels et anthropogéniques et leurs impacts combinés sur la biodiversité et les cycles biogéophysiques et biogéochimiques. Les questions scientifiques de PANGEA recoupent donc les cinq thèmes scientifiques décrits à la section 2. Les questions relatives à ces thèmes - cycles biogéochimiques, biodiversité, interactions et rétroactions climatiques, systèmes socio-écologiques et dynamique des perturbations - sont organisées en fonction de considérations relatives aux modèles (section 3.1), aux processus (section 3.2) et aux changements futurs prévus (section 3.3), afin de refléter leur nature transdisciplinaire. Les mesures nécessaires pour fournir des données écologiques, sociales et géophysiques permettant de répondre aux questions scientifiques seront obtenues par des méthodes

terrestres, aériennes et satellitaires. Elles sont décrites brièvement dans cette section et plus en détail dans le **tableau 2** de la section 6.2 et dans **le tableau -E1** de l'annexe E. L'étendue et la variété de la collecte de données pour les mesures satellitaires, aéroportées et terrestres sont illustrées **à la figure 16**.



**Figure 16.** La science et les applications de PANGEA permettront de concilier les différences d'échelle grâce à des mesures in situ, sur tour, par drone, par avion et par satellite, combinées à des progrès en matière de modélisation et de compréhension des processus qui sous-tendent la théorie de la mise à l'échelle.

### 3.1 Modèle

#### 3.1.1 Modèle : Stocks et flux de carbone

Les estimations actuelles des stocks et des flux de carbone diffèrent sensiblement entre les tropiques (Sullivan et al., 2020 ; Xu et al., 2021a ; Muller-Landau et al., 2021 ; Wang et al., 2023a). Les données provenant d'Afrique, bien que peu nombreuses, avec un biais géographique et un manque de

représentativité, suggèrent que les régimes de perturbation et les réponses des forêts aux perturbations sont distincts de ceux des autres continents (Hubau et al., 2020 ; Bennett et al., 2021 ; 2023), bien que cela soit encore sujet à débat. En outre, sous les tropiques, les schémas spatiaux et temporels de la dynamique des perturbations sont mal caractérisés, ce qui exacerbe l'incertitude quant à l'avenir du budget mondial du carbone (Pugh et al., 2020). Pour combler les lacunes de nos données et de notre compréhension des stocks et des flux de carbone tropicaux, PANGEA abordera les questions suivantes liées aux schémas afin de répondre à la question primordiale de PANGEA dans la section 1 :

- **Q1.** Comment les forêts tropicales diffèrent-elles en termes de stocks de carbone et de flux de dioxyde de carbone, de méthane et de latéralité, et comment leurs **variations spatiales** au sein de chaque forêt sont-elles liées au microclimat, au cycle hydrologique, aux sols, à la géomorphologie et aux interactions socio-écologiques ?
- **Q2.** Comment les **variations temporelles** des flux des forêts tropicales sont-elles liées aux variations temporelles des conditions météorologiques et comment seront-elles affectées par le changement climatique ?
- **Q3.** Comment les **types de perturbations** et les gradients dans les **régimes de perturbations** affectent-ils les stocks et les flux de carbone, y compris les flux de dioxyde de carbone, de méthane et les flux latéraux ?
- **Q4.** Comment les différences géographiques et les variations spatiales et temporelles de la **phénologie des arbres** des forêts tropicales varient-elles avec les stocks et les flux de carbone, et la phénologie évolue-t-elle en fonction des changements, y compris les changements climatiques et d'utilisation des terres, et des régimes de perturbation ?

Afin d'améliorer la **caractérisation spatiale** de la biomasse à l'échelle du paysage (forêts, terres cultivées, pâturages) et les différences de biomasse entre les domaines géographiques principaux et étendus, PANGEA intégrera les données des parcelles d'inventaire forestier et des mesures supplémentaires sur des sites sélectionnés couvrant l'échelle du paysage, avec des données lidar satellitaires et aéroportées. PANGEA s'associera à GEO-TREES, un projet qui coordonne les mesures au sol des inventaires forestiers avec la collecte de données par balayage laser terrestre, par drone et par lidar aéroporté. PANGEA exploitera les informations sur les estimations des stocks de carbone basées sur l'allométrie des arbres et donnera la priorité à la colocalisation des paysages avec les sites forestiers de GEO-TREES pour soutenir les efforts de mise à l'échelle à l'aide de **GEDI**, **NISAR**, **BIOMASS** et **EDGE\***. Pour faire progresser la **quantification temporelle** des flux des écosystèmes, PANGEA intégrera les données CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> recueillies à l'aide des mesures de flux par covariance d'eddy existantes (Baldocchi 2020) et identifiera également les zones de mise en œuvre de nouvelles tours pour combler les lacunes en matière de données et de connaissances à travers les gradients de climat, de biodiversité et de perturbation. Des mesures supplémentaires du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> seront effectuées grâce au déploiement stratégique de chambres automatisées et manuelles. Pour évaluer les contraintes régionales et pantropicales sur les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, PANGEA utilisera des mesures aériennes de gaz à l'état de traces, qui ont joué un rôle clé dans les campagnes de terrain précédentes de la NASA, telles que les mesures du profil vertical de Manaus pendant LBA et les mesures aériennes de gaz à l'état de traces de CARVE et Arctic-CAP pendant ABoVE (Sweeney et al., 2022). Ces mesures seront utilisées pour valider les observations satellitaires de capteurs tels que **OCO-2 et -3**, **TROPOMI**, **Carbon Mapper**, et les nouveaux produits des satellites géostationnaires, y compris **GOES-R** (Crisp et al., 2017 ; Lorente et al., 2021 ; Khan et al., 2021 ; Ranjbar et al., 2023).

**NISAR** et **BIMASS** seront utilisés pour cartographier les zones humides tropicales, qui seront intégrées aux données sur les eaux de surface de la mission **SWOT** (Surface Water and Ocean Topography Mission) afin de contraindre les mesures des flux de carbone latéraux.

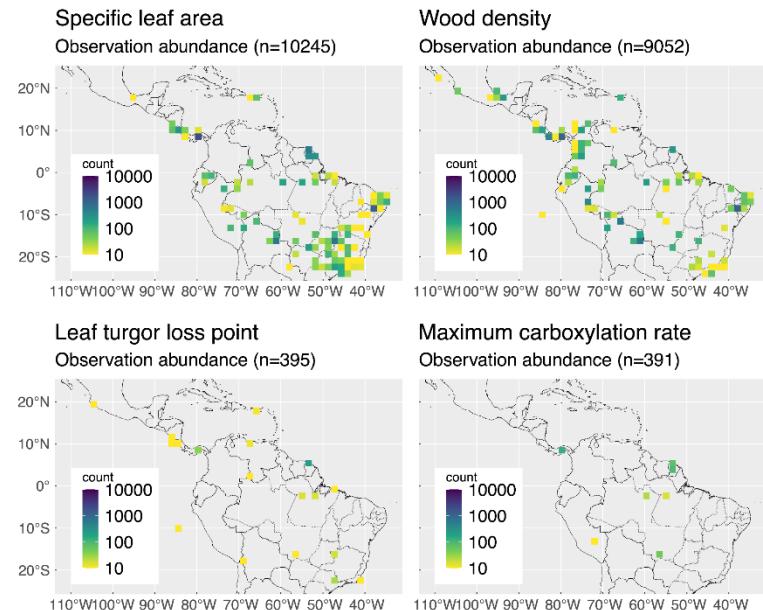
PANGEA collaborera avec le réseau d'observation de la colonne totale de carbone (TCCON) et le réseau collaboratif d'observation de la colonne de carbone (COCCON) pour combler les lacunes de validation des observations par satellite, en particulier en Afrique, afin de résoudre les débats sur les estimations des sources et des puits continentaux déduits des observations OCO-2. Le TCCON et le COCCON sont des réseaux de spectromètres à transformée de Fourier basés au sol qui sont utilisés pour récupérer l'abondance moyenne exacte et précise de CO<sub>2</sub> , CH<sub>4</sub> , N<sub>2</sub> O, HF, CO, H<sub>2</sub> O, et HDO, fournissant une ressource de validation essentielle pour **OCO-2/3**, **GOSAT** et **GOSAT-2**, **TROPOMI**, et d'autres missions. Ces mesures de validation sont actuellement extrêmement rares dans les tropiques, ce qui limite l'interprétation des schémas de flux spatio-temporels déduits des données satellitaires CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> . Ces mesures permettront également de contraindre les modèles et de quantifier les incertitudes des estimations à l'échelle régionale des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> dérivées de la modélisation inverse (Beck et al., 2013b ; Liu et al., 2016 ; Schuh et al., 2019) pour les paysages de l'ensemble du domaine PANGEA. Enfin, PANGEA quantifiera l'impact des **perturbations de la canopée** dues au vent, à la foudre et à la sécheresse, ainsi que la **phénologie des forêts tropicales** sur les flux et les stocks de carbone grâce à une combinaison de mesures sur le terrain, de PhenoCams, de drones et de données satellitaires, afin de combler les lacunes dans les connaissances liées aux différentes réponses phénologiques des feuilles pour les espèces individuelles et les types fonctionnels aux gradients de climat et de perturbation dans les paysages. Les ensembles de données de PANGEA viendront compléter les efforts déjà déployés pour étendre la couverture géographique de la phénologie à l'aide de **Landsat**, **de Sentinel-2** et de **données satellitaires commerciales** (Guan et al., 2015 ; Yang et al., 2021b ; Wang et al., 2023a).

### 3.1.2 Modèle : Biodiversité et composition fonctionnelle

La biodiversité varie considérablement entre les continents tropicaux, non seulement en raison des différences climatiques, mais aussi en raison de leur passé évolutif (Corlett et Primack 2006 ; Slik et al., 2018 ; Raven et al., 2020). La biodiversité est positivement associée à une productivité primaire nette plus élevée dans les forêts tropicales (Durán et al., 2019). Comprendre les mécanismes qui soutiennent cette relation à l'échelle régionale à pantropicale est une lacune dans les connaissances que PANGEA peut contribuer à combler. Nous manquons d'informations détaillées sur la diversité fonctionnelle des écosystèmes forestiers tropicaux. Une première évaluation de l'abondance des données sur les caractères des plantes forestières tropicales dans les tropiques américains, basée sur TRY (Kattge et al., 2020) ; LT-Brésil (Mariano et al., 2021) et NGEE-Tropiques (<https://ngt-data.lbl.gov/dois/>), révèle que quelques sites du centre du Panama et de la côte de la Guyane française représentent la majeure partie des données sur les caractères des espèces d'arbres forestiers, et que la plupart des caractères disposent d'informations limitées (**figure 17**), en particulier pour les espèces d'arbres africaines. En comblant ces lacunes en matière de connaissances et de données, PANGEA établira un lien direct entre les mesures au sol et la télédétection aérienne et satellitaire afin de comprendre la distribution des traits fonctionnels de la canopée et de la diversité fonctionnelle dans les biomes des forêts tropicales et d'étudier la force et la dépendance à l'échelle des contrôles de la biodiversité sur la fonction des écosystèmes. PANGEA répondra aux questions suivantes afin de combler les lacunes dans la compréhension de la biodiversité et de la composition fonctionnelle sous les tropiques.

- **Q5.** Comment la structure et la fonction des forêts tropicales diffèrent-elles géographiquement et varient-elles dans l'espace en fonction de la **biodiversité** végétale ?
- **Q6.** Quelle est la **répartition des traits fonctionnels** des plantes **dans les forêts tropicales** des différents continents, et comment ces différences reflètent-elles les réponses aux perturbations et aux gradients climatiques ?
- **Q7.** Dans quelle mesure les stocks de carbone tropicaux et la dynamique du cycle du carbone sont-ils liés à la **composition des traits fonctionnels des plantes** ?

Afin de relier les mesures de biodiversité à la diversité structurelle et fonctionnelle, PANGEA recueillera des mesures au sol et des observations hyperspectrales aériennes coïncidentes sur la biodiversité des espèces et la composition des traits fonctionnels, ainsi que sur les gradients de perturbation. PANGEA s'appuiera sur des recherches antérieures qui démontrent comment ces approches permettent d'estimer la composition fonctionnelle et la diversité des écosystèmes forestiers tropicaux (Feret et Asner, 2013 ; Asner et al., 2014b ; Asner et al., 2017 ; Chadwick et Asner 2020 ; Ordway et al., 2022). PANGEA utilisera des données hyperspectrales aériennes et satellitaires, notamment celles des missions **EMIT, PRISMA, DESIS, PACE** (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem Mission) et **Planet Tanager**, et fera progresser l'étalonnage et le développement d'algorithmes pour soutenir la science et les applications de PANGEA ainsi que la mission **SBG**. PANGEA caractérisera également la diversité structurelle des forêts à l'aide de lidars terrestres et de drones, aéroportés et spatiaux (**GEDI, EDGE\***) à l'échelle de l'arbre individuel et de l'écosystème (par exemple, Decuyper et al, 2018 ; Dubayah et al., 2020 ; Momo et al., 2020, Terryn et al., 2022 ; Schneider et al., 2019 ; Ferraz et al., 2016 ; Jucker et al., 2018a ; Schneider et al., 2020 ; de Conto et al., 2024). Pour étudier l'association entre la composition des espèces végétales et le fonctionnement des écosystèmes (Coverdale et Davies, 2023), PANGEA combinera des mesures de la diversité structurelle et fonctionnelle avec des observations in situ et par télédétection du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub>, des flux d'eau et d'énergie et du cycle des nutriments, en utilisant des séries temporelles de mesures et un échantillonnage espace-temps dans l'ensemble des paysages. Afin d'établir un lien entre la diversité fonctionnelle et les réponses des écosystèmes aux événements extrêmes, la collecte de données PANGEA couvrira des paysages qui ont présenté des réponses distinctes à des événements extrêmes antérieurs, par exemple le



**Figure 17.** Nombre d'observations pour certains caractères dans les tropiques américains, sur la base des bases de données existantes - TRY (Kattge et al. 2020) ; LT-Brésil (Mariano et al. 2021, et références y afférentes) ; et NGEETropiques (<https://ngt-data.lbl.gov/dois/>). Pour la surface foliaire spécifique et le taux de carboxylation maximal, le décompte ne comprend que les observations qui ont été prises sans équivoque dans la canopée ou les feuilles exposées au soleil.

phénomène El Niño de 2015. Nous utiliserons une approche espace-temps en l'absence d'événements extrêmes pendant PANGEA. La détection des réponses aux événements extrêmes, ainsi que les relations émergentes entre la diversité fonctionnelle et la fonction de l'écosystème seront utilisées pour mettre à l'échelle les ensembles de données dans les domaines PANGEA et pour l'évaluation comparative des modèles basés sur les processus. La section 3.2.1 présente des questions supplémentaires liées à la biodiversité de PANGEA qui vont au-delà de la botanique pour inclure des taxons non végétaux et des interactions entre espèces. D'après les conversations avec les collaborateurs autochtones au cours de l'effort de cadrage de PANGEA, l'intégration des connaissances écologiques autochtones, traditionnelles et locales (IEK, TEK et LEK) avec d'autres formes de connaissances et de données est plus susceptible de permettre de répondre aux questions de la section 3.2.1. Nous pensons que les IEK, TEK et LEK ont le potentiel de faire progresser la compréhension de toutes les questions scientifiques de PANGEA de manières qui seront explorées par le biais d'une science équitable et co-développée.

### 3.1.3 Modèle : Interactions terre-atmosphère et seuils

Malgré les progrès réalisés dans la compréhension des interactions et des rétroactions entre la biosphère et l'atmosphère dans les régions tropicales grâce à des projets et des campagnes antérieurs de la NASA (Davidson et al., 2012), il subsiste d'importantes lacunes dans les connaissances sur la manière dont ces interactions varient à l'intérieur et entre les continents (Phillipon et al., 2019 ; Pohl et al., 2021 ; Martins et al., 2018 ; Chakraborty et al., 2019 ; Jonard et al., 2022). Les conditions hydroclimatiques dans les forêts tropicales varient considérablement le long des gradients de perturbation, des forêts intactes aux paysages fortement fragmentés (Gutierrez-Cori et al., 2021), et des études de modélisation et de télédétection montrent que la dégradation généralisée des forêts tropicales peut modifier les flux d'énergie et d'eau (par exemple, Longo et al., 2020 ; Rangel Pinagé et al., 2023), mais les effets de la dégradation des forêts sur l'intensité et le recyclage des précipitations restent inconnus. Les impacts de la déforestation sur les voies de transport de l'humidité atmosphérique recyclée font l'objet d'un nombre croissant de recherches en Amazonie, mais dans une moindre mesure en Afrique centrale (van der Ent et al., 2010 ; Zemp et al., 2017 ; Baker et Spracklen 2022 ; Te Wierik et al., 2022 ; Xu et al., 2022 ; Staal et al., 2023 ; Theeuwen et al., 2023 ; Flores et al., 2024 ; Nyasulu et al., 2024). Ce manque de connaissances pour l'Afrique est préoccupant étant donné les preuves récentes qui suggèrent que les forêts tropicales d'Afrique centrale dépendent plus fortement du recyclage de l'humidité pour fournir l'humidité atmosphérique pour les précipitations que l'Amazonie (Worden et al., 2021b, 2024 ; Baker et Spracklen 2022). En outre, les incendies liés à l'utilisation des terres peuvent modifier de manière significative la concentration d'aérosols dans l'atmosphère et avoir un impact direct sur les activités de convection dans les écosystèmes tropicaux (Andreae et al., 2004 ; Freire et al., 2020). Pour combler les lacunes dans les connaissances relatives aux interactions terre-atmosphère et aux seuils hydroclimatiques, PANGEA répondra aux questions suivantes :

- **Q8.** Comment les *interactions entre la terre et l'atmosphère*, y compris le recyclage de l'humidité et les flux de carbone, varient-elles en fonction des rétroactions climatiques, des perturbations, de la capacité de stockage du carbone et de la résilience des forêts tropicales, dans des conditions environnementales changeantes ?
- **Q9.** Comment les *seuils hydroclimatiques*, tels que les niveaux critiques d'humidité du sol ou les limites thermiques, varient-ils au sein des continents tropicaux et entre eux ?

Pour étudier comment les interactions entre la terre et l'atmosphère varient d'un continent à l'autre, PANGEA s'appuiera sur les mesures utilisées pour la variation spatiale et temporelle des stocks de carbone (*section 3.1.1*) et la diversité structurelle et fonctionnelle (*section 3.1.2*), complétées par des mesures au sol provenant de stations micrométéorologiques, des flux de chaleur latente et sensible provenant de tours à covariance de Foucault, l'humidité du sol, des mesures écophysiologiques de la canopée, et l'humidité des combustibles vivants et morts. PANGEA mettra à l'échelle les données au sol et dans les tours sur l'humidité du sol, la teneur en eau de la canopée, les caractéristiques hydrauliques, le stress thermique et l'évapotranspiration (ET) dans les régions pantropicales en combinant des données radar et hyperspectrales aéroportées avec **SMAP**, Soil Moisture and Ocean Salinity Mission (**SMOS**), **NISAR\***, Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS Mission (**AMSR-E**), **EMIT**, **ECOSTRESS** et Fluorescence Explorer Mission (**FLEX**). Les données au sol de PANGEA amélioreront encore les estimations de l'humidité du sol dans les forêts tropicales de **SMAP**, connues pour être fortement biaisées dans les écosystèmes tropicaux (Cho et al., 2024), en s'appuyant sur les récents efforts de correction (Wang et al., 2024). Pour identifier les seuils hydroclimatiques critiques, PANGEA fera progresser les approches émergentes visant à quantifier le stress hydrique de la végétation depuis l'espace. Par exemple, la teneur en eau du couvert végétal à partir de données hyperspectrales aéroportées a illustré des modèles écologiquement significatifs liés au stress hydrique dans les systèmes méditerranéens (Brodrick et al., 2019 ; Paz-Kagan et Asner 2017), et PANGEA testera la transférabilité de cette approche aux tropiques. L'estimation de la profondeur optique de la végétation à partir de la télédétection par micro-ondes est une autre technologie prometteuse pour la quantification du stress lié à la sécheresse (Konings et al., 2021), et PANGEA étudiera comment établir une échelle entre la réponse au niveau des feuilles et au niveau individuel, et évaluera les incertitudes et tiendra compte des effets confondants, tels que le signal dominé par l'eau de surface des feuilles au lieu de l'eau interstitielle (Xu et al., 2021b). PANGEA collectera des mesures écophysiologiques au niveau des feuilles du couvert végétal et utilisera des méthodes d'extraction de la profondeur optique de la végétation (VOD) basées sur des tours et utilisant des signaux micro-ondes GNSS (Humphrey et Frankenberg, 2023). PANGEA évaluera également l'extensibilité de ces mesures en utilisant des méthodes hyperspectrales et hyperfréquences aéroportées et spatiales. Les données thermiques et de fluorescence solaire induite (SIF) des tours et des satellites seront également utilisées pour évaluer les mesures diurnes et saisonnières de GPP et d'ET afin de contraindre davantage les produits de données et les métriques récupérés à partir de satellites tels qu'**ECOSTRESS** (par exemple, Fisher et al., 2020 ; Li et al., 2021) et les récupérations de SIF à partir de satellites tels qu'**OCO-2/3** et **TROPOMI** (Sun et al., 2018). Les produits contraints fourniront des données d'étalonnage précieuses pour l'humidité du sol télédéTECTée, l'écophysiologie des plantes, la PPG et l'ET à l'échelle régionale pour les modèles basés sur les processus.

## 3.2 Processus

### 3.2.1 Processus : Interactions et résilience des espèces

Bien que les forêts tropicales soient connues pour être des écosystèmes à forte biodiversité, la science et la technologie permettant de quantifier et de surveiller la biodiversité à grande échelle, ainsi que la compréhension du processus de médiation de la diversité structurelle et fonctionnelle dans les cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments, n'en sont qu'à leurs balbutiements. En outre, la plupart des modèles de biosphère terrestre représentent encore des forêts tropicales avec moins de types fonctionnels de plantes que les forêts tempérées (par exemple, Lawrence et al., 2019 ; Schaphoff

et al., 2018). Même lorsque les modèles représentent plusieurs stratégies d'histoire de vie, l'obtention d'une coexistence robuste dans les simulations reste un défi important (Koven et al., 2020 ; Li et al., 2023 ; Powell et al., 2018). Une partie de ce défi provient du fait que les plantes des forêts tropicales denses doivent rivaliser pour de multiples ressources limitantes (lumière, eau, nutriments) et qu'il existe de forts compromis entre l'acquisition des ressources, la croissance et la survie (Choat et al., 2018 ; Oliveira et al., 2021a). Ces compromis sont caractérisés par différents traits fonctionnels, mais la plupart des efforts visant à caractériser la distribution des traits à l'échelle régionale et mondiale ont abouti à un désaccord marqué dans les estimations pour les forêts tropicales (Dechant et al., 2024). En outre, les communautés végétales des différents continents ont des histoires évolutives distinctes (Slik et al., 2018), ainsi que des interactions plantes-animaux contemporaines uniques sur chaque continent tropical (Corlett & Primack 2006). Par exemple, en Afrique centrale, la mégafaune herbacée telle que les éléphants de forêt, en consommant de manière sélective des espèces à faible densité de bois et en favorisant la dispersion d'espèces végétales à grosses graines dont la densité moyenne de bois est élevée, peut directement et indirectement soutenir des forêts plus denses en carbone et contribuer à leur capacité de séquestration du carbone (Berzaghi et al., 2019). Les recherches suggèrent que la perte des mégaherbivores des forêts tropicales réduit les stocks de carbone des forêts tropicales de 9 % (Berzaghi et al., 2018, 2023). Cette perte de mégaherbivores pourrait avoir modifié les relations entre la biodiversité et la fonction forestière, mais cette hypothèse doit encore être testée. Les forêts tropicales subissent également des changements importants dus à la déforestation et à la dégradation des forêts. Des recherches antérieures ont indiqué que même des niveaux modestes de dégradation peuvent appauvrir considérablement la biodiversité dans les forêts tropicales (Barlow et al., 2016). Comprendre l'impact de ces pertes sur la capacité des forêts à se rétablir et à répondre à l'intensification des changements climatiques est une priorité de recherche essentielle. Bien qu'il y ait de plus en plus de preuves montrant le rôle de la faune sur les cycles biogéochimiques, en particulier les flux et la séquestration du carbone (Berzaghi et al., 2018, 2023 ; Schmitz et al., 2018), la mesure dans laquelle la faune affecte le cycle naturel du carbone reste un domaine de recherche active et n'est pas adéquatement représentée dans les GSE existants. Par conséquent, PANGEA répondra aux questions suivantes :

- **Q10.** Quel est le rôle de la **biodiversité** dans les variations des stocks et des flux de carbone des forêts tropicales à l'échelle locale, régionale et continentale ?
- **Q11.** Comment les **interactions plantes-animaux** influencent-elles la vulnérabilité ou la résilience des stocks et des flux de carbone des forêts tropicales ?
- **Q12.** Dans quelle mesure les **interactions entre les espèces** qui sous-tendent la fonction des forêts tropicales, y compris les interactions entre les modes de vie (arbres, lianes, palmiers, herbes/graminées et bambous) sont-elles vulnérables ou résilientes face aux changements climatiques et d'utilisation des terres ?
- **Q13.** Quels sont les **traits fonctionnels et les attributs structurels des plantes** qui confèrent une résilience au cycle du carbone, et comment varient-ils selon les types de forêts, les gradients environnementaux et verticalement au sein des forêts ?

En plus des mesures décrites dans la section 3.1.2, la caractérisation de la biodiversité à toutes les échelles combinera des mesures in situ comprenant la diversité taxonomique et l'abondance des plantes, ainsi que des données sur les déplacements des animaux, recueillies à l'aide de capteurs bioacoustiques, de pièges photographiques, d'ADN environnemental, de connaissances écologiques indigènes (IEK), des connaissances écologiques traditionnelles (CET), des connaissances écologiques

locales (CET), des lidars et des radars hyperspectraux aéroportés, des lidars et des radars hyperspectraux satellitaires (**EMIT, PRISMA, DESIS, PACE** et **Planet Tanager**) (**GEDI, EDGE\***, **NISAR\*** et **BIOMASS\***). Ces ensembles de données (voir *section 6*) permettront des estimations directes et indirectes de la biodiversité et fourniront des conditions initiales et des points de référence pour les modèles de biosphère terrestre basés sur les processus qui peuvent représenter la diversité structurelle et fonctionnelle (par exemple, BiomeE, ED/ED2, FATES ; *section 6.3*). Ces modèles seront ensuite utilisés pour développer la compréhension des processus et l'attribution du rôle de la biodiversité sur les flux de carbone, d'eau et d'énergie, et la manière dont ces relations varient à l'intérieur des continents et entre eux. Pour étudier comment la biodiversité et les changements de biodiversité induits par l'utilisation des terres influencent la résilience des forêts tropicales face aux extrêmes climatiques, PANGEA identifiera les paysages à travers les gradients de perturbation, climatiques et édaphiques, et quantifiera les relations émergentes entre la composition structurelle/fonctionnelle des forêts et la sensibilité des forêts aux extrêmes climatiques. Des indicateurs du stress hydrique et de la fonction des écosystèmes (*section 3.1.3*), par exemple, seront développés à l'aide de données provenant de **SMAP, SMOS, NISAR\*, AMSR-E, EMIT, ECOSTRESS, FLEX, TROPOMI** et **OCO- 2/3**. Ces relations seront appliquées pour contraindre les modèles inverses et les modèles de la biosphère terrestre basés sur les processus, permettant à ces modèles d'attribuer le rôle de la biodiversité dans l'atténuation des impacts du changement global sur le puits de carbone des terres tropicales.

### 3.2.2 Processus : Réactions entre les perturbations et les fonctions de l'écosystème

L'évolution des régimes de perturbation, notamment la sécheresse, les incendies, les tempêtes et les changements d'affectation des terres, remodèle les forêts tropicales. Les régions tropicales des différents continents ne réagissent pas de la même manière à des perturbations similaires, telles que les épisodes El Niño (Liu et al., 2017). Ces différences continentales peuvent être associées à des différences de résilience des forêts face à l'action humaine et au changement climatique (Bennett et al., 2021 ; Saatchi et al., 2021), mais les mécanismes qui sous-tendent les différences de vulnérabilité des forêts restent difficiles à cerner. De même, nous manquons de quantification des facteurs de mortalité des arbres à grande échelle et des raisons pour lesquelles la mortalité des arbres est plus élevée sur différents continents (McDowell et al., 2018 ; Gora et Esquivel-Muelbert 2021). Une partie de cette difficulté provient des limites d'échelle. Bien que les ouragans, les cyclones et les typhons produisent des perturbations dues aux tempêtes à grande échelle dans les forêts tropicales côtières, ils ne sont pas courants dans les principaux sites PANGEA des Amériques et de l'Afrique (Walsh et al. 2016). La plupart des perturbations liées aux tempêtes se produisent à très petite échelle ( $<0,1$  ha) (Espírito-Santo et al., 2014 ; Negrón-Juárez et al., 2018 ; Negron-Juarez et al., 2023). Ces perturbations à petite échelle sont trop faibles pour être détectées par les méthodes satellitaires contemporaines (Cushman et al., 2021). Les grands chablis forestiers en Amazonie peuvent s'étendre sur des centaines ou des milliers d'hectares et sont de plus en plus fréquents (Feng et al., 2023b ; Urquiza-Muñoz et al., 2024). Cependant, comparés aux petits chablis, les grands chablis sont rares. De nombreuses petites perturbations forestières dues à des tempêtes ne peuvent pas être attribuées de manière fiable à l'aide des méthodes traditionnelles de parcelles forestières en raison des intervalles généralement longs entre les recensements d'arbres (Arellano et al., 2021). Les données décrivant les mécanismes qui sous-tendent la vulnérabilité des arbres aux vents et à la foudre associés aux tempêtes sont également limitées (Gora et al., 2017 ; 2020b ; Jackson et al., 2019 ; 2021a, 2021b ; Feng et al.,

2023a). De manière plus générale, l'influence relative de la pénurie de carbone et de la défaillance hydraulique sur la mortalité des arbres sous les tropiques, ainsi que les moteurs et les mécanismes de ces influences, restent des lacunes majeures dans les connaissances (Anderegg et al., 2016 ; McDowell et al., 2018 ; Bauman et al., 2022). Il est essentiel de comprendre l'efficacité de l'utilisation du carbone et de l'eau des écosystèmes forestiers tropicaux, qui varie dans le temps, en relation avec les tendances de la mortalité des arbres et l'absorption et la respiration du carbone à l'échelle de l'écosystème, en particulier en réponse à des événements extrêmes, pour réconcilier la dynamique source-puits des forêts tropicales (Chambers et al., 2004 ; Peñuelas et al., 2010 ; Adams et al., 2019). Pour mieux comprendre les réponses distinctes des écosystèmes à la mortalité et aux perturbations, il faut disposer de données intégrées sur la mortalité des arbres, l'efficacité de l'utilisation du carbone et de l'eau, et les taux de récupération après perturbation couvrant les régimes de perturbation, les modèles de composition fonctionnelle et l'utilisation des terres. PANGEA répondra aux questions suivantes :

- **Q14.** Comment l'évolution des régimes de perturbation affecte-t-elle l'**efficacité de l'utilisation du carbone (CUE)** et l'**efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE)** de différentes forêts tropicales ?
- **Q15.** Comment les taux et les schémas de **mortalité des arbres** varient-ils au sein des forêts tropicales et d'une forêt à l'autre en réponse à des changements dans les processus de forçage, y compris le climat, les changements d'utilisation des terres et les régimes de perturbation ? Comment la variabilité temporelle et spatiale de la mortalité influence-t-elle l'hétérogénéité des stocks et des flux de carbone tropical dans les forêts tropicales ?

Pour caractériser la distribution spatiale et temporelle des perturbations liées au renouvellement et à la dégradation de la canopée sous les tropiques, PANGEA s'appuiera sur les efforts en cours pour quantifier la dégradation des forêts à petite échelle depuis l'espace à l'aide de l'apprentissage profond (par exemple, Dalagnol et al., 2023). Avec cette approche, PANGEA étudiera l'intégration de plusieurs sources de télédétection par satellite - données RVB et lidar des drones et des avions, données optiques commerciales à haute résolution, **Landsat**, **Sentinel-1**, **Sentinel-2**, **GEDI**, **NISAR\***, **BIOMASS\*** et **EDGE\*** - pour faire progresser la surveillance de la mortalité des arbres et des régimes de perturbation naturelle depuis l'espace, d'une manière qui a déjà été tentée avec des données lidar aéroportées (Dalagnol et al., 2021). Des modèles d'apprentissage en profondeur seront formés en combinant des mesures sur le terrain de la mortalité et des perturbations dans les paysages clés de PANGEA (section 6.3) avec des données sur la mortalité dans les parcelles d'inventaire sur le terrain. Pour étudier les relations émergentes entre les régimes de perturbation, le CUE et le WUE dans différents paysages, PANGEA combinera les produits de mortalité et de dégradation forestière avec des estimations à haute résolution du WUE et du CUE dérivées de données hyperspectrales, multispectrales et VOD aéroportées et spatiales, y compris **Landsat**, **ECOSTRESS**, **EMIT** et **AMSR-E**, et testera la robustesse de ces relations sur des sites avec des flux de covariance d'eddy et des inventaires de placettes forestières. Les données aéroportées, en particulier les données hyperspectrales, seront essentielles pour évaluer l'extensibilité de ces mesures à partir d'arbres ayant des efficacités d'utilisation du carbone et de l'eau différentes et variables, jusqu'à des écosystèmes entiers. Les cartes de dégradation des forêts dépendant de l'espace et du temps seront utilisées pour déterminer les taux de perturbation dans les modèles basés sur les processus. Les cartes de mortalité et les relations émergentes entre les taux de mortalité et les efficacités d'utilisation du carbone et de l'eau seront utilisées pour l'évaluation comparative des modèles le long des gradients d'influence environnementale et anthropique et sur les différents continents.

### 3.2.3 Processus : Dynamique et gestion de la récupération

Alors que le changement climatique augmente le taux de récurrence des perturbations naturelles, l'expansion de la déforestation et de la dégradation des forêts amplifie encore les régimes de perturbations climatiques dans les forêts tropicales (Armenteras et al., 2006 ; Portela & Rademacher, 2001 Jusys 2018 ; Hosonuma et al., 2012). Des perturbations plus fréquentes constituent une menace pour la résilience des forêts tropicales, avec le potentiel d'influencer les transitions critiques vers des états alternatifs (Verbesselt et al., 2016 ; Whitfield et al., 2019 ; Falk et al., 2022). Pour évaluer ces risques, il est toutefois impératif de quantifier de manière approfondie la fréquence des perturbations, la résistance de l'écosystème aux perturbations et le temps de récupération après les impacts des perturbations (Cole et al., 2014 ; Longo et al., 2018). Alors que de nombreuses recherches se sont concentrées sur les impacts des perturbations (par exemple, McDowell et al., 2018 ; Brando et al., 2014), de grandes incertitudes subsistent quant aux taux de rétablissement. Les forêts tropicales secondaires et dégradées en cours de régénération couvrent aujourd'hui environ 10 % de la superficie des forêts tropicales et présentent un important potentiel de puits de carbone (Heinrich et al., 2023). Des recherches antérieures menées sur le terrain ont indiqué que la trajectoire et les taux de régénération après perturbation, ainsi que les échelles de temps, varient considérablement sous les tropiques et dépendent de l'intensité et du type de perturbation (Poorter et al., 2016 ; Rutishauser et al., 2015). Outre les tempêtes, l'impact de la connectivité géographique des changements dans la gestion des terres à différentes échelles est également crucial. Par exemple, le passage de systèmes de culture intensive à des systèmes agroforestiers et à une gestion de la restauration (par exemple, l'intendance autochtone), ainsi que les interventions visant à la conservation, peuvent entraîner une restauration locale de la biodiversité et de la biomasse et une résilience accrue des systèmes qui soutiendront les moyens de subsistance locaux (par exemple, Ebeling & Yasué 2008 ; Santika et al., 2017 ; Mills et al., 2019 ; Pienkowski et al., 2024). Les régions tropicales jouent un rôle de plus en plus important dans l'agriculture mondiale (Alexandratos et Bruinsma, 2012 ; Berenguer et al., 2021a) et l'expansion agricole exerce une pression considérable sur les forêts tropicales en raison de l'augmentation de la demande mondiale de denrées alimentaires, de fibres et de biocarburants (Erb et al., 2024 ; Pendrill et al., 2022). L'intensification de l'agriculture pour répondre à la demande mondiale et aux moyens de subsistance locaux bénéficiera grandement des méthodes d'agriculture de précision et de la surveillance des cycles biogéochimiques (par exemple, le phosphore et l'azote) pour garantir des solutions durables. D'autre part, l'intensification de l'agriculture et les efforts visant à améliorer la durabilité peuvent également entraîner des fuites et le déplacement des perturbations vers d'autres zones géographiques (Ewers et Rodrigues, 2008 ; Gan et McCarl, 2007 ; Henders et Ostwald, 2014, Meyfroidt et al., 2020 ; Hertel et al., 2019). Pour combler les lacunes dans les connaissances relatives à la régénération après perturbation et à la résilience des forêts tropicales liées aux pratiques de gestion des terres, PANGEA se penchera sur les questions suivantes :

- **Q16.** Comment le type et l'intensité des perturbations - y compris les différentes utilisations des terres - influencent-ils **le temps de rétablissement après perturbation et la trajectoire** vers la restauration de la structure forestière, de la composition des espèces et de la fonction de l'écosystème ?
- **Q17.** Quelles sont les **activités humaines et les pratiques de gestion** qui favorisent la résilience du puits de carbone tropical, y compris l'utilisation de zones protégées et d'autres mesures de conservation basées sur les zones (OECM), telles que les pratiques des communautés autochtones et territoriales, les systèmes agroforestiers et les pratiques d'exploitation forestière sélective ?

Pour quantifier les échelles de temps de récupération après perturbation, PANGEA intégrera des données provenant d'inventaires sur le terrain dans les régions touchées par les perturbations avec des informations sur l'âge de la perturbation dérivées de la télédétection à long terme (par ex, **Landsat**) et des données de télédétection plus récentes sur la structure des forêts obtenues par lidar (lidar aéroporté, **GEDI**, **EDGE\***, **NISAR\*** et **BIO MASS\***), la composition des forêts obtenues par imagerie hyperspectrale (hyperspectrale aéroportée, **EMIT**, **PRISMA**, **DESIS**, **PACE** et **Planet Tanager**), la fonction des écosystèmes (**ECOSTRESS**, **TROPOMI**) et les systèmes agricoles (**Landsat**, **EMIT**, **NISAR\***, **Planet**) afin d'établir des chronoséquences dans les paysages à travers les gradients environnementaux et de gestion. Ces chronoséquences seront utilisées pour réduire les incertitudes dans les modèles basés sur les processus qui seront ensuite utilisés pour attribuer le rôle des facteurs environnementaux et des différentes caractéristiques des perturbations sur les échelles de temps de récupération dans le domaine PANGEA. En incorporant des contraintes sur la régénération dans les modèles, ceux-ci pourraient mieux simuler la régénération des forêts et les interactions complexes entre la composition des espèces, la structure des forêts et les facteurs environnementaux. Cela renforcera la capacité des modèles d'écosystème à projeter les futurs déplacements des stocks de carbone dans le cadre de régimes de perturbation modifiés et à informer les efforts de conservation et de restauration (Hérault et Piponiot, 2018 ; de Paula et al., 2015 ; Shi et al., 2024 ; Zhang et al., 2022).

S'inspirant d'une variété de cadres SES, PANGEA adoptera une perspective systémique centrée sur les rétroactions entre les systèmes humains (y compris la gouvernance, la politique, les marchés, les normes culturelles et les valeurs) et les processus environnementaux, afin de mieux comprendre comment les activités humaines et les pratiques de gestion influencent la résilience des paysages tropicaux. PANGEA s'appuiera sur les efforts en cours dans le cadre de diverses activités (par exemple, **NASA Harvest**, **SERVIR**) pour détecter les activités humaines et les agroécosystèmes, qui permettent de cartographier et de surveiller les ressources naturelles (Meemken et al., 2024) et de progresser dans la cartographie des types de cultures, des rendements et des risques de catastrophes (Jain et al., 2016 ; Azzari et al., 2017 ; Meza et al., 2020 ; Song et al., 2021), nécessaires pour assurer les moyens de subsistance et améliorer le bien-être des populations. Pour aborder la diversité des pratiques de gestion entre les différents acteurs des systèmes tropicaux, PANGEA s'appuiera sur la catégorisation mondiale existante des régimes de gestion (Lesiv et al., 2022) ainsi que sur des informations locales spécifiques concernant la diversité des options de mise en œuvre de ces différents régimes. PANGEA explorerá également des approches récentes pour extraire des informations socio-économiques à partir de données satellitaires (Yeh et al., 2020). En utilisant des méthodes qui intègrent des données de télédétection avec des informations et des connaissances in situ et d'autres informations auxiliaires, PANGEA fera progresser les mesures du système socio-écologique tropical et étudiera la causalité pour examiner si les rétroactions du SES soutiennent la résilience des puits de carbone tropicaux et d'autres processus de l'écosystème.

### 3.2.4 Processus : Réactions du cycle hydrologique

Les forêts tropicales jouent un rôle fondamental dans le cycle de l'eau (van der Ent et al., 2010 ; Spracklen et al., 2018), et les projections climatiques de CMIP6 indiquent une augmentation de la sécheresse et de l'humidité extrêmes dans différentes parties des tropiques (Vogel et al., 2020). La déforestation des forêts tropicales a un impact marqué sur les précipitations, qui dépend de l'ampleur de la déforestation (Spracklen et al., 2018). Les changements généralisés induits par la dégradation dans les flux d'eau et d'énergie pourraient également avoir un impact sur le recyclage des précipitations sous les tropiques, mais cette hypothèse n'a pas encore été testée. La dégradation des

forêts a un impact marqué sur l'évapotranspiration et les flux de chaleur sensible (Brando et al., 2019b ; Jucker et al., 2018b ; Longo et al., 2020 ; de Oliveira et al., 2021 ; Rangel Pinagé et al., 2023). Des études antérieures ont révélé une concordance encourageante de l'ampleur et de la variabilité saisonnière de l'évapotranspiration entre les estimations de télédétection et les tours de covariance de Foucault dans les forêts tropicales (Melo et al., 2021 ; Salazar-Martínez et al., 2022), mais elles s'appuient sur un nombre très limité de sites. En réalité, il existe des variations spatiales considérables dans l'ampleur et la saisonnalité de l'ET à l'échelle régionale et continentale (par exemple, Baker et al., 2021 ; Weerasinghe et al., 2020). Les effets combinés des modifications des régimes de précipitations, des températures plus chaudes et de l'expansion de la déforestation et de la dégradation des forêts ont une incidence sur les débits des cours d'eau, les habitats d'eau douce et la qualité de l'eau (Lima et al., 2014 ; Castello et Macedo, 2016) ; toutefois, l'ampleur prévue de ces incidences est incertaine (Guimberteau et al., 2017 ; Farinosi et al., 2019). Comprendre les effets nets des cycles hydrologiques sur les ressources en eau douce est également important d'un point de vue économique, car de nombreux pays des tropiques dépendent de l'hydroélectricité (Arias et al., 2020). Les études sur les ressources tropicales en eau douce sont concentrées dans la zone tropicale de l'Amérique du Sud et ont rarement été étudiées en Afrique et dans le bassin du fleuve Congo (Fugère et al., 2016). En outre, les modèles du système terrestre ont une capacité limitée à cartographier la distribution spatiale des précipitations dans les tropiques, car ils sont incapables de représenter les événements de précipitations extrêmes (Negron-Juarez et al., 2024), et il existe des différences marquées dans la façon dont les modèles représentent le recyclage des précipitations sur les continents (Baker et Spracklen, 2022). Les modèles nécessitent également des représentations précises de l'ET et du flux de chaleur sensible pour quantifier le recyclage des précipitations, ainsi que des produits de télédétection pour évaluer l'ET à l'échelle régionale. Pour combler ces lacunes, PANGEA répondra aux questions suivantes :

- **Q18.** Quels sont les **contrôles hydroclimatiques** directs et indirects sur les cycles du carbone (y compris les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>), de l'énergie et de l'eau dans les forêts tropicales ?
- **Q19.** Comment le **recyclage des précipitations** influence-t-il la résilience ou la **vulnérabilité du bilan carbone des forêts** face à l'**évolution des régimes de perturbation**, à la modification de l'occupation et de l'utilisation des sols et à l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ?
- **Q20.** Comment les changements climatiques et d'utilisation des sols modifient-ils les **propriétés biophysiques de la surface terrestre** qui influencent la force des interactions entre la terre et l'atmosphère ?
- **Q21.** Comment la **déforestation**, la **dégradation des forêts** et la **régénération des forêts** modifient-elles les **cycles hydrologiques** régionaux dans les régions tropicales, notamment les régimes de précipitations et les ressources en eau douce ?

Pour étudier les facteurs hydroclimatiques de la fonction des écosystèmes sous les tropiques, PANGEA intégrera des mesures météorologiques in situ et des mesures de covariance des tourbillons avec des récupérations par satellite du contenu en vapeur d'eau et des précipitations (**GOES-R**, **GPM**), de la température de la surface terrestre, de l'évapotranspiration et du stress évaporatif (**ECOSTRESS**) et du SIF (**FLEX\***, **TROPOMI**, **OCO- 2/3**). En outre, PANGEA utilisera les données **SMAP**, **SMOS**, **NISAR**, **AMSR-E** et **EMIT** pour mesurer l'humidité du sol, la teneur en eau du couvert végétal, les caractéristiques hydrauliques et le stress thermique. Pour quantifier davantage les propriétés biophysiques de la surface terrestre, PANGEA obtiendra également l'albédo de la surface et d'autres flux de rayonnement de surface à partir des données **VIIRS** et **GOES-R**. Les mesures hydrologiques de

surface de **SWOT** seront utilisées pour caractériser les masses d'eau terrestres tropicales (lacs, réservoirs, zones humides) et évaluer les ressources en eau douce. Ces ensembles de données seront utilisés en conjonction avec la structure forestière, la fonction et les changements de composition des espèces associés à la déforestation et à la dégradation des forêts (Section 3.2.3) pour évaluer les relations émergentes entre les différents types de couverture terrestre et les changements d'utilisation des terres avec les changements dans les précipitations et le stockage de l'eau à travers le domaine PANGEA. Ces ensembles de données fourniront également des conditions initiales et limites pour les modèles basés sur les processus (section 6.3) explorant l'étendue de la déforestation et de la dégradation des forêts et fourniront des repères sur les impacts de la déforestation et de la dégradation sur les cycles de l'eau, de l'énergie et du carbone à différentes échelles de paysage. Les mesures au sol, les données aéroportées et satellitaires obtenues grâce à PANGEA fourniront également des données essentielles pour évaluer la capacité des modèles du système terrestre à représenter le recyclage des précipitations sur les différents continents.

### 3.3 Projections

#### 3.3.1 Projections : Cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments

Les futurs modèles de précipitations sous les tropiques sont incertains, mais les simulations des modèles du système terrestre suggèrent que l'Amérique du Sud tropicale pourrait connaître des réductions des précipitations annuelles moyennes, tandis que les précipitations annuelles moyennes en Afrique centrale pourraient rester similaires ou même augmenter (Dobler et al., 2024). Toutefois, la stabilité des précipitations annuelles moyennes ne signifie pas la stabilité du cycle hydrologique. Par exemple, la saisonnalité des précipitations peut devenir plus prononcée avec une variabilité interannuelle plus forte (Gloor et al., 2013), et les tendances au réchauffement peuvent accroître la sécheresse de l'atmosphère et du sol, même si les précipitations restent similaires aux moyennes historiques (Cook et al., 2020 ; Ukkola et al., 2020). Les effets du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur l'hydroclimat dépendent de multiples facteurs en interaction et sont incertains. Par exemple, un taux élevé de CO<sub>2</sub> peut réduire la transpiration au niveau des feuilles en raison d'une conductance stomatique plus faible (Sampaio et al., 2021), mais les modifications de l'indice de surface foliaire et du nombre de stomates affecteront également la réponse au niveau de l'écosystème (Li et al., 2018). La déforestation et la dégradation des forêts dans l'ensemble de l'Amazonie (Spracklen et al., 2018 ; Baudena et al., 2021) pourraient potentiellement avoir une incidence sur les précipitations en raison d'impacts majeurs sur l'évapotranspiration, l'interception de la canopée, le ruissellement et le stockage de l'eau (Heerspink et al., 2020), bien qu'il y ait une grande incertitude sur l'ampleur de cet effet dans les études de modélisation (par exemple, Pires et Costa 2013 ; Swann et al., 2015).

Les changements dans l'hydroclimat, le CO<sub>2</sub> atmosphérique, la couverture terrestre et les changements d'utilisation des sols interagissent également avec les changements dans le cycle des nutriments, et il est essentiel de comprendre ces rétroactions. La disponibilité du phosphore et du potassium influence la productivité primaire nette pendant les sécheresses (Manu et al., 2024), et l'azote peut être un facteur limitant important dans les forêts secondaires (Davidson et al., 2007). Les recherches suggèrent que les effets de la fertilisation par le CO<sub>2</sub> peuvent être considérablement réduits lorsque le phosphore est un facteur limitant (Yang et al., 2016 ; Fleischer et Terrer, 2022). Toutefois, notre compréhension des rétroactions entre le cycle des nutriments et d'autres facteurs (climat, fertilisation au CO<sub>2</sub> et changement de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres)

proviennent d'expériences de manipulation petites et localisées, ce qui rend difficile l'adaptation à des paysages très hétérogènes et à des échelles continentales (Townsend et al., 2008). En intégrant des mesures coordonnées à travers les paysages et les échelles, PANGEA répondra aux questions suivantes :

- **Q22.** Comment les changements dans les régimes de précipitations, l'augmentation des températures et la modification de la dynamique des perturbations dans les forêts tropicales modifieront-ils **le bilan hydrique terrestre** par le biais de changements dans le calendrier et la durée des précipitations saisonnières, l'évapotranspiration et l'humidité du sol ?
- **Q23.** Comment les **changements futurs de la végétation**, y compris la déforestation, la dégradation et la repousse, influeront-ils sur le climat et l'hydrologie à l'échelle locale, régionale et continentale ?
- **Q24.** Comment l'augmentation des températures, du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et des événements climatiques extrêmes influencera-t-elle la **disponibilité des nutriments** et les **interactions entre le sol et la végétation** ?

Étant donné que ces questions exploreront les simulations des changements futurs dans les tropiques, PANGEA utilisera des modèles basés sur les processus (section 6.3) qui seront entièrement intégrés à la télédétection (section 6.2). Par exemple, pour initialiser les modèles mécanistes basés sur les cohortes et les individus avec une structure et une composition forestières réalistes et observées à travers les gradients environnementaux, PANGEA intégrera des données multispectrales, hyperspectrales, lidar et radar collectées à la fois par les campagnes aéroportées de PANGEA et par les mesures satellitaires (**GEDI**, **EMIT**, **VIIRS**, **Sentinel-3**, **NISAR\***, **SBG** visible to shortwave infrared [**VSWIR\***] imaging). Les relations émergentes basées sur la télédétection concernant la structure, la composition et la fonction des forêts (Section 3.1.2) ainsi que les variables hydroclimatiques et de stress hydrique télédéTECTées (Section 3.1.3) seront utilisées pour évaluer et réduire l'incertitude du modèle. En outre, les concentrations de nutriments dans la canopée estimées à partir de récupérations de télédétection hyperspectrale guidées par des caractéristiques géomorphologiques dérivées du lidar seront utilisées pour informer sur les modèles et les moteurs de la distribution des nutriments dans des paysages forestiers tropicaux hétérogènes. Les modèles optimisés seront ensuite appliqués à une série de simulations représentatives afin de quantifier et de distinguer les rôles des changements climatiques, du CO<sub>2</sub> atmosphérique, de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres dans les changements des cycles biogéophysiques et biogéochimiques.

### 3.3.2 Projections : Résilience hétérogène des forêts

Le changement climatique et l'expansion de la déforestation et de la dégradation des forêts sous les tropiques exposeront probablement les forêts à des perturbations anthropiques et naturelles plus fréquentes (Seidl et al., 2017 ; Lapola et al., 2023). Les changements généralisés des régimes de perturbation auront des effets profonds sur la structure, la composition et la fonction des écosystèmes, et à leur tour sur les nombreux services écosystémiques locaux, régionaux et mondiaux fournis par les forêts tropicales (Malhi et al., 2014). Toutefois, l'impact à long terme de l'évolution des régimes de perturbation sur les forêts tropicales dépendra en fin de compte de plusieurs facteurs qui sont encore mal compris dans les écosystèmes tropicaux : (1) l'impact relatif des changements d'intensité et de fréquence des perturbations (Williams et al., 2013) ; (2) la variabilité de la résilience aux perturbations et de la récupération après perturbation entre les espèces et les paysages (Anderson-Teixeira et al., 2013, Powell et al., 2018 ; Liu et al., 2022) ; (3) les interactions entre de multiples perturbations ayant

un impact sur la même région ; (4) les rétroactions entre les changements de structure et de composition des forêts induits par les perturbations et les perturbations ultérieures ou supplémentaires (Silvério et al., 2019 ; Brando et al., 2020b) ; et (5) les incidences des perturbations sur les services écosystémiques et les moyens de subsistance des populations (Mamalakis et al., 2021). Pour améliorer les capacités de modélisation, il est essentiel d'améliorer la quantification basée sur l'observation et la compréhension des processus de ces facteurs. Par conséquent, la recherche dans le cadre de PANGEA abordera les questions suivantes :

- **Q25.** *Dans un climat changeant, quels **types de forêts fonctionnellement distincts** sont les plus vulnérables pour devenir des sources nettes de carbone dans l'atmosphère, quels types de forêts sont résilients, et pourquoi ?*
- **Q26.** *Comment le réchauffement climatique et l'évolution des phénomènes extrêmes interagiront-ils avec l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols pour influencer l'**évolution des régimes d'incendie** et leurs rétroactions avec la fonction forestière et le climat ?*
- **Q27.** *Comment les changements climatiques et les événements extrêmes futurs influenceront-ils le cycle du carbone dans les forêts tropicales, et quel est le seuil à partir duquel cela entraînera **une transition à grande échelle** dans la composition fonctionnelle et/ou les régions deviendront une source nette de carbone ?*
- **Q28.** *Comment les changements climatiques et d'utilisation des terres vont-ils interagir avec l'évolution de la vulnérabilité des forêts tropicales pour influencer la disponibilité des services écosystémiques et l'accès aux **co-bénéfices socio-écologiques**, y compris la disponibilité de l'eau, la production agricole, la santé humaine, la réduction des risques de catastrophe et les pratiques culturelles ?*

Des modèles de processus et de systèmes socio-écologiques (par exemple, des modèles basés sur des agents, bioéconomiques, de déséquilibre ou de réseau) seront utilisés pour quantifier les impacts des changements dans les régimes de perturbation sur les forêts tropicales hyper-diverses, et les conséquences pour les provisions et les services de l'écosystème qui peuvent avoir un impact sur les activités économiques et les moyens de subsistance des peuples indigènes et des communautés locales. Pour les modèles basés sur les processus, PANGEA utilisera la même approche que celle décrite dans la section 3.3.1 pour générer des conditions initiales et limites. De même, les relations émergentes entre la diversité fonctionnelle et les taux de récupération seront dérivées en utilisant des données provenant de mesures au sol et de recherches socio-écologiques menées avec des chercheurs et des communautés locales, de campagnes aéroportées combinées avec des flux de données de SIF (**TROPOMI, OCO-2/3, FLEX\***), de mesures infrarouges thermiques (**ECOSTRESS, GOES-R, MTG- I**), et des chronoséquences de récupération des écosystèmes basées sur la télédétection (Section 3.2.3). Pour quantifier l'impact des forêts tropicales sur les avantages sociaux-écologiques, PANGEA mènera des recherches intégrées sur les systèmes sociaux-écologiques afin de mieux comprendre les modèles et l'influence de l'utilisation des terres et de ses changements, y compris la déforestation, la dégradation, la restauration des forêts, la sécheresse et les inondations, les régimes d'incendie et les températures extrêmes à travers les biomes tropicaux. PANGEA étudiera également les rétroactions entre les systèmes sociaux et écologiques, de la gestion forestière traditionnelle, locale et autochtone aux systèmes industriels, et la manière dont ces systèmes affectent la résilience des écosystèmes et la fourniture de services écosystémiques. PANGEA intégrera des données sociales et écologiques dans les modèles existants (par exemple, Andersen et al., 2017 ; von Essen et Lambin, 2023) et développera de nouveaux modèles pour saisir les rétroactions au sein des

systèmes socio-écologiques dans différentes conditions économiques, culturelles, environnementales et de gouvernance.

## 4 Progrès scientifiques et techniques de PANGEA

PANGEA s'appuiera sur des décennies d'efforts scientifiques, y compris de grands projets tels que LBA (Avissar et al., 2002 ; Davidson et al., 2012), des réseaux internationaux de placettes d'inventaire forestier (par exemple, ForestPlots.net et al, 2021), et de multiples efforts de développement de modèles, y compris (mais sans s'y limiter) le Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la NASA, le GISS BiomeE de la NASA (Weng et al., 2022) et le modèle FATES soutenu par le DOE en cours de développement dans le cadre de NGEE-Tropics (Koven et al., 2020 ; Huang et al., 2020 ; Xu et al., 2023 ; Knox et al., 2024 ; Shuman et al., 2024). Malgré ces efforts, les tentatives d'évaluation de la résilience des forêts tropicales aux perturbations ont donné des résultats contradictoires. Des études de terrain suggèrent que les forêts d'Afrique centrale pourraient être plus résistantes à l'évolution des conditions climatiques et constituer un puits de carbone à plus long terme que d'autres forêts tropicales (Hubau et al., 2020 ; Bennett et al., 2021). Toutefois, des études de télédétection par satellite indiquent que les forêts d'Afrique centrale sont tout aussi sensibles aux anomalies climatiques que l'Amazonie et d'autres régions forestières tropicales (Liu et al., 2017 ; Palmer et al., 2019). Les incohérences entre les mesures de terrain et les observations satellitaires doivent être réconciliées pour prédire l'impact du changement climatique sur le rôle de ces forêts dans les cycles mondiaux du carbone et de l'eau. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces incohérences, notamment (1) l'évolution des taux de mortalité des arbres, (2) la sensibilité différente de la photosynthèse, des taux de respiration et d'autres processus écosystémiques (qui modifient les flux nets de carbone et d'eau) aux perturbations naturelles et anthropogéniques, (3) les intensités et modèles différents de déforestation et de dégradation sur la structure et la fonction des écosystèmes, (4) les différentes trajectoires évolutives qui ont entraîné une biodiversité unique et des interactions entre espèces qui influencent directement la résilience des écosystèmes (par ex, l'abondance variable de la mégafaune dans les forêts tropicales), et (5) des données spatiales et temporelles limitées et des modèles incomplets ou sous-développés.

PANGEA étudiera les facteurs qui pourraient expliquer les différences dans les réponses des forêts tropicales sur les différents continents, les incohérences (notées ci-dessus), et d'autres facteurs déterminés par la communauté PANGEA, en ajoutant une vue pan-tropicale acquérant de nouvelles connaissances à partir de mesures de télédétection multidimensionnelles améliorées avec des mesures colocalisées et coïncidentes et des analyses novatrices. PANGEA met l'accent sur l'intégration des mesures au sol et des ensembles de données de télédétection pour les forêts tropicales, en soutenant le développement d'algorithmes et de modèles de télédétection, ainsi que l'intégration des données de modèles. Nous prévoyons des avancées scientifiques significatives grâce à la coordination et à la colocalisation des mesures à distance et au sol, ainsi qu'à l'utilisation des informations des parties prenantes, y compris celles provenant des connaissances écologiques autochtones, traditionnelles et locales, dans le cadre d'un effort scientifique collaboratif qui donne la priorité à la transdisciplinarité. Pour faire progresser les capacités et les solutions scientifiques et technologiques, PANGEA s'engage à

- **Élucider** les modèles de changements récents (5-30 ans) et en cours dans les paysages, les dynamiques et les rétroactions des forêts tropicales, ainsi que leurs différences géographiques, en mettant l'accent sur les comparaisons entre les Amériques et l'Afrique.
- **Mieux** comprendre les processus qui contrôlent l'hétérogénéité et la vulnérabilité des paysages forestiers tropicaux aux changements structurels et fonctionnels.
- **Améliorer les** capacités de télédétection pour mesurer, cartographier et surveiller la biodiversité, la dynamique du cycle du carbone et les systèmes agricoles.
- **Fournir des** projections améliorées des changements futurs dans les paysages forestiers tropicaux, qui engloberont les rétroactions dans les climats locaux, régionaux et mondiaux et les systèmes socio-écologiques.

*Ces progrès scientifiques seront rendus possibles par les progrès techniques :*

- **l'intégration** des données recueillies au sol et par télédétection, ce qui permet de calibrer de manière plus fiable les variables obtenues par télédétection ;
- **Mise à l'échelle des** données et des flux de travail pour l'analyse intégrée des données terrestres et de télédétection ;
- **Progrès** dans l'utilisation de l'IA et de l'apprentissage automatique pour l'assimilation, la fusion et la mise à l'échelle des données ;
- **Développement d'**une intégration données-modèles qui améliore la représentation des composantes fonctionnellement importantes de la diversité des forêts tropicales et qui sont modulables grâce à la télédétection ;
- **Amélioration de la** précision et de la validation, et **affinement** des estimations d'incertitude pour les produits de données dérivées de la télédétection.

PANGEA caractérisera la structure et la fonction des écosystèmes dans de multiples dimensions, des écosystèmes forestiers tropicaux intacts aux écosystèmes dégradés, et des écosystèmes à forte diversité aux écosystèmes à faible diversité. PANGEA mesurera la diversité taxonomique et phylogénétique des arbres, ainsi que les taux démographiques de la végétation, à l'aide de données de terrain existantes provenant de parcelles d'inventaire forestier à long terme, et la diversité fonctionnelle et structurelle à l'aide de la télédétection. L'imagerie hyperspectrale de télédétection et les mesures in situ des traits foliaires permettront de cartographier les traits de la canopée et les communautés fonctionnelles distinctes, et d'évaluer des modèles évolutifs en tirant parti des mesures satellitaires. Grâce à ces résultats, nous caractériserons les différences entre les gradients abiotiques, d'utilisation des sols et biotiques. Les améliorations qui en résulteront dans notre compréhension de la distribution des caractéristiques amélioreront nos modèles de flux d'écosystèmes sous l'effet du changement climatique et des forçages de changement d'utilisation des terres et nous permettront d'évaluer les différences dans les réponses de l'écosystème. Grâce à cette combinaison de mesures et de modèles, PANGEA étudiera comment les différentes structures et fonctions des forêts tropicales influencent leur stabilité face aux impacts de l'utilisation des terres et du changement climatique.

L'intégration des données de télédétection et des données au sol dans le développement et l'évaluation des modèles fait partie intégrante de PANGEA (section 6.3). Les mesures in situ et de télédétection (par exemple, hyperspectrale et lidar) à travers les gradients critiques seront utilisées pour réduire l'incertitude des paramètres et fournir des conditions initiales et limites pour les modèles basés sur les processus. Les équipes PANGEA utiliseront des modèles d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour obtenir des ensembles de données de synthèse qui mettent à

l'échelle les mesures effectuées sur les sites PANGEA intensifs et les sites partenaires pour les domaines PANGEA centraux et étendus à l'aide de la télédétection par satellite. Ces ensembles de données de synthèse seront utilisés pour paramétriser et étalonner les modèles basés sur les processus et les modèles de systèmes socio-écologiques à grande échelle, et fourniront des conditions limites pour les modèles inverses. L'intégration des modèles et des données sera fondamentale pour répondre aux questions clés de PANGEA (section 3), qui serviront de base à de nombreuses études visant à (1) comprendre le rôle de la diversité structurelle et fonctionnelle dans le contrôle des cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments des forêts tropicales ; (2) étudier comment l'augmentation des niveaux de CO<sub>2</sub> et la hausse des températures affectent spécifiquement les taux de piégeage du carbone dans les forêts tropicales ; (3) quantifier les impacts des événements extrêmes, tels que les sécheresses sévères, sur la santé des forêts et les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> ; (4) faire progresser la compréhension des conséquences de la déforestation et de la dégradation des forêts sur la biodiversité, les cycles biogéophysiques et biogéochimiques, les services écosystémiques et l'hydroclimat ; (5) évaluer l'efficacité des stratégies de restauration sur la résilience des forêts tropicales et l'atténuation du changement climatique ; et (6) caractériser le risque que les forêts tropicales atteignent des transitions critiques vers des états alternatifs en raison du changement climatique, de la déforestation et de la dégradation des forêts, et déterminer le rôle de la biodiversité dans l'atténuation de ces vulnérabilités.

## 5 Rôle essentiel de la télédétection de la NASA

*PANGEA vise à déterminer si les différentes forêts tropicales connaîtront le même sort ou si elles réagiront différemment aux effets du changement climatique et de l'utilisation des sols, en se concentrant particulièrement sur les continents africain et américain, qui abritent les deux plus grandes forêts tropicales de la planète.*

L'identification des processus à l'origine de la stabilité des forêts tropicales est primordiale pour limiter l'incertitude des prévisions de la dynamique future du flux de carbone terrestre. Pour réconcilier les différences entre les ensembles de données terrestres et satellitaires, pour améliorer les stratégies de mise à l'échelle, pour faire progresser la surveillance future et pour caractériser comment et pourquoi les forêts tropicales d'Afrique centrale et d'Amérique diffèrent dans leur résistance à un changement climatique rapide, nous avons besoin de récupérations aériennes coordonnées. Par exemple, une résolution spatiale suffisamment élevée (~2-5 m) est nécessaire pour mettre à l'échelle la dynamique des feuilles et des arbres au niveau des organismes et des paysages, en servant d'intermédiaire entre les mesures sur le terrain et les observations par satellite (**Figure 14**). PANGEA s'appuie directement sur les développements et les succès de la NASA ABoVE en Amérique du Nord (par exemple, Virkkala et al., 2021 ; Peltola et al., 2019 ; Braghieri et al., 2023), qui ont permis de jeter un nouvel éclairage sur des systèmes arctiques jusqu'alors peu étudiés.

Pour atteindre ses objectifs scientifiques, PANGEA s'appuiera sur le programme scientifique aéroporté de la NASA pour obtenir des données à haute résolution à partir de systèmes hyperspectraux, de lidars à faible encombrement, de radars à synthèse d'ouverture (SAR) et d'autres systèmes de télédétection au-dessus des forêts tropicales d'Afrique centrale et des Amériques. L'obtention de données à haute résolution spatiale.. et spectrale- dans ces régions permet une évaluation sans précédent de la dynamique forestière, notamment des flux, de la croissance, de la mortalité et des stratégies fonctionnelles (par exemple, l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de l'eau, la

phénologie) à la résolution des arbres individuels dans de vastes paysages qui varient en termes de composition des espèces, de caractéristiques du sol, de topographie, de régimes de perturbation et d'interactions avec l'homme.

La couverture nuageuse persistante est un problème important lors de l'utilisation des données spatiales  $\text{XCO}_2$  et  $\text{XCH}_4$  pour contraindre les flux de gaz à effet de serre tropicaux (p. ex. Rayner et al., 2002 ; Qu et al., 2021). Même à la plus haute résolution spatiale des capteurs actuels des satellites en orbite basse qui récupèrent  $\text{XCH}_4$  (par exemple **TROPOMI** [3,5 km × 7,0 km]) et  $\text{XCO}_2$  (par exemple **OCO-2** [1,3 km × 2,2 km]), plus de 95 % des informations récupérées sont filtrées en raison des nuages dans les tropiques (Qu et al., 2021). Les capteurs satellitaires  $\text{XCO}_2$  et  $\text{XCH}_4$  à plus haute résolution spatiale, tels que le satellite MethaneSat récemment lancé (100 m × 400 m), amélioreront considérablement la capacité à récupérer les flux tropicaux à travers les lacunes des nuages. D'autres capteurs satellitaires de cartographie ponctuelle (par exemple **EMIT**, **GHGSat**, **Carbon Mapper**, **PRISMA**) ont été lancés avec une résolution spatiale très élevée (<100 m × 100 m). Toutefois, ces observations en mode cible ne fourniront pas la couverture mondiale nécessaire pour limiter les bilans de gaz à effet de serre dans les zones tropicales. La couverture nuageuse affectera également les estimations de la température et de l'évapotranspiration de la surface terrestre obtenues par télédétection thermique, ce qui nécessitera des approches de correction des biais (Van Niel et al., 2012).

PANGEA obtiendra une grande variété d'observations aériennes et terrestres coïncidant avec le passage de satellites existants de la NASA (par exemple, **OCO-2/3**, **EMIT**, **PACE**, **VIIRS**, **SMAP**, **GRACE**, **SWOT**, **AMSR-E**, **AMSR2**, **ICESat-2**, **Landsat**, **GEDI**), internationaux (par exemple, TROPOMI, GOSAT, CO2M, RADARSAT, Envisat, PRISMA, DESIS) et commerciaux (par exemple, **GHGSat**, MethaneSat), ainsi que d'autres satellites, **TROPOMI**, **GOSAT**, **GOSAT-2**, **CO2M**, **RADARSAT**, **Envisat**, **PRISMA**, **DESIS**) et commerciaux (p. ex. **GHGSat**, **MethaneSat**, **WorldView**, **QuickBird/GeoEye**, **Planet**). Ces observations contribueront à la validation des données récupérées par ces satellites sur la structure des forêts, les caractéristiques foliaires, la diversité des forêts, l'inondation, les précipitations, la dynamique des perturbations et la composition de l'atmosphère. Elles permettront également d'évaluer la capacité des futurs capteurs satellitaires prévus (par exemple, **NISAR**, **SBG**, **BIOMASS**, **CHIME** (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment), **GLIMR**, **FLEX**, **Carbon Mapper**) et les stratégies d'observation. PANGEA permettra d'étudier les caractéristiques requises des instruments (par exemple, précision, exactitude, résolution spatiale/spectrale) et les stratégies d'observation (par exemple, orbite terrestre basse ou géostationnaire) pour surveiller les émissions de gaz à effet de serre et les nombreuses variables qui déterminent la dynamique source-puits dans les régions tropicales.

## 6 Stratégie de recherche et conception de l'étude

À l'instar des projets précédents de la NASA, PANGEA permettra aux chercheurs d'étudier les principales questions scientifiques (section 3) en répondant aux appels à propositions de la NASA. Des cofinancements seront recherchés, c'est pourquoi nous présentons une conception modulaire et flexible du projet. La recherche intégrera des investigations scientifiques au sol, aéroportées et par satellite, ainsi que des modèles permettant une interprétation efficace des données satellitaires actuelles et futures. S'inspirant d'anciens projets de la NASA dans les tropiques, PANGEA sera conçu en collaboration avec des institutions et des partenaires locaux afin de faciliter les collaborations et

d'établir de nouvelles relations au sein de la communauté scientifique, en mettant particulièrement l'accent sur les interactions entre les scientifiques des États-Unis et ceux des pays forestiers tropicaux. Tout au long de la définition scientifique et des années de projet, PANGEA s'efforcera d'impliquer et de former les scientifiques en début de carrière, tant des États-Unis que des institutions locales de la forêt tropicale. PANGEA laissera un héritage de données ouvertes, de science ouverte, de renforcement des capacités et de partenariats renforcés, fournissant une base solide pour la recherche future.

## 6.1 Approche globale de l'étude

**La compréhension des forêts tropicales à l'échelle mondiale et à l'échelle politique nécessite la télédétection par satellite.**

L'utilité de la télédétection des forêts tropicales dépend de l'intégration des données et des connaissances à plusieurs échelles. L'abondance de nouvelles données satellitaires, aériennes et terrestres peut désormais être associée à de nouvelles capacités d'analyse des données. La capacité d'effectuer des analyses numériques intensives est également beaucoup plus grande que pour les projets TE de la NASA précédents, tels que le LBA, grâce à l'informatique en nuage, aux ressources informatiques avancées et à l'évolution rapide des capacités d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle pour la classification, la régression et la prédiction. Cependant, la rareté des observations et des données d'étiquetage pour l'entraînement et la validation des modèles d'IA gourmands en données, et la connaissance limitée des processus écologiques pour les régions tropicales à ce jour, ont conduit à des défis importants dans l'amélioration des produits satellitaires et l'interprétation des résultats scientifiques glanés à partir de ces produits. Il existe encore des disparités d'échelle pour les données recherchées par presque tous les satellites au-dessus des tropiques. Pour surmonter ces limitations et faire progresser l'utilité de la télédétection par satellite sur les biomes forestiers tropicaux, PANGEA s'appuie sur des approches de mise à l'échelle développées lors de précédents projets de terrain TE de la NASA tels que BOREAS, LBA et ABoVE. PANGEA réconciliera les déséquilibres d'échelle grâce à des mesures colocalisées au sol, à la tour, au drone, à l'avion et au satellite, en combinaison avec des progrès dans la compréhension des processus qui sous-tendent la théorie de la mise à l'échelle. Le reste de la section 6 décrit la stratégie de mise à l'échelle de la science (section 6.1.1), le calendrier théorique (section 6.1.2), les mesures scientifiques essentielles à toutes les échelles (section 6.2), ainsi que l'approche de modélisation, de synthèse des données et d'analyse intégrative pour relier le tout (section 6.3).

### 6.1.1 Stratégie de mise à l'échelle de la science de PANGEA

**Le plan d'échantillonnage imbriqué de PANGEA et la stratégie de la science à l'échelle offrent des possibilités de faire progresser la surveillance par satellite, le développement de produits, l'assimilation de données et l'évaluation comparative des processus dans les modèles d'écosystème de la prochaine génération. Ces avancées peuvent améliorer de manière significative la capacité des parties prenantes à appliquer les modèles pour améliorer la compréhension et la prévision à long terme des processus.**

La stratégie scientifique à l'échelle de PANGEA met en œuvre une approche de systèmes intégrés qui englobe des mosaïques de paysages complexes allant des forêts aux zones humides et aux tourbières, des forêts intactes aux forêts perturbées, et des systèmes agricoles et socio-écologiques. Pour s'assurer que les processus sont saisis à travers une grande diversité de conditions environnementales et de sources de données multiples (capteurs au sol, tours, drones et avions), les projets de terrain et aériens de PANGEA incluront un échantillonnage sur des gradients de structure et de fonction des écosystèmes, de climat, de géomorphologie et de sols, de disponibilité des nutriments et de régimes de perturbation. L'intégration de cette variabilité est essentielle pour la mise à l'échelle régionale et pan-tropicale et pour informer les modèles et s'assurer qu'ils peuvent être évalués et comparés dans différentes conditions, réduisant ainsi le risque d'équifinalité - obtenir les bonnes réponses en compensant pour les mauvaises raisons. Le choix des gradients prioritaires tiendra compte des incertitudes actuelles des modèles et des nouveaux processus qui n'ont pas encore été évalués à l'aide de données de télédétection à l'échelle (par exemple, les changements temporels de la structure et de la composition de la canopée et leur impact sur les flux d'énergie, d'eau et de carbone ; les réponses hydrauliques des plantes à la variabilité du climat).

**Les données de télédétection suborbitale (par exemple, drone et avion) sont essentielles pour établir une correspondance entre les mesures au sol et les données satellitaires à résolution plus grossière. PANGEA s'appuie sur des projets aériens et de terrain très réussis de la NASA en Afrique et dans les Amériques, notamment SAFARI 2000, AfriSAR-1 et -2, BioSCape et plusieurs missions Earth Venture Suborbital (EVS).**

Les différences entre l'empreinte d'environ 1 km des flux de covariance des tourbillons et les récupérations satellitaires à une résolution de >2 km de la productivité primaire brute, des flux de méthane et de la respiration de l'écosystème nécessitent une réconciliation (par exemple, Li et al., 2018). De même, la récupération des attributs structurels au niveau des arbres et des couronnes à partir du lidar est nécessaire pour relier les processus et la dynamique des organismes aux réponses de l'écosystème observées à l'échelle du paysage. En outre, il a été démontré que la variation verticale de la structure forestière varie en fonction de la fonction de l'écosystème, même si les mesures intégrées verticalement, telles que l'indice de surface foliaire (LAI), ne le font pas (Ordway et al., 2022). Le lidar spatial fournit des observations à l'échelle de la communauté qui, bien qu'incroyablement précieuses, restent insuffisantes pour être associées à des mesures *in situ* au niveau de l'arbre. Comme ces données spatiales dépassent les dimensions d'une couronne d'arbre, elles ne permettent pas d'extraire des métriques au niveau de la couronne et de l'arbre, ou des métriques d'écosystème à échelle fine telles que la détection de lacunes dans la canopée et la mortalité des arbres.

Un autre exemple est l'utilisation de données de télédétection hyperspectrales pour estimer les paramètres de la biodiversité. Les récupérations hyperspectrales du sommet de la canopée à partir d'EMIT, de PACE, de SBG et de CHIME ont le potentiel de produire des récupérations directes de la diversité spectrale des plantes (Cawse-Nicholson et al., 2021 ; Schimel et al., 2020), qui peut également être utilisée pour estimer la diversité des écosystèmes (Féret et Asner, 2014) et la diversité bêta (Schweiger et Laliberte, 2022), la diversité fonctionnelle des plantes (Cawse-Nicholson et al., 2021 ; Rocchini et al., 2022 ; Thompson et al., 2021) et, dans certains cas, la diversité taxonomique des plantes (Schimel et al., 2020 ; Rossi et Gholizadeh, 2023). La fusion de ces extractions et métriques avec des données et des connaissances sur les mouvements des animaux, les interactions plantes-

animaux, l'assemblage des communautés multi-taxons et la variation structurelle des écosystèmes provenant des IEK, TEK et LEK, ainsi que de l'ADN électronique, de la bioacoustique, des pièges photographiques et d'autres ensembles de données de télédétection (par exemple, **GEDI**, **NISAR**, **SWOT**) a le potentiel de produire des estimations et des proxys indirects supplémentaires de la biodiversité. Cette approche intégrative peut, par exemple, améliorer la mise en œuvre des programmes d'incitation basés sur le carbone (Castro-Magani et al., 2021), ou améliorer les services nationaux et maximiser les avantages pour la société (Schiavon et al., 2023). Cependant, les données d'étalonnage et de validation dans les tropiques, pour tester la généralisation des algorithmes existants, font actuellement défaut. Par exemple, la résolution spectrale, la taille des pixels et la coexistence de plusieurs espèces d'arbres dans un pixel donné, ou la résolution temporelle pour quantifier les processus diurnes caractéristiques associés à ces espèces doivent être correctement prises en compte (Schimel et al., 2020 ; Rocchini et al., 2022). La diversité des membres finaux est une approche qui permet de relever certains de ces défis (Rossi et Gholizadeh, 2023). En outre, les cartes des traits fonctionnels doivent encore être estimées à l'aide de modèles calibrés pour des sites spécifiques sur la base de mesures *in situ* des traits foliaires (par exemple, Chadwick et Asner 2016a), et très peu de travaux ont été menés pour explorer la fusion de types de données disparates afin de développer des métriques ou des proxys basés sur les processus (Mairotta et al., 2015 ; Schimel et al., 2020 ; Ordway et al., 2022 ; Portillo-Quintero et al., 2022).

**PANGEA assurera la coordination avec les cadres d'évaluation existants, faciliter la normalisation des méthodes de collecte de données.**

L'équipe EMIT de la NASA travaille activement avec le National Ecological Observatory Network (NEON) pour développer des flux de travail de mise à l'échelle entre NEON et les données satellitaires en préparation de la prochaine mission Surface Biology and Geology (SBG) de la NASA. Les acquisitions terrestres et aériennes de PANGEA étendront ces flux de travail aux tropiques. PANGEA sera également coordonné avec les efforts existants financés par la NASA, tels que **CMS4D**, un système prototype de fusion de données à plusieurs échelles pour la surveillance de la dynamique du carbone depuis l'espace. CMS4D, dirigé par Carlos Alberto Silva, est une étude de cas dans le Cerrado brésilien axée sur la dynamique des incendies, qui présente de nombreux parallèles de flux de travail avec PANGEA. La coordination avec ces efforts de normalisation et d'harmonisation de la collecte de données et des flux de travail de mise à l'échelle contribuera à garantir la cohérence et la qualité des données, ce qui permettra une collaboration plus large et une validation croisée des résultats. Le High-Latitude Drone Ecology Network (**HiLDEN**) (<https://arcticdrones.org/>), que PANGEA vise à imiter dans les biomes tropicaux, est un excellent exemple de ce type de travail collaboratif. PANGEA s'appuiera également sur d'autres efforts de collaboration sur le terrain, tels que l'initiative de la Society for the Protection of Underground Networks (SPUN), qui s'est concentrée sur l'échantillonnage des champignons mycorhiziens dans des zones historiquement sous-échantillonnées (<https://www.spun.earth/>). Ces réseaux démontrent la puissance de la coordination et de l'engagement au niveau du terrain pour combler les lacunes dans les données sur les écosystèmes, une approche que PANGEA adoptera à ses multiples échelles d'étude. Cette approche multi-échelle des données de terrain, aéroportées et satellitaires fera progresser la surveillance par satellite et la capacité des modèles de nouvelle génération à simuler des processus clés et à améliorer les prévisions à long terme concernant les écosystèmes.

Pour faire progresser efficacement l'utilisation de la télédétection par satellite, il faut une collecte de données et d'informations rigoureuse, créative et réfléchie, ainsi qu'une intégration des connaissances à toutes les échelles spatiales et temporelles. Une décennie d'efforts coordonnés dans le cadre du projet ABoVE de la NASA a permis de mieux comprendre les transitions et les non-linéarités du biome boréal, révélant des tendances à l'augmentation et à la diminution de la résilience explicites sur le plan spatial (Zhang et al., 2024) et produisant un nouveau système d'évaluation comparative des modèles spécifiques aux biomes (Stofferahn et al., 2019). PANGEA s'appuiera sur la théorie de la mise à l'échelle avancée par ABoVE et intégrera davantage ML/AI aux données de télédétection pour faire progresser la mesure et le suivi des processus hétérogènes, de la dynamique et des changements dans les régions forestières tropicales, y compris la dynamique des sources/puits de carbone, la classification de l'utilisation des terres, la modélisation de la répartition des espèces, l'estimation de l'indice de surface foliaire et les prévisions climatiques. PANGEA offre des opportunités pour les modèles numériques qui représentent les processus qui médiatisent la diversité forestière et les interactions des forêts structurellement hétérogènes avec le climat, l'utilisation des terres et les cycles biogéochimiques (par exemple, Rödig et al., 2019 ; Longo et al., 2020 ; Schneider et al., 2023). La section 6.3.3 décrit plus en détail l'approche de PANGEA en matière de modélisation, de synthèse des données et d'intégration.

**PANGEA améliorera notre capacité à repousser les limites de ce que nous pouvons déduire à l'aide de capteurs satellitaires et à mieux définir ces limites, ce qui permettra à la communauté scientifique de concentrer ses efforts et ses ressources là où nous avons besoin d'informations pour compléter la recherche en télédétection et mieux comprendre le fonctionnement des forêts tropicales.**

La couverture nuageuse persistante, par exemple, est une limitation importante pour les capteurs optiques dans les forêts tropicales (par exemple, Landsat, EMIT, OCO-2/3). Bien que certains aspects de l'énorme biodiversité des forêts tropicales puissent être étudiés depuis l'espace, il est peu probable que les observations spatiales supplantent les inventaires d'espèces réalisés à partir d'études au sol. Il est peu probable que les taxons non végétaux soient jamais révélés par des études satellitaires dans les forêts tropicales, bien que certains aspects de la biodiversité non végétale puissent être prédits à partir de données satellitaires. Le couvert végétal dense des forêts tropicales nous empêche également de voir le sol et d'autres dynamiques souterraines. Il est urgent d'interroger et de clarifier les capacités et les limites de la télédétection dans les tropiques grâce à des avancées méthodologiques et informatiques et à la fusion des données, afin d'orienter les activités de recherche et de mise en œuvre au sol et les efforts ciblés de surveillance multiéchelle à long terme. Voir l'annexe D pour les activités de recherche et de surveillance planifiées et en cours qui pourraient bénéficier de PANGEA.

## 6.1.2 Calendrier théorique du projet

Le bureau de projet PANGEA élaborera le calendrier définitif du projet. Nous donnons ici un aperçu théorique des principaux événements du projet PANGEA qui seront exécutés sur une période de 6 à 9 ans (voir la section 9.4). Avant la mise en œuvre du projet, PANGEA développera un plan d'expérience concis (CEP) au cours de la phase de définition scientifique qui durera entre un et deux ans. Cette phase comprend la sélection des paysages prioritaires, l'affinement des plans de collecte de données

terrestres, aériennes et satellitaires, la définition des analyses pour répondre aux questions scientifiques du projet et l'établissement d'un budget préliminaire. Le plan d'expérience concis servira de base à l'annonce par la NASA de la possibilité de recruter l'équipe scientifique de la phase 1 de PANGEA. En principe, la NASA devrait solliciter des propositions de participation à l'équipe scientifique tous les trois ans. Après la phase de définition scientifique et la sélection de l'équipe scientifique de la phase 1, nous considérons qu'un projet PANGEA est exécuté sur une période d'environ 8 ans, bien que des périodes de mise en œuvre plus longues ou plus courtes soient possibles en utilisant une approche flexible et modulaire. Une approche modulaire permet d'obtenir un large éventail de profils budgétaires et de calendriers, car les campagnes individuelles sont peu dépendantes les unes des autres. L'objectif initial sera d'établir et d'augmenter les sites de terrain avec de nouveaux instruments, ainsi que des analyses de données et des modèles basés sur des satellites afin d'optimiser les mesures futures. Le développement précoce de modèles et l'analyse des données existantes révéleront les plus grandes sensibilités qui guideront les détails de la mise en œuvre et la collecte des données de la campagne. Le pic d'acquisition de données se produirait au cours des années 2 à 6, garantissant que les ressources sont consacrées aux acquisitions ayant le plus grand rendement scientifique. Dans une synthèse finale au cours des années 7 et 8, l'activité sur le terrain sera limitée et PANGEA se concentrera sur la synthèse et les études de modélisation qui utilisent largement les données précédemment acquises.

## 6.2 Composants scientifiques essentiels

**Pour combler les lacunes en matière de données et de connaissances sous les tropiques, il faut coordonner des projets terrestres et aériens couvrant les deux plus grandes forêts tropicales d'Afrique et d'Amérique.**

PANGEA s'appuie sur l'historique des campagnes aériennes et de terrain réussies de la NASA dans les tropiques pour mesurer la dynamique et l'état des écosystèmes à la fin de la saison des pluies et à la fin de la saison sèche, lorsque les systèmes forestiers tropicaux sont les moins et les plus stressés, révélant des différences fonctionnelles (Yang et al., 2021b), et que la couverture nuageuse épaisse limite la télédétection au-dessus des tropiques pendant la saison des pluies. Parmi les réalisations récentes qui démontrent la faisabilité, on peut citer la campagne AfriSAR-2, très réussie, qui a recueilli des données UAVSAR en bandes L et P au-dessus du Cameroun, de la République démocratique du Congo (RDC), du Gabon, du Ghana, de la République du Congo et de Sao Tomé-et-Principe. Malgré ces campagnes réussies, il existe toujours un besoin critique de mesures colocalisées et coïncidentes dans les paysages tropicaux très variables, en particulier en Afrique, où les lacunes en matière de données sont les plus importantes et où la compréhension des processus est la plus médiocre. Les mesures limitées à la saison sèche risquent de fausser la compréhension des forêts tropicales, étant donné les fortes différences saisonnières dans la dynamique et les processus (Cleveland et al., 2015), y compris le cycle du carbone, les interactions entre les espèces, les activités d'utilisation des terres (par exemple, les incendies et le défrichement), le cycle hydrologique, et bien plus encore. PANGEA comblera d'importantes lacunes temporelles en matière de télédétection en coordonnant les récupérations suborbitales programmées à la fin de la saison des pluies et à la fin de la saison sèche avec des acquisitions de données continues et/ou plus fréquentes à partir de tours de flux, de drones et d'autres capteurs. Pour atteindre les objectifs de PANGEA, il est donc nécessaire de mener des

campagnes de vol répondant aux exigences de mesure décrites dans la section 6.2.1, basées dans plusieurs pays d'Afrique centrale et des Amériques tropicales, afin de couvrir la gamme d'environnements présents dans ces systèmes. Ces observations relieront les mesures de processus à haute résolution (parcelles forestières, mesures en chambre, tours à flux, ADN électronique, données sur les mouvements d'animaux, données agricoles, TEK, IEK et LEK) à des récupérations étendues de données de télédétection aéroportées et satellitaires, fournissant une base de référence pour les ensembles de données terrestres, aéroportées et satellitaires en cours, et permettant la comparaison avec des études antérieures.

**PANGEA fournit un cadre pour la mise à l'échelle et l'intégration des données aéroportées et satellitaires avec des mesures *in situ* sur le terrain, des mesures de tour de flux par covariance de Foucault et des modèles pour faire progresser la compréhension scientifique et les capacités de télédétection dans des domaines thématiques qui répondent directement aux objectifs du domaine d'intérêt du cycle du carbone et des écosystèmes de la NASA, en accord avec les domaines d'intérêt du cycle de l'eau et de l'énergie et de la variabilité et du changement climatiques.**

PANGEA établira un réseau de campagnes coordonnées sur le terrain et aéroportées réparties dans les écosystèmes forestiers tropicaux ciblés afin de combler les lacunes en matière de données et de permettre la mise à l'échelle des ensembles de données de terrain et de télédétection, ainsi que la modélisation à l'échelle régionale et pantropicale (**tableau 2**). En utilisant des ensembles de données coordonnés, PANGEA caractérisera les différences entre les gradients biotiques, abiotiques et d'utilisation des terres. PANGEA utilisera ensuite ces mesures intégrées pour modéliser la structure, la fonction et les flux des écosystèmes dans le cadre de scénarios de changement du climat et de l'utilisation des terres, afin d'évaluer les différences dans les réponses des écosystèmes. Ce faisant, PANGEA s'intéresse à la manière dont les dynamiques variables des forêts tropicales influencent leur stabilité face aux impacts des changements climatiques et d'utilisation des sols.

### 6.2.1 Stratégie de référence, de seuil et de réduction des risques

Nous avons dérivé trois niveaux alternatifs de mesures scientifiques essentielles, à savoir la **ligne de base**, le **seuil** et le **descope**, à partir des objectifs scientifiques de PANGEA pour (1) comprendre les différences dans les stocks et les flux de carbone tropicaux et les forces à l'origine de l'hétérogénéité, (2) résoudre les problèmes de mise à l'échelle entre les données de terrain et les données satellitaires en faisant progresser la compréhension des processus et les méthodes de mise à l'échelle, et (3) prévoir les différentes réponses des écosystèmes forestiers tropicaux aux changements climatiques et d'utilisation des terres. Les exigences fonctionnelles de l'enquête PANGEA sont décrites ci-dessous.

**L'enquête de référence** répond à tous les objectifs scientifiques (section 1.1) et à toutes les questions scientifiques (section 3) pour les paysages forestiers tropicaux 3-6 américains et 3-6 africains. Pour atteindre les objectifs de l'enquête de référence, nous établissons les exigences suivantes :

1. Collecter des données aéroportées via des mosaïques de lignes de vol mur à mur et des transects d'échantillonnage sur un minimum de trois paysages prioritaires en Afrique et trois paysages prioritaires dans les Amériques, où les paysages couvrent des centaines de kilomètres englobant une variété de systèmes socio-écologiques - les écosystèmes et les personnes qui en dépendent (voir les sections 6.2.3 et 6.2.4 pour plus de détails sur les mesures des paysages).

- a. Les prélèvements aériens comprendront une capture réussie à la fin de la saison sèche et une capture réussie à la fin de la saison humide dans chaque paysage. Les captures à la fin de la saison sèche (de l'état sec à l'état humide) et à la fin de la saison humide (de l'état humide à l'état sec) ont lieu à des mois différents sur des continents différents. Les forêts tropicales peuvent présenter une saisonnalité unimodale (une saison sèche et une saison humide) ou une saisonnalité bimodale (deux saisons sèches et deux saisons humides). C'est pourquoi les calendriers d'extraction seront définis en fonction de la saisonnalité spécifique au paysage.
  - b. Les paysages seront sélectionnés parmi les sites candidats au cours de l'élaboration du plan d'expérience concis.
  - c. Une analyse de variabilité basée sur la **figure 11** et une analyse de l'incertitude du modèle seront utilisées pour informer sur les endmembers importants à capturer et contribueront à la sélection du paysage pendant le développement du plan d'expérience concis.
2. Recueillir des mesures au sol coïncidentes et colocalisées pendant les acquisitions aériennes pour les mesures requises (par exemple, les caractéristiques chimiques des feuilles, les mesures du flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> dans la chambre).
  3. Recueillir des mesures au sol à la fréquence temporelle requise tout au long du projet (par exemple, acquisitions mensuelles de la mortalité et de la phénologie des arbres par drone et au sol, mesures de flux infra-horaires).
  4. Développer et appliquer des approches de synthèse des données pour mettre à l'échelle les observations sur le terrain et aéroportées dans le domaine central de PANGEA, en utilisant des données satellitaires pour obtenir des estimations contraignantes (et des incertitudes) des variables d'intérêt.
  5. Évaluer la transférabilité des produits de synthèse des données dans l'ensemble du domaine fondamental par le biais de la validation croisée.
  6. Modéliser les flux de carbone, d'eau et d'énergie, ainsi que la dynamique de la végétation, à l'aide de modèles de la biosphère terrestre initialisés, paramétrés et étalonnés avec les produits de synthèse des données de télédétection.
  7. Appliquer des modèles optimisés pour tester la stabilité des forêts tropicales dans et entre tous les paysages étudiés et au niveau régional, sur la base des résultats des modèles de la biosphère terrestre et des systèmes socio-écologiques.
  8. Modéliser le rôle relatif du climat, des sols et des histoires évolutives divergentes dans la détermination de la variation de la stabilité des forêts tropicales face aux impacts climatiques.

**L'enquête à seuil** remplit tous les objectifs scientifiques (section 1.1) dans deux paysages forestiers tropicaux américains et deux paysages forestiers tropicaux africains. L'enquête à seuil nécessite une capture aérienne réussie à la fin de la saison humide et une capture aérienne réussie à la fin de la saison sèche dans chaque paysage.

Notre **étude décrite** remplit tous les objectifs scientifiques (section 1.1) dans seulement deux paysages d'Afrique. Pour les tropiques américains, notre étude descriptive s'appuie sur des données existantes, des campagnes planifiées (voir section 6.2.4), des achats de données commerciales, des drones déployables et des données satellitaires sur les Amériques à des fins de comparaison.

**Exigences en matière de revisite temporelle :** Deux campagnes aéroportées ciblées avec des mosaïques mur à mur et des transects à travers de multiples paysages sont nécessaires pour capturer les variations saisonnières et tenir compte de l'hétérogénéité à l'intérieur d'un continent et entre les continents d'une manière standardisée. Le calendrier des enquêtes tiendra compte de la saisonnalité des précipitations dans chaque paysage. Pour les paysages où il existe deux saisons sèches, les campagnes de PANGEA se concentreront sur la saison sèche la plus longue. Les campagnes aériennes permettront de capturer les éléments nécessaires à l'évaluation des différences saisonnières dans les flux, les stocks, les caractéristiques, les interactions entre les plantes et les animaux, l'hydrodynamique, les interactions entre la terre et l'atmosphère, ainsi que les activités d'utilisation des terres agricoles et des incendies. Le temps écoulé entre les deux captures et entre les différents paysages n'affectera pas la capacité à capturer ces endmembers, ce qui permet une conception modulaire et une flexibilité précieuse de la campagne aéroportée. Au sein des sous-sections de ces acquisitions aéroportées à l'échelle du paysage (par exemple, 10-20 km<sup>2</sup>), les récupérations à haute fréquence (≤ mensuelle) de la structure et des spectres des forêts par les drones permettront de quantifier les tendances temporelles à petite échelle (par exemple, la mortalité, la phénologie) et de fournir des données d'étalonnage et de validation pour le développement de méthodes satellitaires permettant de surveiller cette dynamique. En outre, sur un projet de 6 à 9 ans, il est très probable que des événements extrêmes, tels qu'un incendie majeur, une sécheresse ou un épisode El Niño, se produisent, offrant ainsi d'autres possibilités d'analyse.

**Exigences en matière de variabilité spatiale :** La structure, la fonction, les flux et la biodiversité des écosystèmes sont caractérisés à travers des gradients multidimensionnels de systèmes forestiers tropicaux intacts ou dégradés, à forte ou faible diversité, et à stock de carbone élevé ou faible.

**PANGEA met en œuvre une approche d'échantillonnage à l'échelle, avec un plan d'échantillonnage imbriqué.** Les mesures terrestres et aériennes couvriront les gradients à l'intérieur d'un paysage, et les paysages couvriront les gradients climatiques et de biodiversité à l'intérieur d'un continent (**figures 11 et 18**). La collecte des données PANGEA sera effectuée dans des paysages qui englobent des conditions intactes, perturbées et dégradées dans des écosystèmes de forêts, de tourbières et de zones humides, ainsi que dans des agro-écosystèmes adjacents. Une collecte coordonnée et simultanée de données au sol sur les flux, les caractéristiques foliaires, la structure forestière, la mortalité des arbres, la diversité de la faune, les interactions entre les espèces, l'humidité du sol, etc. sera effectuée sur ces gradients dans chaque paysage. Pour plus d'informations, voir la section 6.2.2, *Paysages candidats*, et la section 6.2.5, *Observations et études sur le terrain*.

**Approche flexible et modulaire :** PANGEA sera exécuté en combinant l'acquisition pluriannuelle de données au sol, à la tour et par drone dans des paysages spécifiques et des campagnes saisonnières de collecte intensive de données pouvant inclure des éléments au sol et aéroportés. Chaque paysage et chaque campagne peuvent être mis en œuvre et financés séparément. PANGEA nécessitera des campagnes pluriannuelles dans chaque paysage pour permettre aux acquisitions de données terrestres, aériennes et satellitaires de se chevaucher dans l'espace. Toutefois, nous insistons sur le fait qu'il ne sera pas nécessaire de mener des campagnes sur des saisons ou des continents distincts la même année ou dans un ordre particulier (par exemple, les saisons humides avant les saisons sèches). Le nombre de continents et de paysages à l'intérieur des continents peut varier en fonction de la stratégie suivie (ligne de base, seuil ou Descope). La combinaison des stratégies et du calendrier de la campagne permet d'obtenir de multiples options de calendriers et de profils budgétaires qui offrent une certaine souplesse à la direction de la NASA et aux cofinanceurs potentiels des activités PANGEA.

**Tableau 2.** Description des variables écologiques et géophysiques pertinentes pour ce projet, avec les besoins d'observation correspondants et les moyens d'observation de la Terre existants ou à venir.

ARES : Airborne Research Facility for the Earth System (installation de recherche aéroportée pour le système terrestre). ET : évapotranspiration. LST : température de la surface terrestre. SIF : fluorescence induite par le soleil. Le texte en **violet** indique les satellites provenant d'agences fédérales non américaines. \* Indique les missions qui n'ont pas encore été lancées et/ou qui peuvent encore faire l'objet d'un appel d'offres. \*\* Indique les missions récemment terminées. Voir le **tableau -E1** de l'annexe E pour un *tableau détaillé des mesures PANGEA*.

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
FLUX DES ÉCOSYSTÈMES (GPP, ET, respiration de l'écosystème)	Q1-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q20-Q24	Tours de flux, spectres au niveau des feuilles	Spectroscopie infrarouge, thermique	OCO-2/3, <b>TROPOMI</b> , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, <b>Sentinel 5P/5*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CO2M*</b> , GOSAT-2, GOSAT-GW*, Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , <b>Commercial*</b> , satellites météorologiques GEO	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
LES ÉCHANGES ATMOSPHÉRIQUES (Flux de CO <sub>2</sub> & CH <sub>4</sub> , colonne CO /CH <sub>24</sub> /CO)	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q20, Q21, Q24, Q27	Tours à flux, mesures en chambre, TCCON, COCCON, spectromètres EM27/SUN	Hyperspectrale, Airborne Eddy Covariance (AEC), Spectroscopie infrarouge	EMIT, MethaneSat, SBG*, Carbon-i*, CarbonMapper*, OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel 5P/5*, FLEX*, CO2M*, GOSAT-2, GOSAT-GW*.	NASA AVIRIS-NG/3, CARAFE, CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH <sub>24</sub> ), UZH ARES, NEON AOP, GAO
BIOMASSE AÉRIENNE ET STRUCTURE (hauteur de la canopée, hétérogénéité de la hauteur verticale, dynamique des trouées, mortalité des arbres)	Q1, Q2, Q4-Q13, Q15, Q17-Q21, Q23, Q25, Q28	Données sur les placettes d'inventaire forestier, balayage laser terrestre, données sur les placettes d'inventaire forestier des recensements répétés	Lidar, Radar, Multispectral	GEDI, Icesat-2, MOLI*, EDGE*, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, Landsat, Sentinel-1/2, Planet	NASA LVIS, UAVSAR, lidar à faible encombrement (avion), drone répétitif RGB ou Lidar
DIVERSITÉ (spectrale, fonctionnelle, traits foliaires de la canopée, faune, phénologie)	T2, T4-Q7, T10-Q15, T20, T24, T25, T28	Spectres foliaires, diversité taxonomique, caractéristiques des plantes, IEK, TEK, LEK, pièges photographiques, capteurs bioacoustiques, mouvement des animaux, ADN électronique, PhenoCams, observations phénologiques à long terme.	Hyperspectrale, Lidar, Radar, Radiomètres optiques (RO)	EMIT, PACE, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , <b>Planet &amp; Planet Tanager</b> , SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , NISAR*, <b>BIOMASS*</b> , Landsat, <b>Sentinel-2</b> , <b>OLCI</b>	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar à faible encombrement, drone répétitif RGB

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
<b>SEUILS CRITIQUES</b> (stress hydrique, stress thermique)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q12-Q20, Q22, Q23, Q25	Sondes d'humidité du sol, teneur en eau des feuilles, potentiel hydrique et conductance des feuilles et des tiges, VOD sur tour (GNSS en bande L), caméras FLIR	Radar/radiométrie à micro-ondes, GNSS-R/Signaux d'opportunité, Hyperspectrale	SMAP, SMOS, <b>Sentinel-1</b> , NISAR*, BIOMASS*, LSTM*, AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2, Landsat, ECOSTRESS, TRISHNA*, Commercial*	NASA UAVSAR, AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER, AirMOSS
<b>FEU ET AÉROSOLS</b> (Feu actif, aérosols de la combustion de la biomasse)	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q21, Q26, Q28	Humidité du combustible en vie, humidité du sol, zone de brûlage, gravité du brûlage, IEK, TEK, LEK, type de combustible, densité du combustible, mesures d'aérosols	Thermique, UV/Infrarouge, Photomètres, Lidar	Landsat, VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , SBG*, TRISHNA*, LSTM*, Commercial*, OMPS, EMIT, PACE, OLCI, NISAR*, BIOMASS*, CALIPSO-CALIOP**, AOS*	NASA HyTES, MAÎTRE
<b>UTILISATION ET COUVERTURE DES SOLS ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES :</b> (alimentation, eau douce, médecine, pratiques spirituelles et cérémonielles)	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19, Q21, Q23, Q28	Activité agricole, intensité de l'exploitation forestière, pratiques d'incendie, IEK, TEK, LEK, pratiques de gestion de la conservation, identifications culturelles, quantité et qualité de l'eau.	Radiomètres optiques (RO), Hyperspectraux, Lidar, Radar	Landsat, <b>Sentinel-1/2</b> , Planet, VIIRS, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SWOT, SMAP, SMOS, GRACE-FO, SBG*, CHIME*, FLEX*, CarbonMapper*	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar à faible encombrement
<b>HYDRO-MÉTÉOROLOGIE</b> (Eaux de surface, eaux souterraines, humidité atmosphérique, DPV, vent)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q22, Q23, Q25, Q28	Hauteur de la surface de l'eau, étendue de l'inondation, caractérisation du débit, mesures de puits, stations météorologiques	Altimètre, Radar, Radiomètre, Gravimétrique, Micro-ondes, Sondeurs infrarouges, Imageurs, Lidar à vent Doppler	SWOT, <b>Sentinel-1</b> , NISAR*, BIOMASS*, GRACE-FO, ATMS, GeoXO*, AOS*, Aeolus	NASA UAVSAR, observations par radiosondage
<b>EDAPHIQUE</b> (nutriments et texture du sol, topographie, géomorphologie)	Q1, Q8, Q18, Q19, Q22-Q25, Q28	Échantillons de sol	Hyperspectrale, Lidar, Radar	EMIT, PACE, SBG*, CHIME*, SRTM, Copernicus GLO-30	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, lidar à faible encombrement
				<b>Note :</b> PANGEA explorerà les relations corrélatives avec des variables télédéTECTées, et non des mesures directes.	

## 6.2.2 Paysages candidats

PANGEA collaborera étroitement avec les institutions partenaires du pays afin de garantir la bonne exécution des activités de terrain et des activités aéroportées dans les paysages sélectionnés, qui s'étendent sur environ 10 000 km<sup>2</sup>. **Le plan d'échantillonnage emboité de PANGEA soutient une approche d'échantillonnage à l'échelle (figure 18).** Les mesures au sol couvriront les gradients à l'intérieur d'un paysage, et les paysages couvriront les gradients climatiques et de biodiversité à l'intérieur d'un continent (figure 11). PANGEA donnera la priorité aux pays qui englobent des paysages présentant une confluence d'écosystèmes forestiers, de tourbières et de zones humides intactes, perturbés et dégradés, ainsi que d'agro-écosystèmes adjacents. La collecte coordonnée de données au sol couvrira ces gradients au sein de chaque paysage. **Le tableau 3** résume les paysages candidats sur la base des informations fournies par les partenaires. Les paysages PANGEA donneront la priorité aux endroits où les données décrites au début de la section 6.2.4 sont déjà collectées ou où la collecte de données peut être étendue dans le cadre de PANGEA.

**Tableau 3.** Paysages PANGEA candidats. Les cercles colorés indiquent les données disponibles, par type.

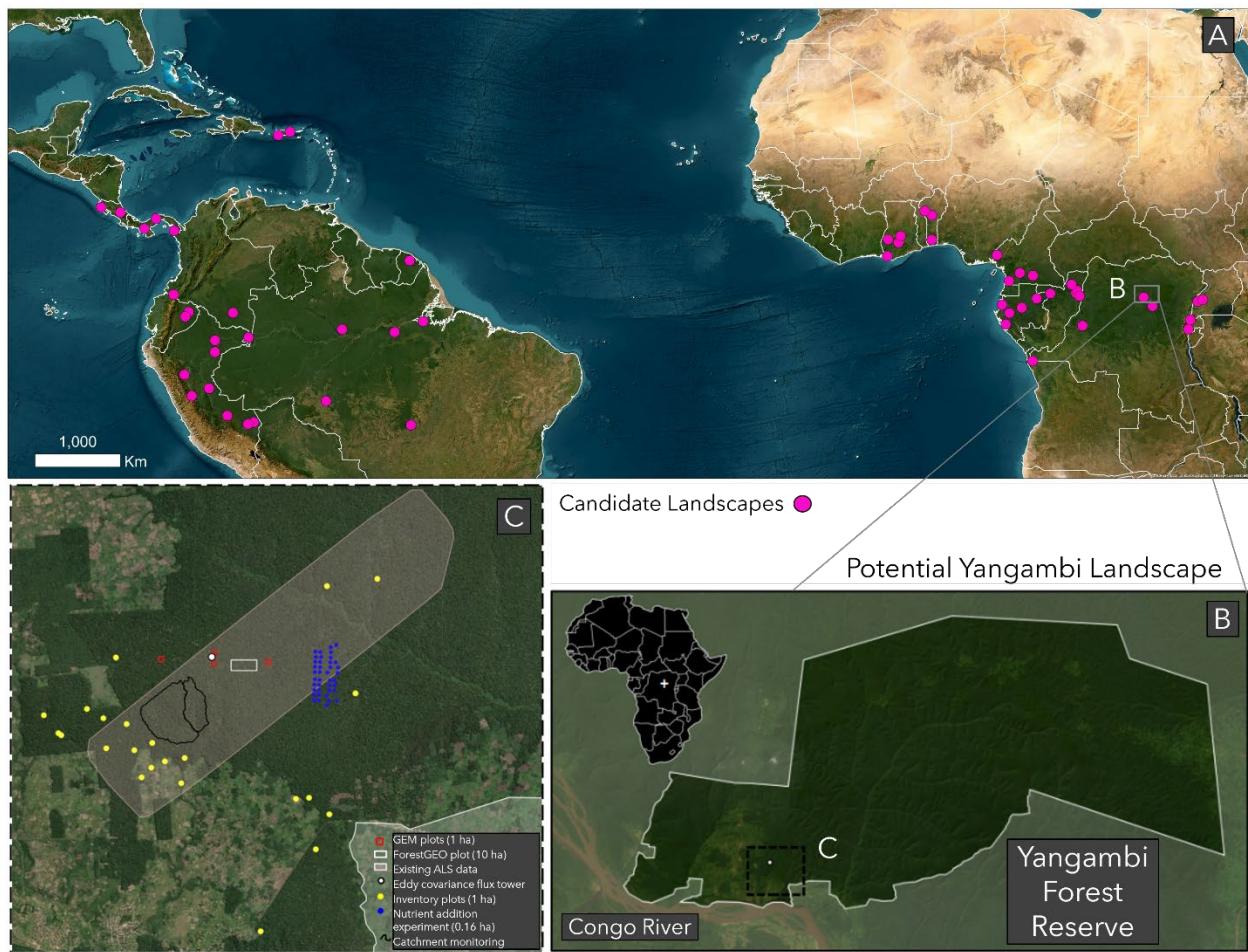
● = Données au sol ; ● = Données socio-économiques ; ● = Données de la tour ; ● = Données du drone ; ● = Données de l'avion.

● = Données sur les aéronefs de la NASA. \* Indique les activités planifiées. ATTO : Observatoire des tours d'Amazonie. Les paysages **en gras** sont des sites GEO-TREES confirmés. Les paysages *en italique* sont des sites confirmés de l'initiative One Forest Vision.

PAYSAGE	PAYS	DONNÉES DISPONIBLES	PAYSAGE	PAYS	DONNÉES DISPONIBLES
<b>PAYSAGES FORESTIERS TROPICAUX AMÉRICAINS POTENTIELS</b>					
KM34/ATTO (Manaus)		● ● ● ● ●	Nalohou	Bénin	● ●
KM67 (Santarem)		● ● ● ● ●	Bellefoungou		● ●
Rebio Jaru	Brésil	● ● ● ● ●	La Lama		● ●
Tanguro		● ● ● ● ●	<b>Dja</b>		● ● ● ● ● ●
Caxiuana		● ● ●	<b>Mbalmayo</b>	Cameroun	● ● ● ● ● ●
<b>Amacayacu</b>		●	Korup		●
Amazonie	Colombie	●	Campo Ma'an		●
La Planada		● ● ●	<i>Luki</i>		● ●
Santa Rosa	Costa Rica	● ● ● ● ● ●	Mai Ndombe	Dem. République du Congo	● ● ● ● ● ●
Turrialba		● ● ● ● ●	<b>Yangambi</b>		● ● ● ●
Tiputini	Équateur	● ● ●	Réserve de Yoko		● ● ●
Yasuní		● ● ●	Ankasa		● ●
<b>Paracou</b>	Guyane française	● ● ● ● ●	Bia Tano	Ghana	● ●
Agua Salud		●	Bobiri		● ●
<b>BCI</b>	Panama	● ●	Kogyaé		● ●
Darien		● ● ●	<b>Lopé</b>		● ● ● ● ●
Iquitos		●	<b>Ipassa</b>		●
Huánuco		● ● ●	Mondah		● ● ●
<b>Jenaro Herrera</b>		● ● ●	Mabounié		● ● ●
Les amis		● ● ●	Rabi		● ● ●
Mère de Dieu		●	Bokatola		●
San Martin		● ● ●	Kolongomba		●
<b>Tambopata</b>		● ● ●	Lac Tele		●
Ucayali		●	<b>Loundoungou</b>		● ● ●
Guanica	Porto Rico	● ● ● ● ●	Odzala-Kokoua		● ● ● ● ●
Luquillo		● ● ● ●	Nyungwe	Rwanda	●
			Volcans		●
			<b>Kibale</b>	Ouganda	●
			Sebitoli		●

PANGEA coordonnera étroitement la sélection des paysages avec les efforts qui sont activement en train de sélectionner des sites pour la collecte de données complémentaires et l'investissement dans l'infrastructure. Il s'agit notamment de GEO-TREES, de la campagne INPE-ESA sur l'Amazonie, de l'initiative "One Forest Vision", des mesures sur le terrain du méthane et des tourbières tropicales financées par la Fondation Moore et la National Science Foundation (NSF), ainsi que de plusieurs

propositions de l'Institut virtuel Schmidt Science pour le cycle du carbone axées sur les tropiques. Un processus de sélection des paysages et des sites sera formalisé dans le plan d'expérience concis afin de garantir la transparence de la sélection et de l'approbation des paysages et des sites à l'intérieur des paysages pour la collecte de données terrestres et aériennes. Ce processus s'appuiera sur les discussions en cours avec les partenaires institutionnels locaux et les gestionnaires de sites, qui ont débuté lors du processus de définition du champ d'application, et inclura une conception conjointe avec les populations autochtones et les communautés locales (voir la section 8 pour plus d'informations).



**Figure 18.** Les paysages candidats potentiels couvrent les tropiques américains et africains (A). Yangambi, un exemple de paysage candidat potentiel, est illustré dans le panneau B, qui comporte des parcelles d'inventaire existantes, une tour à flux et des données aériennes (C) qui pourraient être situées dans un paysage PANGEA plus vaste couvrant des écosystèmes agricoles, intacts et dégradés.

### 6.2.3 Observations de télédétection par satellite

De nombreuses plates-formes satellitaires de la NASA contribueront aux objectifs scientifiques et applicatifs de PANGEA, ainsi qu'un écosystème toujours plus vaste de capteurs provenant d'autres agences spatiales et d'organisations non gouvernementales (ONG) (**tableaux 2 et E-1**). PANGEA est bien placé pour tirer parti des missions du système d'observation de la Terre (EOS) afin de comprendre

les caractéristiques des propriétés des écosystèmes tropicaux et leurs changements dans un passé récent, ainsi que pour faire progresser la façon dont nous utilisons les capteurs spatiaux à l'ère des missions de l'observatoire du système terrestre (ESO). PANGEA est également prêt à contribuer à l'amélioration et au perfectionnement des algorithmes de l'ESO afin de mieux représenter les écosystèmes tropicaux et de répondre aux besoins des utilisateurs dans ces régions d'importance mondiale. Le travail *in situ* réalisé par PANGEA, associé aux observations de télédétection par satellite, permettra aux biomes forestiers tropicaux et aux populations vivant dans ces régions de faire partie du cycle vertueux de la science de la Terre à l'action, garantissant ainsi leur inclusion dans le processus.

**Tableau 4.** Exemples d'observations et de progrès en matière de télédétection par satellite.

Le texte en *violet* indique les satellites d'agences fédérales non américaines. \* Indique les missions qui n'ont pas encore été lancées et/ou qui peuvent encore faire l'objet d'un appel d'offres.

OBSERVATIONS PAR SATELLITE	ÉTALONNAGE, VALIDATION ET AVANCÉES ALGORITHMIQUES DE PANGEA
<i>Sentinel-1</i> , NISAR*, BIOMASS*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Étendre la calibration/validation de la cartographie de la biomasse le long des gradients de perturbation et de climat.</li> <li>Soutenir le développement de produits de données de NISAR et BIOMASS dans les forêts denses.</li> </ul>
EMIT, <i>CHIME*</i> , SBG-VSWIR*, SBG-VSWIR*, SBG-VSWIR*, SBG-VSWIR*.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Élargir les données de validation pour les produits dérivés de l'EMIT dans les forêts tropicales.</li> <li>Soutien aux produits de végétation L3 améliorés du SBG VSWIR.</li> </ul>
OCO-2/3, TROPOMI, MethaneSat, EMIT, CarbonMapper	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtenir des échantillons d'étalonnage sans nuages XCO<sub>2</sub> et XCH<sub>4</sub> dans les régions tropicales.</li> <li>Données de soutien pour les produits L3, mise à l'échelle entre les données en mode cible et les données à large couverture spatiale.</li> </ul>
Carbone-I*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données de validation des flux de gaz à effet de serre provenant des zones humides.</li> </ul>
GEDI, ICESat-2, EDGE*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données de structure forestière de haute précision pour l'amélioration des produits lidar spatiaux L3.</li> <li>Possibilités de données d'étalonnage pour les produits de quantification de la biomasse L4.</li> </ul>
SMAP, <i>SMOS</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données d'étalonnage pour les produits d'humidité du sol dans les forêts denses.</li> </ul>
Géostationnaire : GOES-R ABI (Amériques), MTG-I (Afrique) & AHI (Asie)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données d'étalonnage pour l'estimation des fonctions des écosystèmes à l'échelle infr-journalière.</li> </ul>
VIIRS, <i>Sentinel-3</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Soutenir le développement de produits L3 sur la dynamique des incendies.</li> <li>Données d'étalonnage pour la détection des incendies à petite échelle.</li> </ul>
ECOSTRESS, SBG-TIR, FLEX*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données d'appui pour l'établissement d'estimations de la fonction écosystémique L3 et L4 pour toutes les périodes de l'année.</li> <li>Données d'étalonnage pour les relations émergentes entre la structure et la composition des forêts et la fonction des écosystèmes.</li> </ul>

Dans le **tableau 4**, nous mettons en évidence une variété de capteurs spatiaux opérationnels et à venir de la NASA, leurs besoins d'avancées sous les tropiques auxquels PANGEA peut répondre, et la science que l'équipe PANGEA sera en mesure de faire progresser grâce à l'utilisation de ces capteurs de concert avec les activités PANGEA planifiées. Ce tableau comprend également certains capteurs exploités par des agences spatiales extérieures à la NASA et dont les données sont accessibles à tous. PANGEA explorera également les ensembles de données commerciales disponibles dans le cadre du programme CSDA (Commercial SmallSat Data Acquisition) de la NASA au cours des phases de définition et de mise en œuvre scientifiques du projet.

## 6.2.4 Observations par télédétection aéroportée

Les observations aériennes de PANGEA, y compris les aéronefs instrumentés et les drones, seront conçues en collaboration avec les partenaires locaux. Toutes les demandes d'autorisation de pays et de vol seront coordonnées par les programmes aéroportés de la NASA et du JPL en collaboration avec l'Office of International and Interagency Relations (OIIR) de la NASA et le Département d'État américain (voir **encadré 2**). En cas d'utilisation d'aéronefs de la NASA ou d'aéronefs sous contrat avec la NASA, toutes les procédures de navigabilité appropriées et les approbations et autorisations de vol seront coordonnées au niveau du projet PANGEA avec les centres concernés, le siège de la NASA et le JPL. Les capteurs et les aéronefs exacts seront déterminés au cours de l'élaboration du plan d'expérience concis.

PANGEA s'appuie sur l'expérience de la NASA en matière de campagnes aéroportées internationales réussies, dont plusieurs en Afrique. Plus récemment, la NASA a mené les campagnes AfriSAR 2016 et AfriSAR-2 2023/2024, où AfriSAR-2 a élargi la portée initiale et les succès d'AfriSAR au Gabon pour collecter des données supplémentaires au-dessus du Cameroun, de la République démocratique du Congo (RDC), du Ghana, de la République du Congo et de Sao Tomé-et-Principe. En 2023, la campagne BioSCape a fait voler deux avions de la NASA intégrés à quatre instruments de télédétection aéroportés, acquérant des observations contemporaines de l'UV au VSWIR et à la gamme thermique, ainsi que des données lidar de forme d'onde complète. Cette combinaison d'instruments a été accompagnée d'une vaste campagne d'observation sur le terrain, menée par une

### Encadré 2. Accords internationaux et autres

Les partenaires internationaux de PANGEA seront impliqués dès le début et de manière continue afin d'établir des relations solides qui contribueront au succès des campagnes sur le terrain et des campagnes aéroportées. Pour chaque paysage PANGEA, des accords formels et/ou des autorisations seront obtenus auprès des gouvernements concernés et des dirigeants des communautés autochtones.

Dès que PANGEA sera sélectionné, l'équipe scientifique de PANGEA commencera à engager des partenaires institutionnels pour soutenir le développement de discussions formelles sur les accords diplomatiques qui seront nécessaires pour mener des travaux sur le terrain et déployer des aéronefs en soutien à la campagne TE de la NASA. Au fur et à mesure que les contacts avec chaque gouvernement étranger seront établis, l'équipe scientifique PANGEA travaillera avec la NASA SMD, par l'intermédiaire du gestionnaire du programme TE, afin de mettre en place les accords diplomatiques nécessaires à la réalisation des travaux sur le terrain et des campagnes aéroportées dans chaque pays. Des accords diplomatiques (tels que des protocoles d'accord [MOU], des accords de mise en œuvre [IA] et/ou des autorisations de vol) devront être conclus entre le gouvernement américain et le pays étranger concerné le plus tôt possible. Lorsque de tels documents sont requis entre la NASA et un gouvernement étranger, l'équipe scientifique PANGEA et le gestionnaire du programme TE, en collaboration avec l'OIIR de la NASA, le SMD, les centres de la NASA, y compris le JPL, le bureau de soutien CCE et le département d'État américain, passeront par les voies et protocoles diplomatiques appropriés pour établir les documents nécessaires à la réussite des campagnes sur le terrain et des campagnes aéroportées. L'équipe scientifique PANGEA consultera également la NASA, le département d'État, l'USFS (U.S. Forest Service) et l'USAID (U.S. Agency for International Development) afin d'identifier et de poursuivre les synergies entre les activités PANGEA et les objectifs diplomatiques des États-Unis, notamment la coopération scientifique et les liens entre pays. L'équipe scientifique PANGEA, le programme TE et le bureau de soutien CCE travailleront en étroite collaboration pour garantir que les terres autochtones et les territoires souverains soient codéveloppés dans tout processus d'approbation diplomatique. L'expérience de l'équipe scientifique actuelle de PANGEA dans le cadre de nombreuses campagnes internationales sur le terrain et aéroportées facilitera l'établissement d'accords internationaux appropriés pour le projet PANGEA.

équipe scientifique diversifiée avec une participation locale d'environ 50 %. Le succès d'AfriSAR et de BioSCape et le renforcement continu des capacités ont servi d'excellent exemple de diplomatie scientifique et ont influencé positivement la perception qu'a le public de la NASA et des États-Unis en Afrique.

Un certain nombre de campagnes Earth Venture Suborbital (EVS) et d'autres campagnes aériennes internationales de la NASA ont également démontré la faisabilité du déploiement international d'aéronefs de la NASA et d'aéronefs sous-traités par la NASA avec des instruments in situ et de télédétection à l'appui de campagnes pluriannuelles à grande échelle dans les tropiques américains. En 2023, le JPL de la NASA a mené une campagne réussie avec AVIRIS-NG en collectant des données de télédétection à l'aide d'un avion sous contrat avec la NASA au-dessus du Chili, de la Colombie et de l'Équateur pour des observations ponctuelles du méthane en coordination avec chaque pays. Cette campagne s'est appuyée sur des campagnes antérieures réussies dans la région, notamment des vols UAVSAR en Colombie, en Équateur, au Pérou et en Guyane française ; des vols AVIRIS en Colombie, en Équateur et au Chili ; des vols AVIRIS prévus au Panama et au Costa Rica ; et des vols LVIS en Guyane française. Toutes ces campagnes représentent des décennies d'expérience du siège de la NASA et des centres (y compris le JPL) travaillant avec des universités et des collaborateurs internationaux pour acquérir avec succès des données de télédétection aéroportées et in situ au cours de campagnes mondiales sur le terrain.

**Au fur et à mesure que PANGEA élabore son plan d'expérience concis, elle continuera à tirer parti de l'expérience des membres de l'équipe qui ont participé aux campagnes internationales précédentes.**

Il est important de noter que la collecte de données aéroportées PANGEA ne nécessite pas nécessairement le déploiement de moyens ou d'aéronefs de la NASA. Les achats de données commerciales et les vols sur des avions étrangers et commerciaux sont également des options viables pour les acquisitions aéroportées PANGEA. Les capteurs de la NASA peuvent être embarqués sur des avions commerciaux. Par exemple, les capteurs AVIRIS effectuent souvent des vols nationaux et internationaux à bord d'un avion de Dynamic Aviation. Les missions EVS Oceans Melting Greenland (OMG), Delta-X et Coral Reef Airborne Laboratory (CORAL) ont toutes déployé avec succès des avions sous contrat du JPL de la NASA avec des instruments et des membres de l'équipe du JPL. Les achats commerciaux de données vont également accroître considérablement les capacités aéroportées. Par exemple, les transects lidar commerciaux financés par les États-Unis et acquis avec le soutien de l'USAID par l'intermédiaire de Sustainable Landscapes Brazil couvrent de vastes zones du Brésil (dos Santos et al., 2019), et des efforts similaires ont permis l'échantillonnage au-dessus des forêts de la République démocratique du Congo (Xu et al., 2017), démontrant la faisabilité dans d'importantes géographies de PANGEA. L'installation de recherche aéroportée pour le système terrestre (ARES) de l'Université de Zurich est un autre partenaire important qui soutient les acquisitions aéroportées de PANGEA. ARES a acquis avec succès des données pour des campagnes de collaboration de la NASA et de l'ESA. Les capteurs embarqués à bord d'ARES comprennent le spectromètre imageur AVIRIS-4, un lidar à ondes complètes et une caméra photogrammétrique à haute performance.

Les acquisitions de données aéroportées des agences spatiales partenaires (ESA, ISRO, JAXA, etc.) suscitent un vif intérêt et sont en parfaite adéquation avec ces dernières. Par exemple, une série de campagnes Amazonie 2025/26 coordonnées par l'Institut national de recherche spatiale (INPE) du Brésil et l'Agence spatiale européenne (ESA) prévoient de collecter des données aéroportées sur la

fluorescence, le méthane et des données in situ, ainsi que d'éventuelles données sur le flux de carbone et les espèces, y compris CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> récupérées au moyen d'un capteur HELiPOD transporté par un hélicoptère. Le Centre aérospatial allemand (DLR) prévoit une campagne coordonnée au Brésil en 2026 dans le but de déployer un lidar à méthane (CHARM- F) et des systèmes d'imagerie pour la détection du méthane. L'Agence spatiale française (CNES) est impliquée, avec un objectif similaire sur le méthane, en utilisant la collecte de données aériennes et terrestres. L'ESA prévoit également des activités de campagne aéroportée au-dessus de l'Afrique, axées sur la validation des observations satellitaires des gaz à effet de serre. Les plans de l'ESA sont en cours et seront définis plus précisément à l'issue d'un atelier organisé par l'ESA au printemps 2025. De nombreux membres de l'équipe PANGEA travaillent actuellement en étroite collaboration avec les équipes de l'INPE, de l'ESA, du DLR et du CNES. PANGEA peut grandement bénéficier de ce type de collaborations internationales et y contribuer.

PANGEA exploitera également les capacités des drones pour compléter la collecte de données par avion et pour réaliser des acquisitions de données qui nécessitent une fréquence temporelle plus élevée (par exemple, la mortalité des arbres, la phénologie). PANGEA utilisera des instruments lidar et RGB de niveau de préparation technologique (TRL) 9. Les offres hyperspectrales commerciales actuelles basées sur les drones présentent souvent des difficultés et tendent à couvrir uniquement la gamme VNIR, perdant ainsi la partie du spectre à ondes courtes qui est importante pour les mesures pertinentes de l'écosystème. L'équipe PANGEA continuera à suivre la disponibilité et l'utilité de ces technologies et mettra en place des protocoles pour les utiliser le cas échéant afin de soutenir les activités scientifiques.

Certaines acquisitions de données PANGEA nécessiteront des mesures sur le terrain et des observations aériennes quasi simultanées, grâce à une planification préalable des campagnes de terrain, à des méthodes de communication claires et fiables entre les équipes de vol et de terrain, et à des plans qui intègrent une certaine souplesse en matière de calendrier. En préparation et pendant les campagnes, PANGEA s'appuiera sur des outils d'observation rapide et de suivi des vols en temps quasi réel, tels que ceux utilisés dans BioSCape (Cardoso et al., 2024), afin d'optimiser la collecte des données aéroportées, de faciliter les rapprochements sur le terrain et d'accroître la transparence.

**PANGEA soutient également la collaboration internationale inclusive.** S'inspirant du succès de BioSCape à cet égard, PANGEA mettra en œuvre un système transparent de hiérarchisation des régions d'intérêt de l'équipe scientifique et sollicitera des commentaires sur le système de hiérarchisation avant la campagne aéroportée par le biais de réunions publiques, d'ateliers, de réunions bilatérales et d'enquêtes. PANGEA partagera les plans de vol préliminaires et mettra en œuvre un processus itératif afin que l'équipe scientifique et les partenaires locaux puissent contribuer à affiner la conception de l'acquisition des données, tout en précisant à l'équipe scientifique et aux partenaires locaux qu'aucune donnée aéroportée n'est garantie et que toutes les acquisitions proposées sont provisoires jusqu'à ce qu'elles soient exécutées avec succès. Les informations sur les activités de vol quotidiennes, y compris les appels "go/no-go", seront communiquées rapidement une fois que les décisions quotidiennes auront été prises.

## 6.2.5 Observations et études sur le terrain

Les mesures au sol sont nécessaires pour (1) valider les observations spatiales des propriétés des écosystèmes provenant à la fois du programme d'enregistrement de la NASA et des missions nouvellement lancées ; (2) découvrir les moteurs mécanistes des flux et des schémas observés, qui

peuvent ensuite informer le développement de modèles et l'interprétation des observations spatiales ; et (3) évaluer les dépendances d'échelle des processus écologiques. Malgré l'importance des écosystèmes tropicaux, ils sont considérablement sous-représentés en ce qui concerne les mesures de terrain, ce qui peut conduire à une mauvaise représentation dans les produits de données de plus haut niveau provenant des missions satellitaires (voir **tableau 3**), soulignant l'importance des mesures et des études PANGEA basées sur le terrain. Les produits de données de terrain comprennent les éléments suivants :

- **Les données et connaissances manuelles in situ** comprennent toutes les données qui doivent être directement mesurées et/ou recueillies par des personnes sur le terrain et qui ne peuvent pas être facilement automatisées. Il s'agit par exemple des parcelles d'inventaire forestier, des caractéristiques des feuilles et du bois, du balayage laser terrestre, des mesures de flux dans les chambres, de l'identification des espèces, de l'ADN électronique, des données sur les déplacements des animaux, du type de culture et des mesures de rendement, ainsi que des connaissances écologiques indigènes, traditionnelles et locales (IEK, TEK et LEK). Ces bases de données et de connaissances sont importantes pour comprendre les relations mécanistes entre le modèle et le processus et pour valider les ensembles de données des drones, des avions et des satellites.
- **Les données in situ automatisées** comprennent toutes les mesures au sol qui contribuent à la validation et à la compréhension des processus écologiques, mais qui ne nécessitent pas de visites fréquentes sur le site et qui sont plus facilement automatisées. Il s'agit par exemple des mesures de dendromètre, de flux de sève et d'humidité du sol, ainsi que des données de pièges photographiques et de bioacoustique. Tout comme l'échantillonnage biologique, ces mesures sont importantes pour développer et comprendre les processus et valider les observations à distance.
- **Les données de flux et les données météorologiques** comprennent toutes les données collectées dans une tour de flux ou une station météorologique, y compris les flux de carbone, d'eau et d'énergie, la température de l'air, la température du sol, la teneur en eau volumétrique du sol, l'humidité relative et les précipitations. La technique d'eddy-covariance utilise des tours d'échafaudage au-dessus de la canopée de la forêt et mesure le vent à haute fréquence et les données scalaires (concentration de gaz, énergie, quantité de mouvement) pour estimer les flux d'eau et de carbone de l'écosystème - où le carbone se réfère au CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, et aux flux latéraux.
- **La télédétection proximale basée sur des tours** comprend toutes les données qui peuvent être collectées à partir de plates-formes montées sur des tours. Ces mesures viendront compléter les données de télédétection obtenues par les drones et les avions afin d'établir un lien plus direct entre les caractéristiques et les flux de l'écosystème et les observations par satellite. Les mesures de télédétection proximale sur tour PANGEA comprennent la réflectance hyperspectrale, la fluorescence induite par le soleil (SIF), le rayonnement infrarouge thermique (TIR), la rétrodiffusion des micro-ondes, le lidar, la VOD (GNSS en bande L) et les PhenoCams.
- **La télédétection proximale par drone** comprend le lidar, les images RVB pour la structure et les spectres, les données multispectrales et le développement potentiel d'un capteur hyperspectral par drone. La surveillance par drone présente trois aspects essentiels : (1) elle permet la collecte de données à haute fréquence et le suivi continu des tendances temporelles d'une manière qui n'est pas possible avec un avion ; (2) elle permet de saisir les tendances même par temps nuageux, ce qui est courant dans les régions forestières tropicales ; et (3) elle

peut compléter les mesures au sol qui peuvent manquer le sommet de la canopée en raison de l'occlusion dans les systèmes forestiers et agroforestiers. Associées à une validation au sol, les acquisitions par drone sont essentielles pour quantifier des phénomènes tels que la mortalité des arbres, les flux de carbone, la phénologie et les changements dans les traits fonctionnels avec les variations saisonnières.

Plusieurs facteurs peuvent restreindre ou limiter les mesures sur le terrain dans les forêts tropicales. Tout d'abord, l'accès à des terrains denses, difficiles à parcourir et à des zones reculées peut limiter la capacité à déployer et à entretenir l'équipement de terrain sur plusieurs sites. De même, les conditions météorologiques extrêmes, telles que les fortes pluies pendant la mousson, la chaleur et l'humidité extrêmes, créent des environnements de travail difficiles, qui peuvent limiter la durée et l'étendue du travail sur le terrain. En outre, de nombreuses forêts tropicales se trouvent dans des régions en proie à l'instabilité politique, à des conflits ou à des litiges concernant l'utilisation des terres, ce qui peut présenter des risques pour les chercheurs et rendre difficile la réalisation d'études à long terme. En outre, le financement et les ressources scientifiques proviennent principalement du Nord, ce qui limite les ressources permettant de financer directement le travail sur le terrain dans les tropiques. Ces limitations ont historiquement conduit à la mise en œuvre de campagnes de mesures intensives sur quelques sites seulement dans les forêts tropicales. Les mesures effectuées sous les tropiques ne peuvent pas être facilement généralisées, car les écosystèmes tropicaux présentent une grande biodiversité et les données peuvent n'être représentatives que des conditions locales.

PANGEA s'attaquera à ces limites en établissant des partenariats durables, mutuellement bénéfiques et collaboratifs avec des organisations tropicales locales afin d'exploiter, de renforcer et de combler les lacunes des infrastructures et des efforts existants (**tableau 5**). Les partenaires ont été impliqués dans le processus de cadrage et le seront tout au long de PANGEA, y compris lors de l'élaboration du plan d'expérience concis de PANGEA. Voir la section 8, *Stratégie d'engagement communautaire*, pour plus d'informations. PANGEA prévoit de s'appuyer sur les relations avec tous ces partenaires pour atteindre les objectifs scientifiques du projet. Nous notons en particulier que les sites de flux, tels que ceux du réseau mondial de tours de flux à covariance de Foucault (FLUXNET), disposent généralement d'une infrastructure et d'une alimentation électrique suffisantes pour accueillir des mesures de soutien supplémentaires, telles que la télédétection proximale. Pour cette raison, PANGEA donnera la priorité aux mesures sur le terrain en partenariat avec les sites FLUXNET afin d'utiliser l'infrastructure existante et d'établir des collaborations. Nous notons également que NGEE-Tropics prendra fin au moment où PANGEA entrera dans sa phase la plus active. PANGEA s'appuiera directement sur les efforts de collecte de données de NGEE-Tropics en étendant des mesures similaires à l'Afrique et en collectant des données de télédétection colocalisées, en plus de s'appuyer sur les efforts de modélisation de NGEE-Tropics (voir section 6.3).

**Tableau 5.** Organismes partenaires menant des recherches et des activités sur le terrain qui sont synergiques avec PANGEA.

AMMA-CATCH : African Monsoon Multidisciplinary Analysis Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique. AndesFlux : tours de flux exploitées par la PUCP. ForestGEO : Observatoire mondial de la Terre pour les forêts. GEM : Réseau mondial de surveillance des écosystèmes. PUCP : Université catholique pontificale du Pérou. RAINFOR : Réseau d'inventaire de la forêt amazonienne.

ORGANISATIONS	CONTRIBUTIONS POTENTIELLES
Alliance pour la science des forêts tropicales (ATFS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>11 réseaux de recherche (par exemple AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).</li> <li>11 656 parcelles d'inventaire forestier dans 56 pays.</li> <li>Un leadership fort en matière de renforcement des capacités.</li> </ul>
Observatoire des tours d'Amazonie (ATTO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projet commun germano-brésilien.</li> <li>Trois tours de flux (dont une de 325 m).</li> <li>Données auxiliaires (cycles biogéophysiques/biochimiques et météorologiques).</li> </ul>
AndesFlux	<ul style="list-style-type: none"> <li>6 tours de flux de tourbillon et parcelles permanentes dans l'ouest de l'Amazonie.</li> <li>Sites couvrant un gradient de longueur de la saison sèche (0-6 mois).</li> </ul>
Institut du Bassin du Congo (IBC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 stations biologiques de terrain au Cameroun.</li> <li>Réseaux organisationnels dans le bassin du Congo.</li> <li>CBI School for Indigenous and Local Knowledge (SILK).</li> </ul>
Initiative scientifique pour le bassin du Congo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plate-forme dirigée par des scientifiques pour des investissements scientifiques à long terme.</li> <li>Efforts de renforcement des capacités scientifiques locales.</li> <li>Initiatives en matière de développement durable.</li> </ul>
CongoFlux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Station de recherche tropicale à Yangambi (République démocratique du Congo).</li> <li>Flux de covariance des tourbillons (<math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{N}_2\text{O}</math>, <math>\text{CH}_4</math>, <math>\text{H}_2\text{O}</math>, chaleur sensible).</li> <li>Données supplémentaires pour caractériser le cycle du carbone.</li> </ul>
FLUXNET	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réseau international de réseaux (par exemple, le réseau de tours de flux à covariance de Foucault des Amériques [AmeriFlux], le système intégré d'observation du carbone [ICOS]).</li> <li>Données de flux de covariance de Foucault consolidées et normalisées.</li> </ul>
GEO-TREES	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réseau de réseaux (par exemple AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).</li> <li>Coordination des parcelles d'inventaire forestier et de la télédétection aérienne.</li> <li>Données pour l'étalonnage des estimations des stocks de carbone à partir de l'espace.</li> </ul>
Alliance mondiale des collectivités territoriales (GATC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réseau des peuples autochtones et des communautés locales.</li> <li>Représentent 35 millions de personnes dans 24 pays (Afrique, Amériques, Asie).</li> <li>Renforcement des capacités pour la gestion durable et la protection culturelle.</li> </ul>
Guyafor et Guyaflux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guyafor : Réseau de 54 parcelles à long terme réparties sur 17 sites en Guyane française.</li> <li>Guyaflux : Tour de covariance de Foucault à long terme (21 ans) en Guyane française.</li> </ul>
LBA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Programme permanent du gouvernement brésilien.</li> <li>Plate-forme de soutien aux infrastructures et à la collaboration en matière de recherche en Amazonie.</li> </ul>
NGEE-Tropiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projet décennal multi-institutionnel du ministère américain de l'énergie (DOE).</li> <li>Sites intensifs en Australie, au Brésil, en Malaisie, au Panama et à Porto Rico.</li> <li>Collecte de données visant à améliorer la modélisation des diverses forêts.</li> </ul>
Réseau Flux Afrique de l'Ouest	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 tours à flux de Foucault : 2 en forêt (Bellefoungou et La Lama), 1 en polyculture (Nalohou)</li> <li>Bellefoungou et Nalohou : Mesures à long terme (16 ans) de la covariance des tourbillons et des conditions météorologiques, eaux de surface (réseau AMMA-CATCH) et échantillons de sol couvrant les gradients de topographie et de géomorphologie.</li> <li>La Lama : Enquête sur les espèces disponible dans le GBIF</li> </ul>

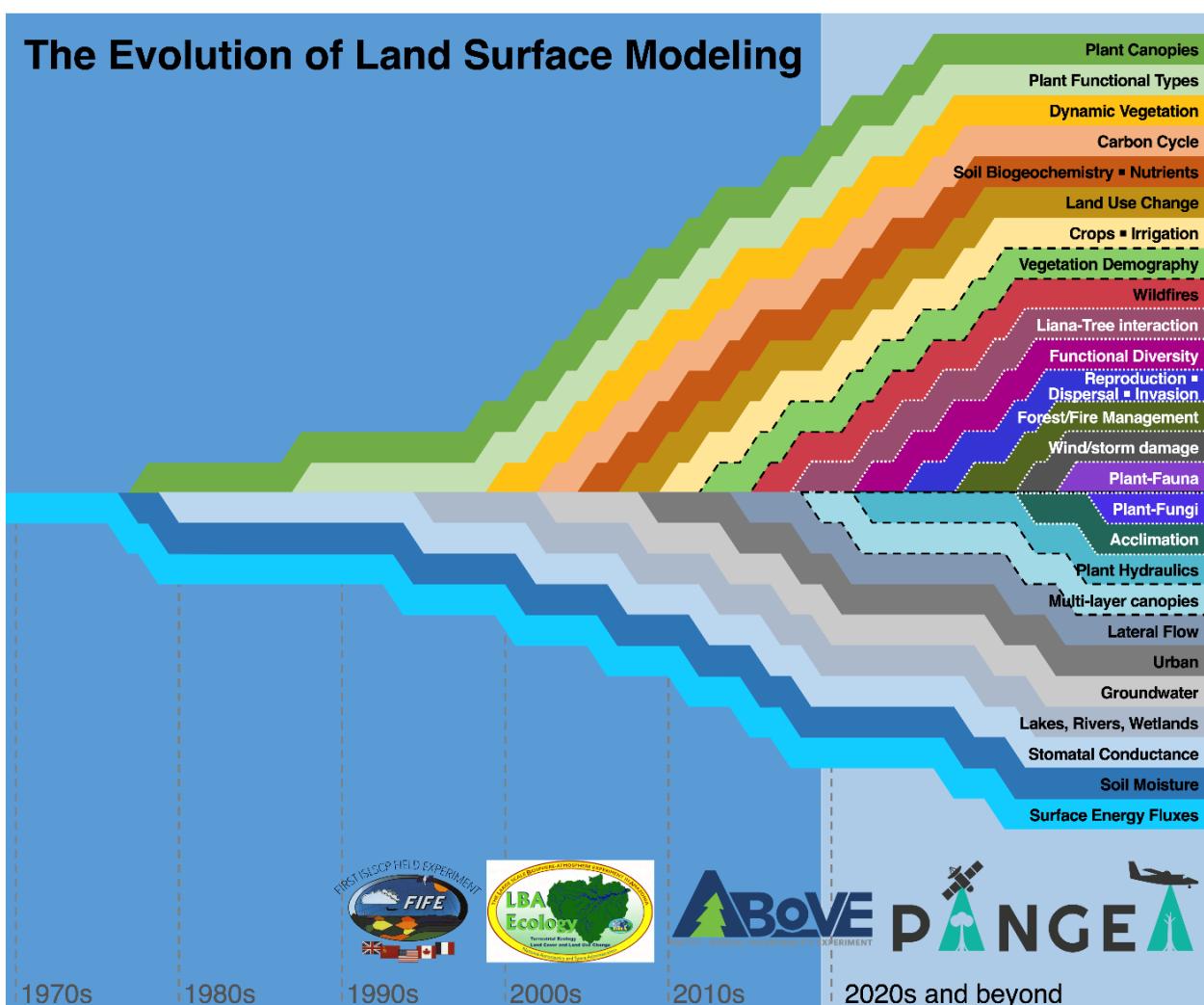
## 6.3 Modélisation, synthèse des données et analyses intégratives

### 6.3.1 Approche de la modélisation et de l'intégration des données

La modélisation et les synthèses de données sont des éléments fondamentaux de PANGEA. Les activités de modélisation et de synthèse des données seront transversales à tous les thèmes scientifiques (*section 2*) et contribueront à répondre aux questions scientifiques clés de PANGEA (*section 3*). Tout au long du projet, PANGEA donnera la priorité aux ensembles de données terrestres et aériennes qui peuvent être synthétisées à plusieurs échelles et intégrées par les modèles, que ce soit pour l'initialisation, les conditions limites ou l'évaluation. Cette approche a été mise en œuvre avec succès dans des projets antérieurs d'intégration de modèles et de données (par exemple, ABoVE et NGEE-Tropiques), et nous prévoyons de nous appuyer sur ces projets. Les objectifs de la modélisation et de la synthèse des données sont les suivants

- Identifier les processus clés mal représentés et les régions du domaine PANGEA qui génèrent des incertitudes sur les variables et les processus clés dans les modèles existants.
- Développer des activités semblables aux expériences de simulation de systèmes d'observation (OSSE) qui aideront à déterminer les meilleurs emplacements et gradients nécessaires pour maximiser la représentativité des sites intensifs dans le domaine PANGEA.
- Synthétiser et mettre à l'échelle les mesures des paysages pour les domaines PANGEA principal et étendu en utilisant la télédétection et la modélisation.
- Mettre en œuvre de nouveaux processus et techniques, et améliorer les processus et techniques existants qui tirent parti de l'intégration des données de télédétection et des modèles, et les appliquer pour répondre aux questions scientifiques de PANGEA.

Au cours des dernières décennies, les modèles de la biosphère terrestre ont élargi leur champ d'application et intégré de nombreux nouveaux processus qui ne pouvaient pas être pris en compte dans le cadre de l'ACL (**figure 19**). Par exemple, les modèles fondés sur le traitement résolvent désormais la diversité structurelle et fonctionnelle, une grande variété de dynamiques de perturbation naturelles et anthropiques, et un couplage fort avec les cycles biogéochimiques (Fisher et al., 2018 ; Fisher et Koven, 2020 ; Negron-Juarez et al., 2020). Nous sommes aujourd'hui à une époque où les processus écologiques dans divers écosystèmes qui régissent les cycles de l'énergie, de l'eau, du carbone et des nutriments sur Terre doivent être pris en compte (Bonan et al., 2024). De même, plusieurs catégories de modèles tirent de plus en plus parti de la vaste gamme d'observations de télédétection, et tout au long de PANGEA, nous aurons la participation d'un large éventail de modèles qui peuvent utiliser la télédétection pour l'initialisation, la quantification de l'incertitude et l'assimilation des données (**tableau 6**). En outre, les nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle peuvent faire progresser l'étalonnage des modèles (Li et al., 2023) et faire partie intégrante de la modélisation prédictive (Schneider et al., 2017 ; Reichstein et al., 2019 ; Eyring et al., 2024). Néanmoins, à mesure que les modèles évoluent, il sera de plus en plus important de relever les défis futurs tels que l'acclimatation, la limitation des nutriments, les changements dans la composition fonctionnelle, la prise en compte des émissions de méthane et la répartition de l'allocation du carbone entre la biomasse aérienne et souterraine pour maintenir la précision du modèle.



**Figure 19.** Évolution des processus résolus par les modèles de biosphère terrestre au cours des décennies, ainsi que des campagnes antérieures de la NASA sur l'écologie terrestre. Lignes noires en pointillé : processus mis en œuvre, qui font encore l'objet d'un développement important. Lignes blanches en pointillé : processus qui commencent à émerger et qui devraient émerger dans les années à venir. Source de la figure originale : Fisher et Koven (2020).

La projection de la trajectoire future des écosystèmes tropicaux représente un défi de taille pour les modèles ESM, car ces modèles doivent représenter avec précision des dynamiques physiques, biogéochimiques et écosystémiques complexes. Les projets de comparaison de modèles tels que CMIP (Taylor et al., 2012 ; Eyring et al., 2016) et TRENDY (Friedlingstein et al., 2023 ; Sitch et al., 2024) sont essentiels pour suivre le développement des modèles basés sur les processus et identifier les domaines qui doivent être améliorés (Arora et al., 2020). Si l'analyse comparative et la validation des modèles ESM sont devenues plus courantes ces dernières années (Fisher et al., 2018), il est encore rare que l'on évalue systématiquement la performance des modèles du cycle du carbone après leur mise à jour (Fer et al., 2021). Pourtant, de telles comparaisons avec des ensembles de données d'observation sont essentielles pour tester les hypothèses et évaluer la précision des prédictions (Negron-Juarez et al 2015, Fisher et al, 2018). Le projet ILAMB fournit des outils pour suivre et

comparer la performance des modèles à l'aide d'une méthode complète de score de compétence et intègre de multiples ensembles de données d'observation pour tenir compte de l'incertitude des modèles (Hoffman et al., 2017 ; Collier et al., 2018 ; Braghieri et al., 2023). L'amélioration de l'accord entre les simulations historiques et les observations peut indiquer que les composantes du modèle peuvent être affinées pour mieux représenter les processus, augmentant ainsi la confiance dans les projections futures. Outre la représentation précise des processus, la performance du modèle peut être considérablement influencée par la qualité et la représentativité des conditions initiales et limites (Hurtt et al., 2004 ; Antonarakis, 2014 ; de Frenne et al., 2021). Les données collectées dans le cadre de PANGEA seront utilisées pour développer des outils d'étalonnage en intégrant des données d'observation au sol et de télédétection, et pour fournir des conditions initiales et limites représentatives de l'état réel des écosystèmes forestiers tropicaux.

**Tableau 6.** Liste non exhaustive de modèles pouvant intégrer les données PANGEA et aider à répondre aux questions scientifiques et à tester les hypothèses PANGEA.

Classes de modèles : PBM, modèles de biosphère terrestre basés sur les processus ; HM, modèles hybrides basés sur les données ; TDM, modèles descendants ; AI/ML, modèles basés sur l'apprentissage automatique de l'intelligence artificielle ; et ABM, modèles basés sur les agents. Sous-classes de modèles PBM : IBM, modèles basés sur les individus ; CBM, modèles basés sur les cohortes ; DGVM, modèles dynamiques de végétation mondiale (à l'exclusion des IBM et des CBM). CliMA : Climate Modeling Alliance (Alliance pour la modélisation du climat).

MODÈLES					EXEMPLES DE POSSIBILITÉS D'INTÉGRATION DE MODÈLES DE DONNÉES		QUESTIONS SCIENTIFIQUE S ABORDÉES
CLASS E	SOUSS- CLASSE	EXEMPLES	RÉFÉRENCES	EXEMPLES DE PROCESSUS D'INTÉRÊT	AÉROPORTÉ/PORTÉ DANS L'ESPACE TÉLÉDÉTECTION	MESURES SUR LE TERRAIN	
PBM	IBM	FORMIND TROLL	Fischer et al (2016) Maréchaux & Chave (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stocks et flux de carbone</li> <li>Diversité structurelle/fonctionnelle</li> <li>Taux démographiques</li> <li>Taux de perturbation</li> </ul>	<b>STRUCTURE FORESTIÈRE/STOCKS DE CARBONE :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lidar aéroporté</li> <li>GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASS*</li> <li>Landsat, Sentinel1-1, -Sentinel2</li> </ul> <b>COMPOSITION DE LA FORêt :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hyperspectrale aéroportée</li> <li>DESI, EMIT, PACE, PRISMA, SBG*</li> </ul> <b>AUTRE :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Flux d'eau et d'énergie :</b> ECOSTRESS</li> <li><b>Flux C :</b> FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li><b>Eau du sol :</b> SMAP, SMOS, SWOT</li> <li><b>Contenu en eau du couvert végétal :</b> AMSR-E, EMIT</li> <li><b>Phénologie :</b> Landsat ; Sentinel-2 ; drone RGB</li> <li><b>Nuages/précipitations :</b> GOES-R, GPM</li> <li><b>Couverture terrestre :</b> Landsat ; Sentinel-2</li> <li><b>Zone brûlée :</b> Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	Q1-Q27	
		BiomeE ED/ED3 ED2 Ent TBM FATES LPJ-GUESS	Weng et al (2022) Ma et al (2023) Longo et al. (2019) Kim et al. (2015) Koven et al (2020) Hickler et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stocks et flux de carbone</li> <li>Diversité structurelle/fonctionnelle</li> <li>Taux démographiques</li> <li>Taux de perturbation</li> <li>Cycle eau/énergie</li> <li>Cycle des nutriments</li> <li>Changement de la couverture terrestre et de l'utilisation des sols</li> <li>Zone brûlée/émissions d'incendie</li> </ul>			
	DGVM	CLM ELM JSBACH JULES LPJ ORCHIDEE	Lawrence et al. (2019) Ricciuto et al. (2018) Reick et al (2021) Harper et al. (2018) Sitch et al. (2008) Krinner et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stocks et flux de carbone</li> <li>Taux de perturbation</li> <li>Cycle eau/énergie</li> <li>Cycle des nutriments</li> <li>Changement de la couverture terrestre et de l'utilisation des sols</li> <li>Zone brûlée/émissions d'incendie</li> </ul>			
		CARDAMOM CliMA NASA-CASA	Bloom et al (2016) Braghieri et al (2023) Potter et al (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stocks et flux de carbone</li> <li>Cycle eau/énergie</li> <li>Changement de la couverture terrestre et de l'utilisation des sols</li> <li>Zone brûlée/émissions d'incendie</li> </ul>			
	HM						Q1-Q4 ; Q6 ; Q8 ; Q9 ; Q14-Q16 ; Q18 ; Q22-Q27

MODÈLES					EXEMPLES DE POSSIBILITÉS D'INTÉGRATION DE MODÈLES DE DONNÉES		QUESTIONS SCIENTIFIQUE S ABORDÉES
CLASS E	SOUSS- CLASSE	EXEMPLES	RÉFÉRENCES	EXEMPLES DE PROCESSUS D'INTÉRÊT	AÉROPORTÉ/PORTÉ DANS L'ESPACE TÉLÉDÉTECTION	MESURES SUR LE TERRAIN	
TDM	Carbon Tracker CMS-Flux HYSPLIT STILT-VPRM	Peters et al. (2007) Liu et al. (2020) Stein et al (2015) Dayalu et al (2024)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux de carbone</li> <li>Cycle eau/énergie</li> <li>Zone brûlée/émissions d'incendie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Flux C</b> : FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li><b>Flux d'eau et d'énergie</b> : ECOSTRESS</li> <li><b>Zone brûlée</b> : Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux de covariance des tourbillons</li> <li>Données météorologiques</li> <li>COS/isotopes</li> <li>Chambres à flux de sol</li> <li>PhenoCams</li> </ul>	Q1-Q2 ; Q4 ; Q6 ; Q9 ; Q14 ; Q17
AIML	MapBiomas Fire MetaFlux	Alencar et al (2022) Nathaniel et al (2023)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Stocks et flux de carbone</li> <li>Cycle eau/énergie</li> <li>Zone brûlée/émissions d'incendie</li> </ul>	<p><b>STOCKS DE CARBONE :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lidar/hyperspectrale aéroporté(e)</li> <li>GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASS*</li> <li>Landsat, Sentinel-1 et -2</li> </ul> <p><b>AUTRE :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Flux d'eau et d'énergie</b> : ECOSTRESS</li> <li><b>Flux C</b> : FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li><b>Zone brûlée</b> : Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Traits fonctionnels des plantes</li> <li>Données météorologiques</li> <li>Flux de covariance des tourbillons</li> <li>COS/isotopes</li> <li>Chambres à flux de sol</li> <li>Données GNSS basées sur des tours</li> <li>PhenoCams</li> </ul>	Q1-Q2 ; Q4 ; Q6 ; Q9 ; Q14 ; Q17
ABM	ABSOLUG SimPachamama RepastSimphony	von Essen & Lambin (2023) Andersen et al (2017) North et al. (2013)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Couverture terrestre/changement d'affectation des terres</li> <li>Etat/dynamique du ménage</li> <li>Mesures bioéconomiques</li> <li>Taux de reproduction des bovins</li> </ul>	<p><b>STOCKS DE CARBONE :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lidar/hyperspectrale aéroporté(e)</li> <li>GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASS*</li> <li>DESI, EMIT, PACE, PRISMA, SBG*</li> <li>Landsat, -Sentinel1 et -2</li> </ul> <p><b>AUTRE :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Couverture du sol</b> : Landsat ; -Sentinel2</li> <li><b>Zone brûlée</b> : Landsat, Sentinel2-, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Parcelles d'inventaire forestier</li> <li>Données sur la gestion forestière</li> <li>Rendements des cultures et du bois</li> <li>Données sur la dynamique du bétail</li> <li>Limites du territoire</li> <li>Données du recensement humain</li> <li>Données d'enquête</li> <li>Données de l'expérience de choix</li> </ul>	Q21 ; Q28

### **Encadré 3. Exemple d'approche d'intégration des données de modélisation et de télédétection de PANGEA**

En utilisant la question 6 de PANGEA (variabilité des traits fonctionnels entre les continents et effets sur le cycle du carbone tropical) et le modèle FATES comme exemple, l'équipe de PANGEA utilisera des approches d'incertitude des paramètres (par exemple, par le biais d'ensembles de simulation utilisant PEcAn) pour identifier les traits foliaires et hydrauliques mesurables qui déterminent la sensibilité du modèle des flux de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub>O dans FATES (ci-après, les traits clés). L'équipe caractérisera ensuite les traits clés dans les sites d'intérêt par le travail de terrain et la télédétection à travers les gradients de perturbation et de climat sur les deux continents. Elle utilisera les données collectées pour contraindre les distributions de paramètres à travers les gradients d'intérêt. Ils utiliseront des mesures de flux provenant de tours et des récupérations de télédétection pour établir des relations émergentes entre les gradients de caractéristiques et les flux dérivés de la télédétection sur les mêmes gradients en tant que références. Ils utiliseront ensuite le modèle contraint pour étudier la manière dont les écosystèmes réagissent aux sécheresses extrêmes en fonction des différents régimes de précipitations et de l'intensité des perturbations, et quels processus (par exemple, la limitation de l'humidité du sol ou le déficit de pression de vapeur) déterminent les réactions aux sécheresses extrêmes. En utilisant une approche intégrée entre les modèles et l'acquisition de données, PANGEA permettra une avancée significative de la capacité prédictive des modèles pour quantifier la vulnérabilité des forêts tropicales au changement global.

Les activités de synthèse des données PANGEA faciliteront la transposition à l'échelle régionale et pantropicale des mesures au sol du paysage et des observations aériennes décrites dans les sections 6.2.4 et 6.2.5. En synthétisant les variables clés à l'aide d'ensembles de données de télédétection aéroportées associées à des mesures au sol (par exemple, l'humidité du sol, les traits fonctionnels des plantes, les flux), nous pouvons établir des relations empiriques solides à l'aide de modèles statistiques pour interpoler les variations d'un mur à l'autre dans les variables critiques. Par exemple, les mesures au sol des pertes de carbone de la biomasse dues aux sécheresses sur plusieurs sites peuvent être utilisées pour développer des modèles statistiques qui prédisent les changements de la biomasse en réponse à des variations de l'humidité du sol, du DPV, de la fréquence des sécheresses et des groupes fonctionnels de plantes. Le produit dérivé peut ensuite être utilisé pour cartographier les impacts pantropicaux sur la biomasse forestière suite à des scénarios de sécheresse spécifiques, améliorant ainsi notre compréhension des réponses des écosystèmes aux facteurs de stress environnementaux dans divers paysages tropicaux. En outre, la combinaison de plusieurs produits de synthèse de données peut être utilisée pour explorer les relations émergentes des écosystèmes forestiers tropicaux. Par exemple, les cartes de hauteur de la canopée avant les sécheresses peuvent être mises en contraste avec les indices de stress évaporatif pendant les conditions de sécheresse. Ces ensembles de données peuvent ensuite être utilisés comme contraintes et références supplémentaires pour les modèles basés sur les processus.

PANGEA exploitera les modèles d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique (IA/ML) pour la synthèse des données en raison de leur robustesse dans le traitement des non-linéarités et des interactions entre les processus multifactoriels et les prédicteurs. L'IA/ML peut également être utilisée pour émuler des modèles basés sur des processus (Swaminathan et al., 2024) et explorer plus efficacement l'espace paramétrique des modèles ou effectuer des prévisions à court/long terme (Li et al., 2023 ; Meunier et al., 2024). Pour améliorer l'interprétabilité et la compréhension des processus

écologiques sous-jacents des modèles d'IA/ML, PANGEA mettra en œuvre des techniques telles que (1) l'analyse de l'importance des caractéristiques, qui quantifie et met en évidence les facteurs les plus influents à l'origine des prévisions du modèle ; et (2) les diagrammes de dépendance partielle, qui peuvent être utilisés pour visualiser la façon dont les changements dans des variables spécifiques ont un impact sur les résultats prédictifs. En outre, PANGEA utilisera des techniques non IA, notamment l'inférence causale (Venelli Pyles et al., 2022), l'analyse des séries chronologiques (Bullock et al., 2020), y compris Breaks For Additive Season and Trend Monitor (BFAST ; DeVries et al., 2015 ; Verbesselt et al., 2012), et les statistiques bayésiennes (Goulamoussène et al., 2017), qui permettent de mieux comprendre les relations de cause à effet, de découvrir des modèles temporels et de quantifier l'incertitude dans les prédictions et les analyses. Ces stratégies fourniront également des informations précieuses et des flux de travail efficaces qui peuvent être intégrés dans des modèles basés sur les processus afin de réduire l'incertitude des paramètres et d'augmenter la précision des prédictions (Dietze et al., 2013 ; Meunier et al., 2021).

La compréhension de la dynamique des forêts tropicales à grande échelle se heurte à un problème de taille : les séries temporelles de la plupart des données relatives à la structure, à la composition, aux stocks de carbone et à la fonction des forêts sont relativement courtes. Pour surmonter ce défi et obtenir des données à long terme et à haute résolution sur la repousse de la biomasse forestière, des travaux antérieurs ont utilisé une approche de substitution espace-temps, qui calcule les taux de récupération des variables d'intérêt (par exemple, la biomasse, la hauteur de la canopée) à partir d'une période de référence dans des zones qui ont subi des perturbations au cours d'années différentes (et connues) (Heinrich et al., 2021 ; Rappaport et al., 2018). Cette approche, associée à des modèles d'IA/ML et à des techniques traditionnelles de synthèse des données, garantit que PANGEA peut évaluer et prédire de manière robuste la dynamique des forêts tropicales à différentes échelles et dans différents délais, en soutenant l'utilisation d'enregistrements satellitaires à long terme grâce aux acquisitions de données et aux avancées méthodologiques de PANGEA. Les chronoséquences ont été utilisées pour contraindre les modèles basés sur les processus qui caractérisent les distributions de l'âge depuis la dernière perturbation (Ma et al., 2017).

### **6.3.2 Coordination avec d'autres communautés de modélisation et d'intégration de données**

La coordination avec les communautés établies de modélisation, de synthèse et d'intégration des données sera cruciale pour étendre l'impact de PANGEA au-delà de la fourniture d'observations sur le terrain et par satellite. Par exemple, le projet TRENDY (Sitch et al., 2024), qui coordonne les simulations du cycle mondial du carbone, représente un autre partenariat potentiellement important. Les données détaillées de PANGEA sur les forêts tropicales seront essentielles pour améliorer la paramétrisation et les performances des modèles TRENDY, en particulier pour la dynamique et les flux régionaux de carbone dans les biomes tropicaux. De même, le CMIP (Eyring et al., 2016), leader mondial de la modélisation climatique, bénéficiera des observations de PANGEA, en particulier dans le cadre de l'amélioration de la représentation des écosystèmes tropicaux. Ces ensembles de données seront très utiles pour évaluer et améliorer les modèles utilisés dans les efforts mondiaux, y compris les composantes terrestres du CMIP. Ce partenariat améliorera la représentation des écosystèmes tropicaux dans les modèles du système terrestre en fournissant des repères spécifiquement adaptés aux forêts tropicales, ce qui aidera les modèles mondiaux à atteindre une plus grande précision dans leurs prévisions.

PANGEA veillera à ce que ses données et ses résultats contribuent aux efforts en cours pour améliorer la performance des modèles terrestres et réduire les incertitudes dans les projections mondiales en raison des réponses des forêts tropicales aux changements climatiques et d'utilisation des terres. Par exemple, un partenaire important de PANGEA est le projet ILAMB (Collier et al., 2018). Les données collectées dans le cadre de PANGEA et les produits dérivés développés par la synthèse des données peuvent devenir de nouvelles références sur les processus qui présentent actuellement une grande incertitude entre les ensembles de données (par exemple, la productivité primaire brute) ou qui sont absents dans ILAMB (par exemple, la démographie de la végétation, l'hydraulique des plantes). De même, PANGEA collaborera avec PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer ; LeBauer et al., 2013), qui se concentre sur l'exploitation des données de terrain et des données satellitaires pour optimiser les paramètres des modèles et améliorer les prévisions des flux de carbone et d'eau (Dokoochaki et al., 2022 ; Meunier et al., 2021). PANGEA collaborera avec des communautés de modèles basés sur les processus qui ont intégré avec succès des observations de télédétection sur la démographie de la végétation, comme le modèle de démographie de l'écosystème (ED2 ; Antonarakis et al., 2014 ; Longo et al., 2020). Un autre partenaire clé est NGEE-Tropics, qui, bien qu'il soit prévu qu'il prenne fin au moment où PANGEA entre dans sa phase la plus active, fournit une riche base d'outils de modélisation, y compris le modèle FATES (Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator ; Koven et al., 2020), et une vaste expérience dans la conception et l'exécution de campagnes sur le terrain pour collecter des données visant à réduire l'incertitude des modèles. PANGEA peut également compter sur un partenariat avec une équipe transdisciplinaire de scientifiques et de technologues, récemment financée par le programme AIST (Advanced Information Systems Technology) de la NASA, qui développera un jumeau numérique du système terrestre (ESDT) intitulé "Central Africa Carbon Storage and Biodiversity Corridors" (Corridors de stockage de carbone et de biodiversité en Afrique centrale). Cet ESDT intègre de nombreuses données de télédétection avancées sur le carbone et la biodiversité, des données socio-économiques et des modèles de déplacement d'animaux dans des modèles du système terrestre. Son objectif est d'évaluer l'état actuel et projeté des stocks de carbone forestier et de la biodiversité, d'évaluer l'efficacité des stratégies de conservation et d'analyser les impacts potentiels des actions mondiales telles que l'Accord de Paris et REDD+ sur les écosystèmes d'Afrique centrale. Enfin, le Bureau mondial de modélisation et d'assimilation (GMAO) peut compléter les efforts de PANGEA avec des techniques avancées d'assimilation de données qui peuvent être utilisées comme repères et conditions limites pour les modèles prédictifs de la dynamique des forêts tropicales. Parmi les exemples de produits figurent les produits SMAP Level-4 sur la température et l'humidité du sol dans la zone d'enracinement (Reichle et al., 2019) et l'analyse rétrospective de l'ère moderne pour la recherche et les applications, version 2 (MERRA-2, Gelaro et al., 2017).

Outre les communautés qui développent des modèles basés sur les processus, des produits de synthèse des données et des flux de travail d'étalonnage, PANGEA vise à collaborer avec des initiatives qui assimilent directement les données de télédétection dans les prédictions des modèles. Par exemple, la modélisation inverse jouera un rôle essentiel dans la stratégie de coordination de PANGEA, en offrant un cadre pour réconcilier les divergences entre les flux observés et simulés dans les écosystèmes. Cette technique permettra d'assimiler des ensembles de données à grande échelle dérivées de satellites avec des mesures sur le terrain, ce qui permettra d'affiner les prévisions de la dynamique du carbone et de l'eau dans les biomes tropicaux (Liu et al., 2016). PANGEA vise également à collaborer avec des efforts de modélisation innovants tels que NASA-CASA (NASA Carnegie-Ames-Stanford ecosystem model ; Potter et al., 1993 ; 2012) et CARDAMOM (CARbon DAta-MOdel fraMework ; Bloom et al., 2020), qui combinent des acquisitions satellitaires et terrestres pour

l'assimilation de données sur le cycle du carbone et la modélisation et ont été efficacement appliqués dans les OSSE (Philip et al., 2019). Enfin, la collaboration avec CliMA (Climate Modeling Alliance ; Schneider et al., 2017), qui développe un modèle de système terrestre de pointe intégrant des techniques d'apprentissage automatique et d'assimilation de données, renforcera la capacité de PANGEA à mettre à l'échelle les observations sur les forêts tropicales. Ces collaborations contribueront à combler le fossé entre la collecte de données sur le terrain et la modélisation prédictive, ce qui permettra de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes tropicaux et leur rôle dans le système terrestre.

### 6.3.3 Activités de modélisation et d'intégration des données

Les activités de modélisation et de synthèse des données se dérouleront tout au long du projet PANGEA. Toutefois, ces tâches changeront d'orientation au fur et à mesure de l'avancement du projet. Une fois qu'une équipe scientifique aura été sélectionnée pour PANGEA, un groupe de travail sur la modélisation et la synthèse des données (SWG) sera mis en place. Ce groupe identifiera les domaines et les processus clés qui génèrent actuellement de l'incertitude dans les modèles basés sur les processus liés aux cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments, ainsi qu'à la biodiversité et aux interactions humaines dans les forêts tropicales humides. Le groupe développera des efforts d'intercomparaison de modèles en utilisant des analyses comparatives établies (par exemple, TRENDY, FLUXCOM) et des outils (par exemple, ILAMB) pour informer la conception du projet. Le groupe de travail cherchera également à obtenir des réponses rapides en utilisant des approches basées sur des expériences de simulation de systèmes d'observation (OSSE) utilisant des modèles et des moteurs existants pour fournir une première évaluation des principaux domaines d'incertitude et des domaines qui manquent de représentativité dans les observations existantes.

Après les évaluations initiales et les efforts de l'OSSE, le SWG se concentrera sur des objectifs multiples et complémentaires. Les activités liées aux modèles basés sur les processus se concentreront sur la mise en œuvre des principaux mécanismes manquants identifiés au cours de la phase 1, ce qui permettra de mieux comprendre les moteurs des modèles observés sur les cycles du carbone, de l'eau, de l'énergie et des nutriments dans les campagnes de terrain. Les activités liées à la synthèse permettront d'étendre les résultats des échelles locale et régionale à l'échelle mondiale. La recherche sur la synthèse des données se concentrera sur l'utilisation des ensembles de données PANGEA pour générer des produits à des échelles qui peuvent être assimilées par des modèles inverses et hybrides, ainsi que pour l'évaluation comparative des modèles basés sur les processus. Les approches de synthèse incluront, sans s'y limiter, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et la substitution espace-temps. Les membres du groupe travaillant avec des modèles inverses et hybrides utiliseront les ensembles de données PANGEA et les produits de synthèse dérivés pour quantifier l'incertitude dans la quantification à l'échelle des variables d'état et des flux. Les efforts ne se concentreront pas sur un seul ensemble de modèles et de techniques, mais rassembleront plutôt des méthodes qui permettent de mettre à l'échelle des mesures limitées dans l'espace et dans le temps à l'ensemble de la région pantropicale, ainsi que des estimations robustes de l'incertitude.

Lors de la synthèse finale, PANGEA se concentrera sur les études qui utilisent les modèles contraints et améliorés et les produits de données développés précédemment pour répondre directement aux questions scientifiques de PANGEA et tester les hypothèses clés. La recherche utilisant des modèles basés sur les processus à ce stade devrait identifier et attribuer les causes et les moteurs des changements dans le fonctionnement des forêts en tirant parti des ensembles de données PANGEA

pour l'initialisation et la quantification de l'incertitude. Les efforts de synthèse des données et de modélisation inverse se concentreront sur la description de la manière dont les principaux axes de variabilité dans les forêts tropicales humides déterminent l'hétérogénéité des flux de carbone, d'énergie, d'eau et de nutriments ainsi que la biodiversité à l'intérieur des continents et d'un continent à l'autre. Ensemble, ces activités permettront de mieux comprendre la résilience des forêts tropicales face au changement planétaire et d'apporter des réponses intégrées dans les différents thèmes scientifiques (section 3).

## 7 Renforcement des capacités, formation et éducation

Le renforcement des capacités des participants des États-Unis et des pays tropicaux par l'investissement dans la formation, l'éducation et l'échange de connaissances est fondamental pour le succès de PANGEA, et essentiel pour préparer la prochaine génération de scientifiques avec l'expertise et les outils nécessaires pour exploiter pleinement le système d'observation de la Terre (EOS) de la NASA, la connaissance des systèmes socio-écologiques, les méthodes scientifiques et la gestion et l'analyse des données, ainsi que le développement de modèles scientifiques. Le renforcement des capacités, la formation et l'éducation dans le cadre de PANGEA impliqueront des communautés de chercheurs et de travailleurs basés aux États-Unis, ainsi que des communautés locales et nationales dans les pays forestiers tropicaux partenaires de PANGEA. L'expérience acquise au cours des projets de terrain TE précédents, en particulier le LBA, a démontré que le renforcement des capacités permettait d'assurer la longévité des projets et de les justifier pour les pays d'accueil. PANGEA s'associera aux programmes existants de la NASA, ainsi qu'aux institutions collaboratrices locales et internationales, pour planifier et entreprendre des activités d'échange de connaissances, de renforcement des capacités, de formation et d'éducation adaptées à un éventail de participants potentiels, y compris les étudiants, les scientifiques en début de carrière, le personnel en général, les peuples autochtones et les communautés locales (IPLC), ainsi que les scientifiques. Le renforcement des capacités, la formation et l'éducation viseront à encourager la participation des communautés locales et des peuples autochtones, de l'ensemble de la main-d'œuvre et d'une cohorte d'étudiants de premier et de deuxième cycle.

Les activités de renforcement des capacités, de formation et d'éducation de PANGEA seront conçues en fonction de chaque public spécifique. Au cours de l'élaboration du plan d'expérimentation concis, puis de manière intermittente tout au long de la PANGEA, des évaluations seront menées pour déterminer les besoins et les souhaits des différents membres de la communauté de la PANGEA en termes de renforcement des capacités, de formation et d'activités éducatives. L'évaluation permettra d'identifier les bénéficiaires potentiels et de les aligner sur les ressources disponibles. La formation est une cible privilégiée pour de nombreuses possibilités de cofinancement (voir section 10.2, *Possibilités de cofinancement*).

### 7.1 Développement de la main-d'œuvre

PANGEA fera progresser les objectifs énoncés dans la Vision 2030 du National Science Board (NSB) en favorisant le développement de la main-d'œuvre dans les domaines des STIM. Grâce à des technologies de télédétection avancées, au développement et à l'application de modèles du système terrestre et à un vaste travail de terrain international, PANGEA cultivera une main-d'œuvre formée aux

STIM et dotée d'une expertise en recherche scientifique et technique fondamentale et en ML/AI, y compris l'apprentissage profond, les grands modèles de langage, la vision par ordinateur et l'assimilation de données, afin de relever les défis écologiques et sociaux critiques dans les régions pantropiques et d'acquérir des compétences applicables à l'échelle mondiale. PANGEA offre des possibilités de formation pratique pour les étudiants et les scientifiques en début de carrière, en faisant le lien entre la science fondamentale et les outils appliqués et la prise de décision axée sur les solutions, et en garantissant l'inclusivité en engageant des institutions desservant les minorités (MSI). En plus de soutenir les efforts existants de la NASA en matière de formation et de développement de la main-d'œuvre par le biais d'ARSET, de DEVELOP et de l'initiative de la NASA en faveur des peuples autochtones, les programmes de formation de PANGEA s'alignent bien sur l'intelligence artificielle pour la prévisibilité du système terrestre (AI4ESP) du DOE et sur les programmes RISE (Research, Innovation, Synergies, and Education) et GOLD-EN (Geoscience Opportunities for Leadership in Diversity) de la NSF (**tableau 1**). En intégrant des partenaires du monde universitaire, du gouvernement et des institutions internationales, PANGEA fera progresser la recherche fondamentale et la préparation de la main-d'œuvre conformément à la Vision 2030 de l'ONN.

## 7.2 Former une cohorte d'étudiants diplômés

PANGEA offrira une occasion unique à une génération d'étudiants de premier et de deuxième cycle des États-Unis et des pays tropicaux hôtes de développer une recherche hautement intégrative et transdisciplinaire. Les objectifs scientifiques de PANGEA permettront aux étudiants de comprendre les écosystèmes tropicaux et leur importance pour la planète, d'apprécier les systèmes socio-écologiques et de mener des projets de recherche à forte intensité de données en utilisant à la fois des observations sur le terrain et des ensembles de données de télédétection, et de développer des compétences essentielles en matière de synthèse de données (y compris l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'assimilation de données) ainsi que de modélisation basée sur les processus. En dotant les étudiants des compétences nécessaires pour comprendre l'importance et promouvoir la conservation et la gestion durable des paysages forestiers tropicaux, en gérant les "big data", l'intelligence artificielle et la modélisation à forte intensité de calcul, les étudiants seront préparés à de multiples opportunités de carrière dans le monde universitaire, le gouvernement et l'industrie. En outre, la mise en œuvre du projet PANGEA sera intrinsèquement collaborative et réunira des scientifiques de plusieurs institutions et universités, tant aux États-Unis qu'à l'international. En participant à des activités de terrain et à des événements scientifiques, les étudiants de premier et deuxième cycles interagiront et collaboreront directement avec des chercheurs de la NASA et d'autres agences américaines (DOE, USFS, USGS, etc.). Les étudiants auront ainsi la possibilité de poursuivre une carrière à long terme au sein de ces agences et de se lancer dans des activités privées et entrepreneuriales dans des secteurs connexes. PANGEA permettra aux étudiants de développer les compétences de réflexion critique en collaboration requises pour les partenariats multi-institutionnels et internationaux.

PANGEA poursuivra également le rôle essentiel de la NASA dans la promotion du renforcement des capacités au niveau international, en s'appuyant sur l'expérience du LBA au cours duquel le renforcement des capacités a été mutuellement bénéfique pour la contribution du programme d'écologie terrestre de la NASA à la première phase des efforts LBA (LBA-ECO) et pour les hôtes brésiliens de la NASA en Amérique du Sud. Le Brésil a exigé une composante de formation et d'éducation pour chaque enquête LBA, définie par les ressources disponibles et généralement liée

aux programmes universitaires brésiliens. Le groupe le plus important d'étudiants formés dans le cadre du LBA était constitué d'étudiants brésiliens de premier cycle, rémunérés pour participer à des projets scientifiques. Bien que ces étudiants aient principalement effectué des travaux techniques, nombre d'entre eux sont devenus coauteurs d'articles, et certains en ont même été les premiers auteurs. Ce programme a permis d'identifier des étudiants désireux de poursuivre des études de maîtrise et de doctorat. Environ 500 étudiants brésiliens ont obtenu une maîtrise ou un doctorat dans le cadre des enquêtes LBA. Si une petite partie des étudiants financés ont été payés par des projets de recherche de la NASA (principalement pour les étudiants qui ont obtenu leur diplôme aux États-Unis), la plupart des bourses ont été accordées par des mécanismes brésiliens existants des ministères nationaux de l'éducation et de la science et par des fondations de recherche au niveau de l'État. Alors que l'investissement total en dollars représentait moins de 5 % de l'investissement de la NASA dans le LBA-ECO et d'autres activités de recherche à l'étranger, les retombées immédiates et à long terme ont été énormes. Au Brésil, de nombreux diplômés LBA ont ensuite effectué un travail important dans le domaine de l'environnement au sein d'universités, d'agences gouvernementales municipales, étatiques et nationales, et d'ONG, dépassant ainsi les attentes des Brésiliens quant à l'impact de la formation et de l'éducation LBA.

C'est au sein de l'équipe scientifique que PANGEA a le plus de possibilités de renforcement des capacités et de formation. Suivant les modèles LBA et BioSCape, la NASA peut encourager ou exiger que les propositions soient élaborées en collaboration avec des chercheurs locaux. Ces exigences ont permis de garantir qu'environ 50 % de l'équipe scientifique de BioSCape provenait d'institutions sud-africaines. De même, les annonces de financement de PANGEA peuvent exiger ou encourager fortement la formation, l'éducation et le renforcement des capacités dans le cadre des activités proposées, à l'instar de ce qui a été réalisé dans le cadre du LBA. Le PANGEA peut travailler directement avec des initiatives existantes telles que l'Amazon Institute of Technology (AmIT), l'équipe de la phase 3 du LBA, l'Initiative scientifique du bassin du Congo (CBSI), le Réseau de recherche sur la forêt d'Afrique centrale (R2FAC) et le programme de recherche appliquée en écologie et en sciences sociales (RESSAC) pour atteindre cet objectif.

**L'approche de PANGEA en matière de science équitable, de renforcement des capacités et de formation sera directement confrontée à la question des campagnes de survol et de la science des parachutes. Sur la base des succès du LBA, nous pensons que PANGEA peut publier 100 articles en premier auteur provenant de scientifiques africains, ce qui contribuera à combler le fossé de l'indice de parachutage en Afrique centrale (Culotta et al., 2024). Ces scientifiques africains poursuivront l'héritage de PANGEA, en collaboration avec des pairs internationaux à travers les tropiques, bien après la fin du projet.**

Un autre objectif important de la stratégie de renforcement des capacités de PANGEA est de consolider et de développer la communauté des utilisateurs de données terrestres de la NASA dans les tropiques, y compris les peuples autochtones et les communautés locales. Les activités aéroportées de PANGEA susciteront beaucoup d'enthousiasme quant au potentiel de la télédétection pour de nombreuses applications, y compris des applications axées sur l'atténuation du changement climatique et la surveillance du carbone, la conservation de la biodiversité, l'agriculture durable et la prévention et la surveillance des risques de catastrophes. Les divers groupes d'utilisateurs bénéficieront grandement des avancées méthodologiques de PANGEA en matière d'utilisation des ressources satellitaires de la NASA. PANGEA profitera de l'élan créé par les campagnes aéroportées pour catalyser et promouvoir une application plus large des ensembles de données spatiales de la

NASA, en particulier ceux qui se prêtent bien à un examen en parallèle avec les produits de données aéroportées, par exemple EMIT, PACE, ECOSTRESS, GEDI et, à l'avenir, NISAR et SBG. En collaboration avec des partenaires régionaux, PANGEA collaborera avec les pays hôtes au développement de banques de données nationales afin que les connaissances émergentes de PANGEA puissent être intégrées et appliquées aux demandes régionales et nationales de promotion socio-économique et d'élaboration de politiques. L'approche de PANGEA en matière de renforcement des capacités vise à créer des groupes d'utilisateurs NASA Early Adopter dans les tropiques - en particulier pour NISAR et SBG, ainsi que pour les missions de l'ESA telles que BIOMASS, CHIME et FLEX. PANGEA s'appuiera sur la stratégie "Earth Science to Action" de la NASA pour "renforcer les capacités grâce à un ensemble étendu et diversifié de partenariats, à la fois traditionnels et nouveaux" (St Germain, 2024 - [ES2A Strategic Plan](#)). Les partenaires de PANGEA comprendront "des agences gouvernementales nationales et internationales, des universités, des organisations non gouvernementales et internationales, le secteur privé et des philanthropies", conformément à cette stratégie. PANGEA s'associera aux programmes existants de la NASA et aux efforts de formation menés par les partenaires, conformément à l'objectif de "tirer parti des initiatives existantes d'amplification de la valeur" qui "pourraient être nationales ou internationales" pour "atteindre à la fois la profondeur et l'étendue de notre impact et de notre soutien à l'humanité tout en étant rentable" (St Germain, 2024 - [Plan stratégique de l'ES2A](#)). Des exemples sont présentés dans le **tableau 7**.

**En fin de compte, PANGEA est l'occasion d'améliorer la collaboration et la compréhension entre les continents, de léguer des connaissances et des ensembles de données, et de soutenir des actions directes pour conserver les forêts tropicales et atténuer le changement climatique. L'héritage le plus probable et le plus durable sera peut-être le noyau fondamental d'experts formés et soutenus qui contribueront à guider la prochaine génération dans les avancées scientifiques et technologiques et dans les actions orientées vers les solutions pour relever les défis les plus pressants de la Terre.**

## 8 Stratégie d'engagement communautaire

PANGEA s'engagera avec diverses communautés pour répondre aux questions scientifiques, identifier les synergies avec les priorités de recherche locales et mettre en œuvre PANGEA d'une manière qui soit bénéfique pour les paysages et les pays qui participeront à cette recherche, et qui établisse et renforce les partenariats à long terme entre les institutions américaines et internationales. La stratégie s'appuie sur les connaissances, l'expertise et les expériences partagées tout au long de l'étude exploratoire de PANGEA, qui a impliqué plus de 800 personnes et 300 organisations de 42 pays sur 5 continents par le biais (a) d'ateliers consultatifs, (b) d'événements de sensibilisation, (c) de discussions de groupes de travail, (d) de réunions bilatérales, et (e) d'enquêtes sur le web. Aux États-Unis, PANGEA a collaboré avec plus de 110 agences fédérales et institutions américaines dans 30 États et à Washington, DC. Une description plus détaillée des méthodes d'engagement utilisées au cours de l'étude exploratoire est fournie à l'annexe C. Nous présentons ici une liste des communautés prioritaires pour l'engagement dans PANGEA, les principes qui sous-tendent les efforts d'engagement de PANGEA, et la stratégie de PANGEA pour engager les communautés locales et cultiver un héritage positif à long terme pendant et après le projet.

**Tableau 7.** Partenaires et prestataires potentiels qui pourraient collaborer avec PANGEA pour des activités de formation et de renforcement des capacités.

PARTENAIRE	ACTIVITÉ	PUBLIC CIBLE
AI4ESP	Travailler avec AI4ESP (Artificial Intelligence for Earth System Predictability) pour intégrer l'intelligence artificielle aux modèles du système terrestre afin d'améliorer les capacités de prévision, de relever les défis scientifiques et d'améliorer l'intégration des données et les techniques d'observation.	Chercheurs et étudiants, décideurs
AIMS	Formation postuniversitaire, recherche et engagement public dans les domaines des mathématiques, des sciences et de l'apprentissage automatique. Le réseau AIMS compte cinq centres d'excellence qui enseignent les masters africains en intelligence artificielle (AMMI), notamment au Cameroun, au Ghana et au Rwanda. Le réseau AIMS compte plus de 2 400 anciens étudiants issus de 44 pays africains, dont 33 % de femmes.	Étudiants africains
ARSET	Série de webinaires de formation en plusieurs parties, s'appuyant sur le modèle de formation en personne testé lors de BioSCape.	Décideurs, universitaires, scientifiques
ATBC	Les formations, les ateliers et la mise en réseau des chercheurs se font en collaboration avec l'Association pour la biologie tropicale et la conservation (ATBC), qui promeut la recherche, l'éducation et la communication en matière de biologie tropicale et de conservation. L'ATBC compte environ 1 000 membres issus de 70 pays, soutient le renforcement des capacités et organise des réunions internationales.	Membres de l'ATBC dans plus de 70 pays
CDAA	Cahiers de formation et ateliers inspirés de ceux déjà présentés lors de conférences (par exemple, AGU, ESA, ATBC) facilitant l'accès à l'EOS de la NASA.	Chercheurs à tous les stades de leur carrière
DÉVELOPPEUR	Établir des partenariats avec des décideurs intéressés par l'utilisation des données de la NASA Earth pour soutenir leur travail. Chaque partenaire aura une équipe DEVELOP de 4 à 5 personnes qui travaillera avec lui pendant 10 semaines (renouvelables) pour développer sa capacité à utiliser les données de la NASA sur la Terre afin de répondre à ses besoins.	Les décideurs et l'ensemble de la main-d'œuvre
FLUXNET	Formation et outils pour utiliser/analyser les données des tours de flux à covariance de Foucault, y compris en plusieurs langues (actuellement en espagnol et en anglais). PANGEA travaillera avec FLUXNET pour étendre la traduction au français et au portugais et développer de nouveaux matériaux de formation qui intègrent la télédétection et les données des tours à flux.	Chercheurs et étudiants
GLOBE	Des activités éducatives adaptées au niveau local pour les élèves de la maternelle à la 12e année, les enseignants et les citoyens, y compris des éléments de formation des formateurs permettant la multiplication. Possibilité de canaliser l'enthousiasme suscité par les campagnes aéroportées et les données d'observation de la Terre.	Étudiants, enseignants et citoyens de la maternelle à la 12e année
INITIATIVE EN FAVEUR DES PEUPLES AUTOCHTONES	Collaborer avec les communautés autochtones afin d'améliorer l'utilisation de l'EOS pour une prise de décision éclairée. PANGEA a développé des partenariats avec des organisations autochtones sous les tropiques, notamment le GATC et le RRI, et coordonnera ses efforts avec l'initiative des peuples autochtones de la NASA pour développer conjointement des formations, soutenir des projets menés par des autochtones, renforcer les relations et créer des opportunités pour l'inclusion des autochtones dans l'EDD de la NASA.	Communautés autochtones
NSF RISE	Favoriser les collaborations transdisciplinaires qui impliquent l'ensemble de la communauté des géosciences afin de stimuler les découvertes et les innovations dans le domaine du développement de la main-d'œuvre.	Chercheurs et étudiants
SELPER	Identifier les possibilités de partenariat avec SELPER, la société latino-américaine pour la télédétection et les systèmes d'information spatiale, afin de développer des activités de formation et de recherche en télédétection dans les pays d'Amérique latine. SELPER promeut ces activités lors d'ateliers, de symposiums et de cours de courte durée, souvent en partenariat avec la communauté internationale au sens large.	Membres de SELPER et participants aux réunions scientifiques
SERVIR	Coordonner avec les hubs SERVIR pour développer des services personnalisés pour les besoins spécifiques de prise de décision des organisations partenaires locales, en s'appuyant sur la boîte à outils de planification SERVIR pour fournir des instructions ciblées au niveau régional sur la façon d'évaluer et de fournir une agriculture impactante, la restauration des forêts et d'autres interventions.	Centres SERVIR, partenaires de mise en œuvre (gouvernements locaux et nationaux, ONG)

## 8.1 Co-développement et partenaires de PANGEA

La recherche PANGEA sur les forêts tropicales complétera et développera de nombreux efforts existants. Les données acquises au cours des campagnes de terrain PANGEA seront utilisées pour initialiser, évaluer et contraindre les prévisions de plusieurs modèles d'écosystèmes terrestres basés sur les processus et de modèles du système terrestre dans les forêts tropicales. Les exemples de modèles incluent FATES, un modèle dont le développement est soutenu par le DOE à travers NGEE-Tropics, ainsi que de multiples modèles soutenus actuellement ou précédemment par la NASA, tels que BiomeE (NASA-GISS), ED2 (dirigé par l'Université de Harvard), ED3 (Université du Maryland), la composante terrestre de CliMA (Institut de Technologie de Californie et JPL), et CARDAMOM (JPL) (Section 6.3). PANGEA renforcera les efforts de SilvaCarbon en incorporant un plus grand nombre de sites de terrain et de données de télédétection, ce qui permettra de mieux comprendre la dynamique du carbone et les processus forestiers à l'échelle régionale et mondiale, tout en renforçant les analyses de suivi, de rapport et de vérification (MRV). L'amélioration de la compréhension et de l'analyse de la dynamique du carbone et des fonctions des écosystèmes sera un élément clé pour informer le programme international de l'USDA USFS afin de développer des stratégies de gestion et de conservation des forêts avec les organisations internationales. Certains de ces efforts sont limités à de petites zones géographiques ou représentent des réseaux de sites individuels. D'autres, comme l'initiative One Forest Vision (OFVi) et GEO-TREES, ont des ambitions pantropicales comme PANGEA. L'éventail des possibilités de partenariat est illustré par des exemples dans le **tableau 5** et le **tableau B-1**. L'annexe B décrit plus en détail les communautés avec lesquelles PANGEA s'engagera, énumère les partenaires actuels de PANGEA en fonction du type de communauté et aborde des considérations d'engagement plus spécifiques pour chacune d'entre elles.

PANGEA interprète le mot "*communauté*" au sens large pour englober une grande variété de groupes formels et informels de personnes qui se perçoivent comme membres d'un groupe, qui peuvent partager des intérêts, des expériences, des ressources, des activités, des professions, des moyens de subsistance, une culture, une géographie, des origines, une langue ou toute combinaison de ce qui précède. L'étude exploratoire a identifié dix types de communautés avec lesquelles PANGEA s'engagera en priorité : (1) la NASA ; (2) d'autres agences gouvernementales américaines ; (3) des agences spatiales internationales et des installations de soutien ; (3) des agences gouvernementales américaines et étrangères, y compris des décideurs politiques ; (4) des organisations non gouvernementales ; (5) des organisations non gouvernementales ; (6) des organisations non gouvernementales ; (7) des organisations non gouvernementales. (3) les agences gouvernementales américaines et étrangères, y compris les décideurs politiques et les instituts de recherche nationaux ; (4) la communauté universitaire, les institutions scientifiques et les sociétés scientifiques ; (5) les initiatives de recherche internationales coordonnées ; (6) la société civile, y compris les organisations de conservation (OSC) ; (7) les peuples autochtones et les alliances et organisations des communautés locales ; (8) la communauté des donateurs ; (9) le secteur privé, y compris l'agriculture et les industries du bois ; et (10) les agences intergouvernementales.

PANGEA s'engage à impliquer les communautés de manière inclusive et non hiérarchique. Chaque communauté jouera un rôle dans la planification, la mise en œuvre et l'héritage à long terme de PANGEA. Un engagement respectueux et équitable avec les peuples autochtones et les organisations de la société civile, par exemple, est essentiel pour connaître les écosystèmes et les besoins locaux, accéder aux sites de recherche, permettre la collecte de données à long terme sur le terrain et relier la recherche de PANGEA à la prise de décision en matière de gestion des terres au niveau local. PANGEA doit s'engager avec les institutions scientifiques locales et internationales pour s'appuyer sur leur travail,

identifier les synergies et tirer parti du cofinancement et des ressources pour accomplir davantage en collaboration, et investir dans la formation formelle et les programmes d'études afin que les générations actuelles et futures de scientifiques puissent bénéficier des travaux de PANGEA. Le soutien des agences gouvernementales sera essentiel pour les efforts de PANGEA en matière de collecte de données aériennes et terrestres et pour les stratégies d'action pour la Terre. Les agences gouvernementales nationales et infranationales sont également bien placées pour appliquer les principaux résultats de la recherche de PANGEA afin d'améliorer la surveillance et le rapport sur le climat et la biodiversité à l'échelle nationale, et de développer des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et à la perte de biodiversité mieux informées. La collaboration avec des organisations intergouvernementales et des donateurs préoccupés par le climat peut permettre à PANGEA de soutenir des activités qui ne seraient pas possibles avec le seul financement de la NASA, notamment en s'engageant auprès des institutions locales d'une manière plus inclusive et équitable sur le plan financier. De nombreuses entreprises privées et associations industrielles sont désireuses d'en savoir plus sur l'évolution de leur environnement et de collecter des données terrestres, aériennes et spatiales afin de comprendre leur impact et d'assurer la durabilité de leurs produits agricoles et des chaînes d'approvisionnement d'autres produits. Bien que les intérêts, les objectifs et les points potentiels d'engagement et de collaboration varient considérablement, toutes ces communautés peuvent contribuer au succès et à l'héritage positif à long terme de PANGEA.

## 8.2 Stratégie d'engagement

Les activités de PANGEA seront coordonnées avec les projets existants et futurs d'autres agences et d'autres pays. S'appuyant sur les enseignements tirés du programme LBA dirigé par le Brésil, PANGEA encouragera la création d'un comité de pilotage scientifique international (SSC). Ce comité renforcera et coordonnera les organisations, les alliances et les activités existantes afin de garantir que PANGEA soutienne le développement d'un réseau de réseaux à long terme qui améliorera et soutiendra l'accessibilité, l'utilisabilité, la transférabilité et les avantages des données, des méthodes, des modèles et des connaissances sur les écosystèmes tropicaux. Le CSD de PANGEA codéveloppera des stratégies pour s'assurer que les scientifiques, les institutions locales et les communautés travaillent ensemble tout au long du projet PANGEA afin de collaborer efficacement dans des contextes géographiques et culturels divers. Au cours de l'ACL, le CSD s'est réuni deux fois par an et a servi de centre d'échange d'informations entre les projets nationaux. Ce comité avait un certain nombre d'attributions, notamment la recommandation de projets à inclure dans le LBA sur la base de critères tels que le sujet, l'adéquation des accords de contrepartie et les plans de renforcement des capacités. Le CSD a assumé une grande partie du fardeau qui aurait pu incomber aux gestionnaires des agences nationales. Les organisations existantes, telles que l'Initiative scientifique du bassin du Congo et l'ACL brésilienne existante, sont prêtes à servir de partenaires pour la coordination des études scientifiques de PANGEA. De même, PANGEA a établi des relations avec le GATC au cours du processus de cadrage. Le GATC, créé en 10 ans par des communautés autochtones tropicales, représente 24 pays et plus de 35 millions de personnes qui occupent plus de 958 millions d'hectares de terres. Le partenariat avec la GATC permettra à la PANGEA d'impliquer les communautés autochtones de manière significative et mutuellement bénéfique.

Dans le cadre d'ABoVE, le bureau du cycle du carbone et des écosystèmes de la NASA a entamé des consultations avec les Premières nations du Canada et les groupes autochtones d'Alaska avant que l'équipe de définition scientifique ne soit réunie. ABoVE s'est engagé de manière proactive avec les

membres des Premières nations pour finaliser la conception expérimentale de la phase 1, avant le début des activités sur le terrain. L'équipe d'ABoVE a continué à s'engager auprès des membres des Premières nations pour les tenir au courant des activités, notamment en ce qui concerne les perturbations pertinentes (par exemple, les incendies). Par exemple, ABoVE a donné la priorité à la visite des zones brûlées et à la fourniture d'informations pour aider les communautés à comprendre les catastrophes, à s'y adapter et à les surmonter. PANGEA s'appuiera sur les enseignements importants tirés d'ABoVE.

**Le processus de coproduction a débuté lors du cadrage de PANGEA et de la rédaction de ce livre blanc, qui a été réalisé en collaboration avec les dirigeants autochtones de l'Alliance mondiale des collectivités territoriales (GATC). Si PANGEA est sélectionné, la coproduction avec les peuples autochtones et les communautés locales commencera immédiatement et sera maintenue tout au long du processus.**

PANGEA travaillera également en partenariat avec de nombreuses institutions scientifiques situées dans les forêts tropicales ou disposant d'une expertise en matière de recherche dans ce domaine. PANGEA établira un réseau novateur d'experts en recherche, de scientifiques en début de carrière et d'institutions scientifiques. Un intérêt particulier de ce partenariat est de faciliter le co-développement des connaissances et de soutenir le transfert de technologie pour générer des capacités dans les institutions locales et régionales. Le réseau PANGEA s'efforcera tout particulièrement d'inclure, d'engager et de former la prochaine génération de scientifiques et de techniciens. PANGEA impliquera les institutions scientifiques partenaires de la manière suivante :

- Co-développer la recherche, l'analyse et les applications potentielles.
- Identifier les sites de terrain, les infrastructures de recherche et les capacités essentielles aux objectifs de recherche de PANGEA.
- Coproduire, partager et gérer les données ; soutenir le développement d'infrastructures de données, d'équipements et de compétences en matière de gestion dans les institutions locales et régionales ; soutenir la création de banques de données régionales ou nationales pour conserver les données de terrain et de télédétection ainsi que les résultats des modèles numériques afin que les connaissances émergentes puissent être intégrées et appliquées aux demandes régionales et nationales en matière de développement socio-économique et d'élaboration de politiques.
- Renforcer et élargir les infrastructures de recherche et l'instrumentation des institutions scientifiques locales et régionales afin qu'elles puissent développer et mener des recherches à long terme.
- Concevoir et mettre en œuvre des stratégies visant à soutenir le renforcement des capacités des enseignants et des chercheurs en début de carrière dans les universités et les instituts de recherche.

Les applications de PANGEA ont également un fort potentiel pour engager le secteur privé, y compris, mais sans s'y limiter, a) les agro-industries et les coopératives qui cultivent et/ou récoltent des produits agricoles, du bois et des produits forestiers non ligneux ; b) les industries extractives ; c) les entreprises énergétiques ; d) les entreprises de big data ; e) les conglomérats et les institutions financières qui investissent dans, achètent et/ou vendent l'un des types d'entreprises susmentionnés ; et f) les entreprises impliquées dans l'écotourisme. Le profil des entreprises présentes dans chaque paysage

où PANGEA est mis en œuvre variera, allant des sociétés aux petites et moyennes entreprises, en passant par les coopératives et les associations.

## 9 Permettre à la science de la Terre de passer à l'action

**PANGEA met l'accent sur les biomes tropicaux historiquement peu étudiés et permet à l'une des régions les plus vulnérables de la planète de faire face aux conséquences du changement climatique et de l'utilisation des terres, tout en reconnaissant et en documentant les contributions globales de la biodiversité tropicale à la résilience dans le système terrestre interconnecté.** PANGEA donnera la priorité aux efforts stratégiques de la NASA "Earth Science to Action" (ES2A) qui combleront le fossé entre les progrès rapides de la technologie et les besoins de la société en matière d'accès à des plates-formes de prise de décision fondées sur la science.

La réalisation des objectifs scientifiques et de mesure de PANGEA fera progresser les capacités de surveillance dans les biomes forestiers tropicaux de manière à répondre aux besoins directs des utilisateurs finaux, là où les lacunes en matière de données et de connaissances limitent l'utilité des nouveaux et futurs capteurs satellitaires. Cette section présente les moyens par lesquels PANGEA permettra aux sciences de la Terre d'agir (ES2A) dans des domaines essentiels tels que le changement climatique et la surveillance du carbone, la conservation de la biodiversité, l'agriculture durable et les moyens de subsistance. L'adoption des produits de la recherche nécessite un engagement significatif de la part de l'utilisateur final, c'est pourquoi cette section détaille également les processus actuels et futurs que le projet emploie pour garantir l'adoption des résultats de la recherche par les utilisateurs. L'engagement précoce, intensif et diversifié des partenaires de PANGEA au cours de la phase de cadrage pour la co-conception est fondamental pour garantir l'adoption et l'utilisation des produits de données. L'engagement d'utilisateurs finaux potentiels lors de divers forums tels que la COP 16 sur la biodiversité en Colombie a démontré l'intérêt d'une grande variété d'utilisateurs finaux potentiels pour les produits de PANGEA, y compris des acteurs du secteur privé, des gouvernements, des ONG et des universités. Sur la base du retour d'information de la phase de cadrage (voir annexes C et F), les produits de données de PANGEA seront très accessibles et conviviaux, et incluront des informations sur les approches de mise à l'échelle, offriront du matériel éducatif, et poursuivront un dialogue bidirectionnel qui sensibilise à PANGEA et à ses produits tout en recueillant un retour d'information sur les besoins de l'utilisateur. PANGEA prévoit de faire progresser les méthodologies permettant d'associer les connaissances locales, traditionnelles et écologiques aux données de télédétection, ce qui offre à la fois des possibilités d'améliorer la compréhension scientifique et de découvrir de nouvelles voies pour mettre les produits de PANGEA entre les mains des décideurs et des personnes chargées de prendre des mesures.

## 9.1 Applications des résultats de la recherche PANGEA

### 9.1.1 Stabilité de la séquestration du carbone et flux de méthane

**Tableau 9.** Applications de la recherche PANGEA pour la stabilité du piégeage du carbone et les flux de méthane.

GCF-TF : Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts. OSFAC : Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale.

QUESTIONS SCIENTIFIQUES	APPLICATION DE LA RECHERCHE	PARTENAIRES POTENTIELS ET/OU RELAIS D'IMPACT
Q1, Q2, Q3, Q8, Q15, Q16, Q18-Q20, Q25, Q27	Cartographier et quantifier la <b>stabilité à long terme du piégeage du carbone</b> (c'est-à-dire sa permanence sur les marchés du carbone)	U.S. GHG Center, GEO-TREES, CTrees, Land and Carbon Lab (WRI), OSFAC, GCF-TF, Woodwell, SilvaCarbon, IPCC
Q1, Q2, Q3, Q18, Q27	Cartographie et quantification des <b>prévisions de flux de méthane</b> tropical	Centre américain des GES, SERVIR, WRI

**Cartographier et surveiller les stocks et les flux de carbone tropical** : Ces activités sont essentielles pour boucler le budget mondial du carbone, limiter les projections climatiques et améliorer la mesure, la notification et la validation (MRV) des crédits de carbone. Il faut pour cela améliorer les projections climatiques en réduisant l'incertitude entourant les flux de carbone des forêts tropicales, les changements d'affectation des terres tropicales et les réactions des forêts tropicales aux changements climatiques. Les résultats de PANGEA peuvent améliorer notre compréhension du bilan carbone, soutenir les marchés du carbone et améliorer la compréhension des émissions de CH<sub>4</sub>. PANGEA se coordonnera avec l'activité du Centre américain des gaz à effet de serre pour déterminer les domaines d'alignement et les opportunités pour PANGEA de contribuer aux données et à la compréhension qui répondent aux besoins des parties prenantes (National GHG MMIS Strategy, 2023).

**Comprendre les contributions des forêts tropicales au budget carbone** : Il est essentiel d'améliorer les projections relatives au changement climatique, notamment en réduisant l'incertitude entourant les flux de carbone des forêts tropicales, les changements d'affectation des terres tropicales et les réactions des forêts tropicales au changement climatique, selon le rapport de mars 2023 du Comité d'action accélérée (FTAC) du Conseil national des sciences et technologies (NSTC) sur les services climatologiques. Le 6e rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC AR6) note que la télédétection est prometteuse pour améliorer la précision des estimations du carbone forestier, mais cite l'incertitude des estimations provenant des observations de la Terre comme une lacune importante (GIEC AR6). PANGEA offre la possibilité de remédier directement à cette limitation, par exemple en fournissant au groupe de travail III du GIEC les réponses aux questions scientifiques 2, 3, 8, 13, 14 et 25-27 lors de l'élaboration des septième et huitième rapports d'évaluation, ce qui pourrait réduire l'incertitude et améliorer les estimations du carbone.

**Améliorer le marché du financement du carbone** : Les approches de financement du carbone ont gagné en popularité dans les communautés tropicales et impliquent que les entités polluantes transfèrent des paiements aux gouvernements locaux et aux communautés pour diverses mesures

correctives des émissions de carbone, notamment la protection des forêts, le reboisement, l'amélioration de la gestion des forêts et la création de plantations forestières (Anderegg et al., 2020 ; Morita & Matsumoto, 2023). Toutefois, les marchés du carbone sont limités par un manque de confiance dans les méthodes, des coûts de surveillance élevés et des préoccupations croissantes quant à leur viabilité à long terme (Anderegg et al., 2020 ; Pan et al., 2024). Les avancées de PANGEA en matière de compréhension des processus, de cartographie des stocks et des flux de carbone tropical et de prévisions spatialement explicites du futur puits de carbone tropical peuvent directement soutenir les outils de cartographie et de quantification de la stabilité à long terme de la séquestration du carbone dans les forêts tropicales, notamment les suivants

- Collaborer avec le GATC pour permettre aux communautés locales et autochtones de combiner les résultats de PANGEA sur les flux de carbone dans leurs territoires avec le suivi communautaire des changements fonciers afin d'estimer la séquestration du carbone pour la validation et la commercialisation des crédits ;
- Partenariat avec le groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts (GCF-TF) pour soutenir la mise en œuvre de leur plan d'action pour une nouvelle économie forestière en fournissant des stocks de carbone, des flux et des données sur la biodiversité interconnectée évaluant l'impact des stratégies de décarbonisation juridictionnelles ; et
- Collaboration avec le Forest Stewardship Council (FSC) pour exploiter les résultats de PANGEA et les avancées méthodologiques sur les stocks et les flux de carbone forestier en réponse au changement climatique et aux interactions plantes-animaux, afin de développer un système d'aide à la décision qui aidera les détenteurs de certificats à atténuer les effets du climat sur la sylviculture dans les tropiques et à gérer les forêts plus efficacement pour obtenir des résultats combinés en matière de séquestration du carbone et de conservation de la biodiversité.

**Cartographie et quantification des prévisions de flux de méthane :** L'incertitude liée à la prévision des futures émissions de méthane provenant des tropiques pourrait conduire à des prévisions climatiques mondiales inexactes, ce qui rendrait difficile l'évaluation de l'ensemble des impacts du changement climatique. En améliorant notre compréhension des flux de méthane tropicaux, nous pourrons affiner les bilans carbone mondiaux, mieux anticiper les changements climatiques futurs et élaborer des stratégies d'atténuation plus efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. PANGEA fera progresser les capacités de surveillance des flux naturels et anthropiques de méthane tropical par télédétection satellitaire, conformément aux besoins et aux activités du Centre américain des gaz à effet de serre (U.S. Greenhouse Gas Center). Ces efforts seront menés en collaboration avec des partenaires tels que les centres régionaux SERVIR et le Land and Carbon Lab dirigé par le World Resources Institute afin de faire progresser les capacités de l'expertise technique locale à la cartographie mondiale et aux applications de surveillance.

## 9.1.2 Conservation de la biodiversité

**Tableau 10.** Applications de la recherche PANGEA pour la conservation de la biodiversité.

QUESTIONS SCIENTIFIQUES	APPLICATION DE LA RECHERCHE	PARTENAIRES POTENTIELS ET/OU RELAIS D'IMPACT
Q5, Q6, Q7, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17	Cartographie de la biodiversité pour soutenir la <b>connectivité des paysages</b> et la <b>mise en œuvre de corridors</b> , ainsi que la <b>restauration des forêts tropicales</b> (en accord avec l'Atlas des écosystèmes)	Institut de recherche sur les ressources biologiques Alexander von Humboldt, Alliance Bioversity CIAT, OSFAC, Conservation International, Agence spatiale européenne, Bureaux régionaux de l'IUCN, AFR100
Q5, Q6, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17, Q23-24, Q26, Q28,	Renforcer et éléver les communautés autochtones, locales et traditionnelles grâce à l' <b>intégration des savoirs traditionnels, des savoirs traditionnels locaux et des savoirs traditionnels traditionnels à la télédétection</b> .	NASA Indigenous Peoples Initiative, Global Alliance of Territorial Communities, Rights & Resources Initiative, Congo Basin Institute School for Indigenous and Local Knowledge, MapBiomass, Woodwell Climate Research Center

Le premier objectif du Cadre mondial pour la biodiversité à l'horizon 2030 est de "planifier et gérer toutes les zones afin de réduire la perte de biodiversité" tout en respectant les droits des peuples autochtones et des communautés locales (CDB, 2030). Pour ce faire, un projet de l'envergure de PANGEA est nécessaire. Les objectifs 2 et 3 consistent à restaurer 30 % de tous les écosystèmes dégradés et à conserver 30 % de toutes les terres, eaux et mers. Cependant, la rareté et la qualité des données ont limité la capacité à évaluer les progrès réalisés par rapport à ces objectifs ([Évaluation de la déclaration sur les forêts](#), 2024). PANGEA soutiendra la conservation de la biodiversité de trois manières :

**Meilleure compréhension de la biodiversité :** PANGEA permettra de mieux comprendre la biodiversité à différentes échelles. L'Atlas mondial des écosystèmes du Groupe sur l'observation de la Terre (GEO), soutenu par la Convention sur la diversité biologique (CDB) et la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), s'efforce de réunir des cartes des écosystèmes mondiaux, régionaux et nationaux de grande qualité en une seule ressource en ligne ouverte à tous. L'Atlas mondial des écosystèmes a pour priorité de cartographier "la structure et la fonction des écosystèmes mondiaux avec un niveau de détail sans précédent". **PANGEA comblera les principales lacunes en matière de données d'étalonnage et de validation dans le biome le plus diversifié de la Terre et soutiendra directement cet effort en collaboration avec l'U.S. Geological Survey (USGS), l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), l'Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), et d'autres organismes.** De même, PANGEA catalysera la télédétection par la NASA des variables essentielles de la biodiversité (EBV), telles que les effets biologiques des incendies et des inondations irrégulières, afin de combler les lacunes de données hautement prioritaires identifiées par le réseau d'observation de la biodiversité du Groupe sur l'observation de la Terre (GEO BON ; Skidmore et al., 2021). PANGEA comprend que l'intégration de diverses sources de connaissances améliore la compréhension globale et donnera la priorité à l'engagement avec les alliances et les organisations des peuples autochtones et des communautés locales pour renforcer et éléver les communautés autochtones, locales et traditionnelles grâce à l'**intégration des connaissances autochtones, locales et traditionnelles (IEK, LEK, TEK) avec la télédétection**. [PANGEA](#) soutiendra les efforts initiés et menés par l'Alliance mondiale des communautés territoriales (GATC), dont le mouvement de femmes organise déjà une formation à la collecte de données par drone, et l'Initiative pour les droits et les ressources (RRI), qui s'est associée à Woodwell dans le passé pour quantifier et estimer le carbone stocké sur les terres des

communautés autochtones, afro-descendantes et locales ([note d'information](#), [rapport de recherche](#)). Des initiatives similaires mettant l'accent sur la biodiversité suscitent un vif intérêt.

**Faciliter les actions de conservation de la biodiversité :** La conservation de la biodiversité peut faire des progrès considérables grâce à des observations à grande échelle sur les gradients de perturbation. Par exemple, PANGEA peut travailler avec l'organisme régional de coordination environnementale du bassin du Congo, la Commission des forêts d'Afrique centrale (COMIFAC), et son bureau régional de télédétection, l'OSFAC, pour fournir des cartes actualisées des réactions probables des forêts au changement climatique, ce qui permettra aux planificateurs de l'utilisation des terres d'identifier des corridors potentiels de grande valeur pour la conservation transfrontalière de la faune et de la flore. Les utilisateurs sur le terrain, tels que le Centre national de recherche scientifique et technologique du Gabon (CENAREST), le ministère camerounais des forêts et de la faune (MINFOF) et l'Institut congolais pour la conservation de la nature (ICCN), peuvent utiliser ces outils, ces données et ces connaissances pour guider et surveiller les activités de conservation. De même, les efforts de restauration des forêts nécessitent une meilleure compréhension des interactions entre les plantes et les animaux, y compris les espèces qui peuvent soutenir efficacement les efforts de restauration et où. En répondant aux questions scientifiques 10-13, 18 et 27, PANGEA délimitera les processus complexes qui soutiennent la régénération des paysages forestiers tropicaux. Ces résultats pourront être partagés avec la myriade d'initiatives de plantation d'arbres à travers les tropiques afin d'améliorer leur efficacité et leur efficience. Ce travail est essentiel pour des initiatives telles que AFR100, l'initiative de restauration des paysages forestiers africains visant à restaurer les terres dégradées et déboisées de l'Afrique, et 30x30.

**Suivi et amélioration des efforts de conservation de la biodiversité :** En outre, les partenariats avec des collaborateurs clés identifiés dans l'étude exploratoire permettront d'accélérer le suivi de la biodiversité et le développement de plateformes d'utilisateurs. Par exemple, l'avènement d'efforts novateurs en matière de gestion des terres, tels que les autres mesures de conservation efficaces (OECM), promet d'atteindre des objectifs internationaux tels que le 30x30, mais l'impact de ces nouveaux types de gestion sur la biodiversité n'est pas connu. Des organisations telles que l'IUCN et la Campagne pour la nature peuvent utiliser les données et les méthodologies de PANGEA qui améliorent l'évaluation et l'identification des changements d'utilisation des terres afin d'évaluer l'efficacité des OECM en tant qu'outils de conservation de la biodiversité. De même, PANGEA peut s'associer à des initiatives de financement de la nature telles que Fund for the Amazon et Tropical Forests Forever Fund pour développer des approches globales et peu coûteuses afin de contrôler si leur financement a un impact sur la biodiversité.

### 9.1.3 Agriculture et moyens de subsistance durables

**Tableau 11.** Applications de la recherche PANGEA pour l'agriculture et les moyens de subsistance durables.

QUESTIONS SCIENTIFIQUES	APPLICATION DE LA RECHERCHE	PARTENAIRES POTENTIELS ET/OU RELAIS D'IMPACT
Q6, Q9, Q14, Q17	<b>Intensification de la production agricole</b> et amélioration des rendements	SERVIR, IITA, NASA Harvest, Land and Carbon Lab (WRI)
Q14, Q16, Q17, Q19	Promouvoir la <b>production agricole durable</b> , y compris l'influence du climat	SERVIR, IITA, Alliance Bioversity & CIAT
Q3, Q16, Q19	Améliorer la <b>traçabilité de la chaîne d'approvisionnement</b> des produits de base agricoles	Alliance Bioversity & CIAT, WRI, secteur privé, organismes de certification, régulateurs
Q3, Q8, Q14, Q15, Q16, Q27	Améliorer les <b>alertes et les réponses aux catastrophes</b> (par exemple, incendies, inondations, sécheresse)	SERVIR, IITA, Alliance Biodiversité & CIAT, MapBiomas, Observatoire national du changement climatique du Cameroun

Les écosystèmes tropicaux abritent 3 milliards de personnes et produisent des denrées agricoles qui sont exportées et consommées dans le monde entier. Identifier des alternatives bioéconomiques à la production agricole tout en intensifiant l'agriculture dans les régions tropicales, en la rendant plus durable et plus résistante au changement climatique, et en améliorant les capacités à tracer les produits agricoles jusqu'à leur origine sont autant d'éléments essentiels pour réduire la pression de la déforestation sur les forêts tropicales tout en répondant à la demande mondiale croissante. PANGEA soutiendra ces efforts de la manière suivante :

**Amélioration de l'intensification :** Le suivi des cultures par satellite permet d'évaluer les niveaux de production en temps quasi réel, en comparant les zones d'intervention et de contrôle sur de grandes distances, afin de fournir des données essentielles sur l'efficacité des efforts d'intensification et d'aider les agriculteurs à prendre des décisions. Dans le bassin du Congo, où la plupart des exploitations agricoles sont petites, entrecoupées d'une mosaïque de forêts et difficiles d'accès, la télédétection peut aider à comprendre la pénétration des nouvelles méthodes et technologies à distance. PANGEA développera la capacité d'utiliser la télédétection par satellite pour l'agriculture de précision dans les tropiques, y compris la cartographie améliorée des types de cultures, la cartographie de l'efficacité de l'utilisation des nutriments et de l'eau, et l'estimation du rendement des cultures. Ce travail sera effectué en collaboration avec des partenaires clés travaillant dans ce domaine, notamment avec l'Institut des ressources mondiales (WRI) pour soutenir le Land and Carbon Lab.

**Durabilité et capacité d'adaptation accrues :** L'agriculture dans le contexte du changement climatique exigera des agriculteurs qu'ils produisent plus de nourriture dans des circonstances de plus en plus imprévisibles, y compris des régimes de précipitations changeants et des périodes de chaleur intense. En tant qu'acteur majeur du changement climatique, l'agriculture fait l'objet d'un mouvement visant à la rendre plus durable, en réduisant l'utilisation d'engrais et de pesticides, en diminuant la consommation d'eau et en redoublant d'efforts pour lutter contre l'érosion grâce à la télédétection des besoins des cultures. Cette "agriculture de précision" est déjà courante aux États-Unis, mais elle fait défaut dans la plupart des régions tropicales, car les données et les méthodes sous-jacentes sont incomplètes. PANGEA travaillera avec des collègues de l'Institut international d'agriculture tropicale (IITA), de l'Alliance Bioversity-CIAT et de l'Institut international de gestion de l'eau (IWMI) pour

développer et déployer des techniques telles que la surveillance de la santé des cultures à l'échelle de l'exploitation, spatialement explicite, qui permettra à ces organisations d'identifier rapidement les menaces pesant sur la sécurité alimentaire et de réagir en prenant des mesures d'atténuation.

**Amélioration de la traçabilité :** Le PANGEA permettra d'utiliser de nouveaux capteurs tels que NISAR, BIOMASS et SBG pour détecter de multiples formes d'expansion agricole dans les forêts tropicales, ce qui permettra aux entreprises de produits agricoles d'évaluer plus facilement l'impact de leurs chaînes de valeur sur le changement d'utilisation des terres. Des entreprises telles que Satelligence utiliseront les données de PANGEA pour démontrer la conformité à l'EUDR de certaines des plus grandes entreprises agroalimentaires du monde. Les améliorations méthodologiques résultant de l'acquisition des données de PANGEA peuvent également améliorer notre capacité à utiliser les outils de télédétection pour distinguer l'agroforesterie complexe des forêts secondaires, ce qui constitue actuellement une lacune majeure qui compromet la capacité à reconnaître et à cartographier les exploitations de café et de cacao qui utilisent des méthodes d'ombrage plus durables. PANGEA travaillera avec des partenaires comme Alliance Bioversity CIAT pour appliquer ces améliorations afin d'aider les agriculteurs et les coopératives agricoles à démontrer leur conformité et à commercialiser des produits de grande valeur. Ces activités permettent également à PANGEA d'avoir un impact sur d'autres secteurs de subsistance, tels que les paiements pour les services écosystémiques, les bioéconomies et les produits forestiers non ligneux.

**Amélioration des alertes et des réponses aux catastrophes :** Les sécheresses, les inondations, les parasites et les chaleurs extrêmes menacent tous la production agricole sous les tropiques. Là où l'adaptation de l'agriculture au changement climatique est insuffisante, les politiques et les pratiques telles que les systèmes d'alerte précoce, les alertes en cas de catastrophe et l'amélioration des produits d'assurance pour les petits exploitants agricoles sont essentielles. Les efforts de PANGEA pour cartographier les activités et les changements d'utilisation des terres, comprendre les effets du climat sur la phénologie et estimer les concentrations de nutriments végétaux à distance contribueront tous à ces solutions politiques. Par exemple, l'amélioration de la télédétection des limites des exploitations agricoles, du type de culture et du rendement des cultures à l'échelle du champ permettra de réduire les coûts de surveillance des produits d'assurance axés sur le climat pour les petits exploitants agricoles.

Afin de concrétiser les gains potentiels pour la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance, PANGEA a fait appel à des partenaires de la recherche agricole tels que NASA Harvest, SERVIR, le Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale (CGIAR), notamment l'IITA, et des partenaires travaillant à la jonction des forêts et de l'agriculture, notamment le CIAT, l'Institut des ressources mondiales et le Centre pour la recherche forestière internationale et l'agroforesterie mondiale (CIFOR-ICRAF). Les informations partagées par ces partenaires au cours du processus de définition du champ d'application de PANGEA ont directement éclairé les questions scientifiques de PANGEA afin de potentialiser les résultats de l'Action pour la Terre. Des partenaires tels que l'IITA et le CIAT sont spécialisés dans la mise en pratique des résultats de la recherche et s'appuient sur des décennies d'expérience avec des partenaires du secteur privé et du gouvernement.

## 9.2 Processus de mise en œuvre des sciences de la Terre

### 9.2.1 Engagement des utilisateurs

Un intérêt substantiel ne suffit pas à garantir que les produits de la NASA seront utilisés. Une application efficace de la recherche exige que les communautés d'utilisateurs finaux soient identifiées et impliquées dès le début et qu'elles soient partenaires dans la conception de la recherche et le développement des outils. Cela nécessite une planification avancée, des intentions et des ressources. C'est pourquoi PANGEA s'est investie dès la phase de cadrage dans la mise en place des bases de l'application des résultats de la recherche. Plus précisément, PANGEA aborde les principes directeurs suivants de la stratégie ES2A de la NASA (2024-2034) :

- **Amplifier l'impact grâce aux partenariats :** L'investissement de PANGEA dans l'engagement communautaire a attiré un large éventail de partenaires, y compris des gouvernements internationaux, des donateurs et des communautés locales (voir la *section 8* pour plus de détails sur l'engagement communautaire). Ces partenaires comprennent des utilisateurs potentiels, des fournisseurs de données et des bailleurs de fonds potentiels pour les applications - ces derniers contribueront à rendre le travail de PANGEA rentable en complétant les ressources en sciences de la Terre de la NASA avec des fonds pour soutenir le renforcement des capacités, l'engagement communautaire et la traduction de la recherche (voir la *section 10.2, Possibilités de cofinancement*, pour plus d'informations). PANGEA s'appuie également sur de vastes partenariats internationaux, allant des agences spatiales nationales susceptibles de fournir des données complémentaires aux communautés tropicales qui participeront à la collecte des données et, éventuellement, à leur utilisation et à la prise de mesures. PANGEA a engagé ces partenaires dès le début du processus afin d'accroître leur investissement et leur contribution au codéveloppement des produits finaux potentiels.
- **Engager une main-d'œuvre diversifiée et la communauté des sciences de la Terre au sens large :** Les objectifs transdisciplinaires de PANGEA sont soutenus par une équipe diversifiée qui va des scientifiques des données aux économistes et qui provient de la NASA, du monde universitaire, d'organisations à but non lucratif, d'autres agences fédérales et de gouvernements du monde entier. L'engagement international étendu de PANGEA offre également des opportunités de travailler avec et de recruter les meilleurs cerveaux au niveau mondial pour les efforts de la NASA en matière de sciences de la Terre, tandis que les efforts de renforcement des capacités et de formation (voir *section 7*) aident à préparer la prochaine génération de scientifiques.

Au cours de la phase de délimitation du champ d'application, PANGEA a mené une action de sensibilisation intensive auprès des utilisateurs potentiels (voir l'*annexe B*) et s'est engagée auprès d'eux sur les questions et les données qui leur sont les plus utiles. Depuis sa création, PANGEA s'efforce donc de combler le fossé entre les questions scientifiques posées et les besoins des utilisateurs finaux en matière de prise de décision. L'engagement communautaire est au cœur de la stratégie ES2A de PANGEA (voir la *section 8* pour plus de détails sur la manière dont PANGEA engagera la communauté). Nous sommes conscients que l'engagement de la communauté comporte le risque de créer des attentes qui ne peuvent être satisfaites par le projet, en grande partie parce que les données aéroportées collectées ont une portée spatio-temporelle limitée et seront plus épisodiques que nécessaire pour répondre à de nombreuses applications d'utilisateur et aux besoins de prise de décision. PANGEA s'efforcera de communiquer clairement et à plusieurs reprises les

limites des données du projet, qui sont nécessairement limitées dans l'espace et dans le temps. PANGEA s'efforcera également de tirer parti de l'élan créé par une période de projet brève mais intense pour créer, développer et renforcer une communauté d'utilisateurs nouvelle et plus diversifiée pour les données terrestres de la NASA. La profondeur et la portée de l'engagement de PANGEA dépendront du financement et constituent une priorité dans les opportunités de cofinancement.

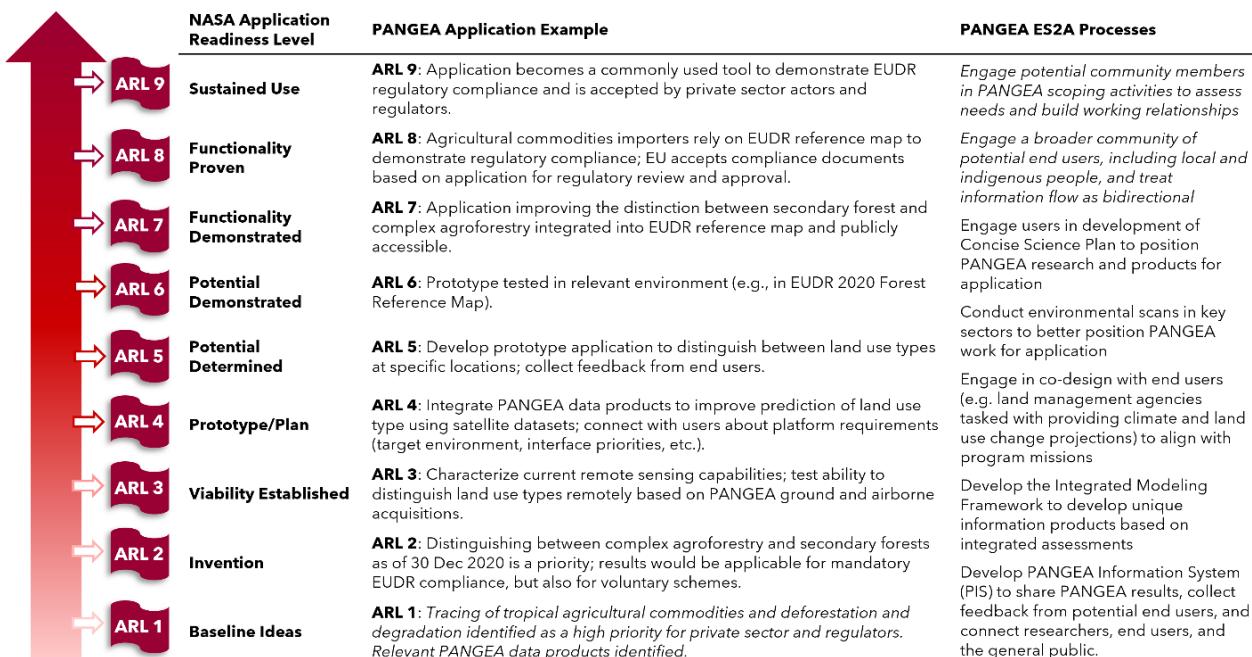
Plus précisément, la PANGEA veillera à ce que toutes les activités d'engagement communautaire mettent l'accent sur les liens entre les données de terrain et les données aéroportées de la PANGEA et les capteurs satellitaires de l'observatoire de la Terre de la NASA (actuels et prévus). Étant donné que les utilisateurs bénéficieront des produits dérivés des observations spatiales, les priorités de PANGEA ES2A se concentrent sur l'avancement des besoins et des capacités de surveillance spécifiques qui utilisent les services en cours, c'est-à-dire les missions satellitaires (voir l'annexe D). Les données de la campagne aéroportée soutiendront la formation des partenaires axée sur les données opérationnelles avant, pendant et après les avancées de PANGEA en matière d'échelonnement, qui peuvent être utilisées pour récupérer des produits dérivés de satellites. Il s'agit par exemple de la formation et de la préparation au SAR et à l'hyperspectral en collaboration avec SERVIR. Ce faisant, PANGEA créera des communautés d'utilisateurs précoce de NISAR et de SBG dans les tropiques.

PANGEA a également donné la priorité à la recherche d'une gamme diversifiée de partenaires financiers, reconnaissant que la NASA est bien placée pour soutenir la collecte de données, l'analyse et le développement d'outils/plateformes, tandis que d'autres sponsors sont mieux placés pour soutenir des projets de conservation qui appliquent des données et des formes de formation et de renforcement des capacités spécifiques à l'application. La phase de cadrage comprenait également un exercice de visualisation, au cours duquel diverses équipes ont collaboré pour tracer des voies translationnelles comprenant l'acquisition de données, des cas d'utilisation potentiels, le codéveloppement de produits et l'identification de partenaires.

### 9.2.2 Soutenir l'application de la recherche PANGEA

PANGEA exploitera l'engagement de ses partenaires existants et prévus pour intégrer ES2A de manière holistique dans le projet. Il s'agit notamment de procéder à une évaluation des besoins des utilisateurs dans le cadre du plan d'expérience concis et d'effectuer une analyse de l'environnement afin d'identifier les outils existants susceptibles d'intégrer des données. Ceci est particulièrement important car l'intégration dans des outils existants augmente généralement la probabilité d'adoption, d'utilisation et de maintenance à long terme. **La figure 20** illustre l'approche de PANGEA pour faire progresser les résultats à travers les niveaux de préparation des applications (ARL) de la NASA, ce qui dépendra de la combinaison d'un alignement solide sur le sujet avec un engagement réfléchi, précoce et inclusif des partenaires. Bien que l'exemple soit présenté comme un processus linéaire utilisant le cadre ARL de la NASA, PANGEA s'attend à ce que nos activités ES2A soient itératives et parfois non linéaires, ce qui est représentatif des complexités qui définissent la politique et la prise de décision dans le monde réel.

La NASA, ainsi que d'autres agences nationales et internationales, jouent de plus en plus un rôle de premier plan dans le développement et la mise en œuvre de systèmes d'aide à la décision. Ces systèmes sont conçus pour intégrer les résultats des activités de recherche dans un cadre de modélisation afin de fournir des informations aux gestionnaires des terres, aux gouvernements subnationaux et nationaux, entre autres, qui ont besoin d'informations dans un contexte spécifique. Le portail d'information PANGEA (PIP) constituera une plateforme permettant d'approfondir les

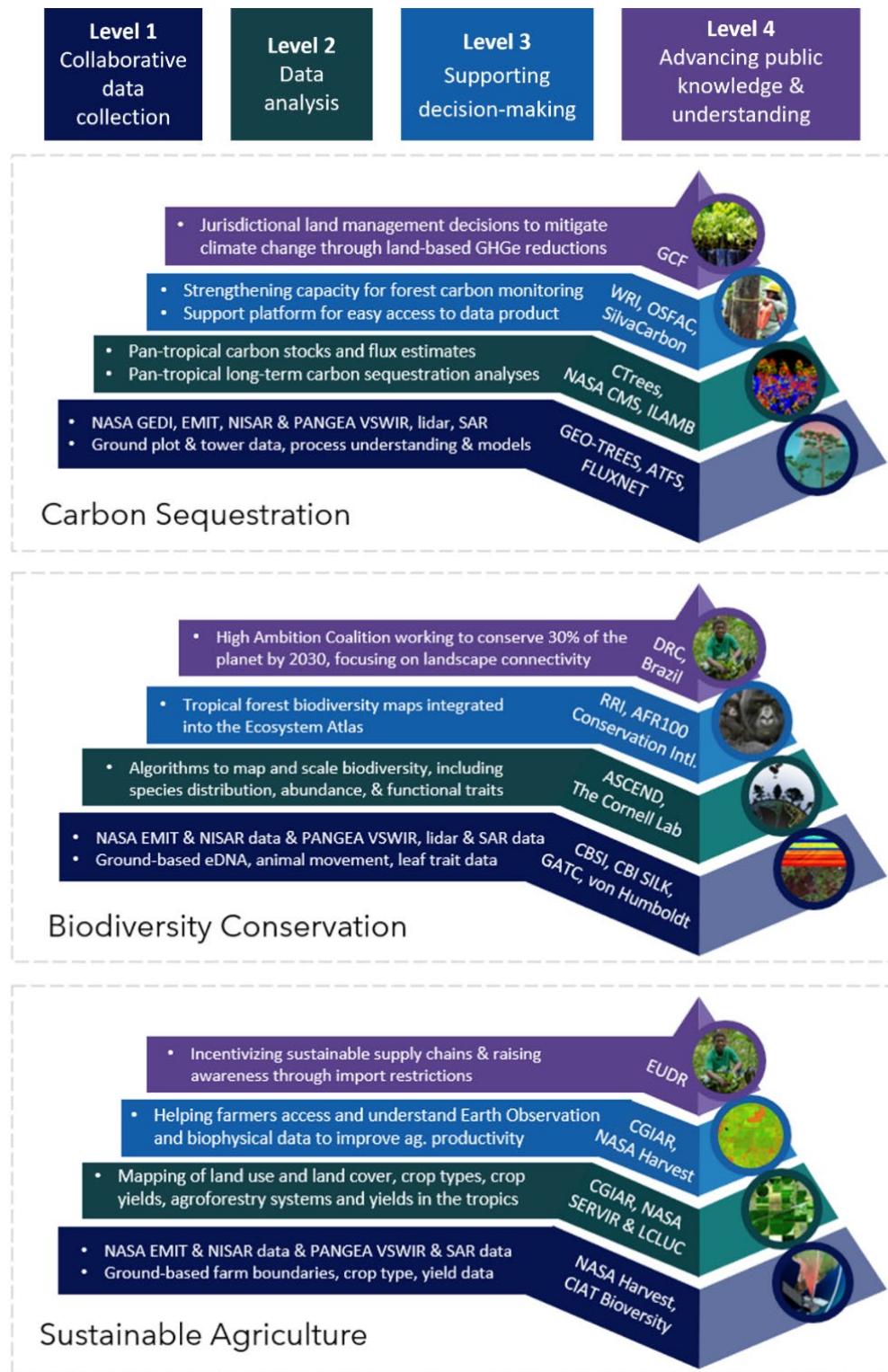


**Figure 20.** Exemple de stratégie d'application du niveau de préparation pour PANGEA, axée sur le soutien au règlement de l'Union européenne sur la déforestation (EUDR). Une réglementation similaire est à l'étude aux États-Unis.

recherches sur l'utilisation des produits d'information satellitaire pour soutenir la prise de décision. Il s'agira d'une plateforme essentielle permettant aux chercheurs de PANGEA d'interagir à plusieurs niveaux avec les scientifiques et les gestionnaires des agences chargées d'évaluer les impacts du changement climatique dans les régions tropicales, ainsi qu'avec les médias et le grand public. Le cadre de modélisation intégrée de PANGEA fournira un autre support pour les activités de l'ES2A en créant des produits d'information uniques basés sur des évaluations intégrées.

La NASA et d'autres agences américaines et internationales reconnaissent de plus en plus la nécessité de développer conjointement des systèmes d'aide à la décision afin d'échanger des informations et des analyses avec les gestionnaires des terres, les gouvernements et d'autres responsables politiques et décideurs. PANGEA développera des produits en collaboration avec ces partenaires qui sont chargés de fournir les données nécessaires à la surveillance des changements climatiques et de l'occupation des sols. Les modèles axés sur les processus qui seront au centre de la recherche dans le cadre de PANGEA correspondent bien aux missions de ces bureaux. Les chercheurs de ces bureaux ont été impliqués dans le processus de définition du champ d'application de PANGEA, et leur contribution a permis d'éclairer les questions de recherche et de faire germer des idées pour l'application des résultats de PANGEA à la recherche.

PANGEA offre également la possibilité de s'engager dans des travaux et des applications transdisciplinaires, notamment en raison de la nature interdépendante du changement climatique, de la conservation de la biodiversité et de la production agricole, qui sont quelques-unes des principales applications des produits PANGEA. La **figure 21** montre le chevauchement potentiel de ces sujets et met en évidence une petite sélection de partenaires qui sont déjà engagés dans des travaux à l'intersection des différents sujets.



**Figure 21.** Exemple de mise en œuvre de la stratégie PANGEA Earth Science to Action, axée sur le piégeage du carbone, la conservation de la biodiversité et l'agriculture durable, et exemples de partenaires déjà engagés dans des activités connexes.

## 10 Faisabilité technique et logistique

PANGEA s'appuiera sur l'expérience de la NASA en matière de campagnes internationales sur le terrain et de campagnes aéroportées réussies, y compris des campagnes récentes dans les Amériques, en Afrique et en Asie. Un certain nombre de campagnes Earth Venture Suborbital (EVS) et d'autres campagnes aériennes internationales de la NASA ont également démontré la faisabilité du déploiement international d'aéronefs de la NASA et d'aéronefs sous-traités par la NASA avec des instruments in situ et de télédétection à l'appui de campagnes pluriannuelles à grande échelle dans les tropiques américains. En 2023, le JPL de la NASA a mené une campagne réussie avec AVIRIS-NG en collectant des données de télédétection avec un avion sous contrat de la NASA au-dessus du Chili, de la Colombie et de l'Équateur pour l'extraction de sources ponctuelles de méthane en coordination avec chaque pays. Cette opération s'est appuyée sur des campagnes antérieures réussies dans la région, notamment des vols UAVSAR en Colombie, en Équateur, au Pérou et en Guyane française, des vols AVIRIS en Colombie, en Équateur et au Chili, et des vols LVIS en Guyane française. La NASA a également prévu des vols AVIRIS au Panama et au Costa Rica pour 2025. En outre, la NASA a mené des recherches approfondies en Afrique, notamment avec SAFARI, AfriSAR-1, AfriSAR-2 et BioSCape. D'immenses investissements sont actuellement réalisés en Afrique pour soutenir d'importants éléments de faisabilité de PANGEA, notamment l'initiative scientifique du bassin du Congo (CBSI), CongoFlux, One Forest Vision, le groupe scientifique pour le Congo, l'African Masters of Machine Intelligence (AMMI) via l'Institut africain des sciences mathématiques (AIMS), la collaboration existante de la NASA avec l'Agence spatiale gabonaise (AGEOS) et l'Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale (OSFAC), ainsi que GEO-TREES. L'équipe PANGEA a été en contact avec le Bureau des océans et des affaires environnementales et scientifiques internationales du département d'État américain, qui soutient avec enthousiasme PANGEA et les avantages qu'il aurait pour la diplomatie environnementale et scientifique.

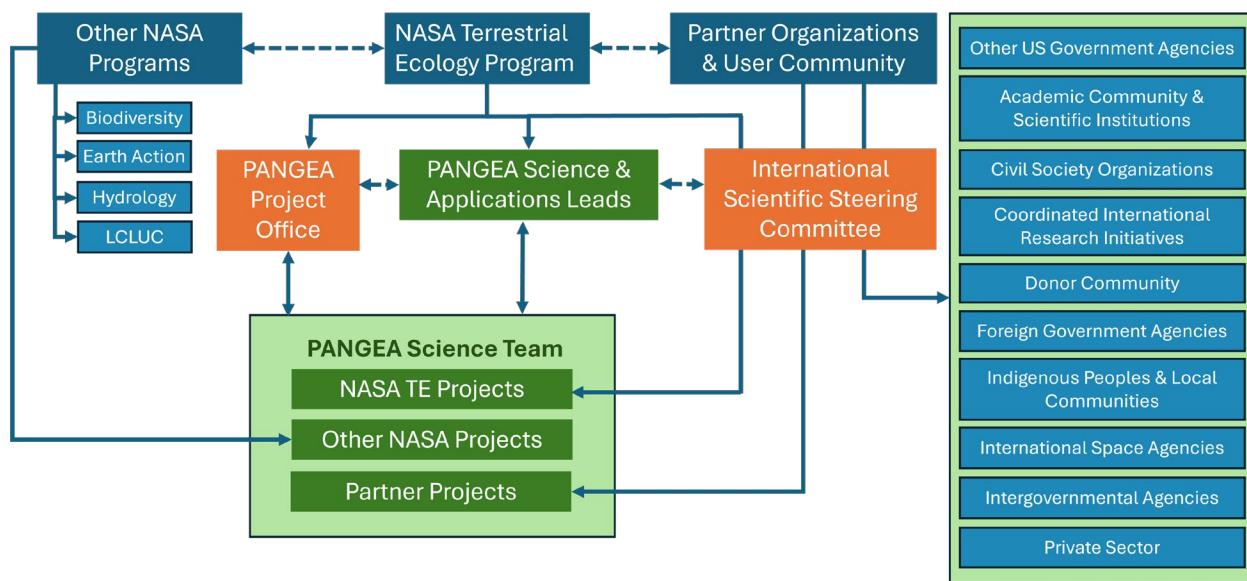
PANGEA nécessitera des déploiements internationaux pouvant avoir lieu dans plusieurs pays. Les défis anticipés comprennent le déploiement et l'entretien des instruments in situ, l'obtention d'une autorisation de vol international pour l'acquisition de données aériennes, l'obtention de visas et de permis de recherche pour les chercheurs américains et internationaux, l'accès aux sites de terrain, les interactions/conflits homme-animal, les troubles politiques ou autres, et la santé et la sécurité des scientifiques et des participants (voir *section 10.5 pour l'évaluation des risques*). L'établissement des relations nécessaires à l'obtention des autorisations de vol pour les pays et les sites de terrain sélectionnés qui font partie du domaine PANGEA sera une première priorité (voir le *point 6.2.4, Observations par télédétection aérienne*). Pour obtenir les autorisations de vol, PANGEA travaillera avec NASA OIIR pour élaborer les dossiers d'autorisation diplomatique nécessaires aux déploiements aériens internationaux. Avant de demander les autorisations de vol, PANGEA travaillera en étroite collaboration avec la NASA et le Département d'État américain pour établir des relations avec les partenaires nationaux, tels que les agences gouvernementales, les ONG et les dirigeants des territoires autochtones, afin d'élaborer des accords qui garantiront des autorisations de vol et des permis de terrain appropriés.

Dans les cas où les aéronefs de la NASA ne peuvent pas obtenir d'autorisation de survol ou acquérir des données à l'aide de leurs propres instruments, PANGEA déployera des moyens commerciaux ou autres, tels que des SLA commerciaux, des instruments commerciaux basés sur des drones, ou des instruments et des aéronefs locaux pour acquérir les ensembles de données aéroportées nécessaires. Ceci est particulièrement important au Brésil, où la NASA s'est toujours heurtée à des restrictions pour

les observations au sol utilisant des instruments et des aéronefs non brésiliens. PANGEA s'appuiera sur les précédents employés par la NASA et le gouvernement américain pour utiliser des fournisseurs commerciaux de données aéroportées afin de collecter les ensembles de données nécessaires (voir section 6.2.4, *Observations de télédétection aéroportées*).

## 10.1 Organisation et gestion

L'organisation et la coordination de PANGEA seront déterminées par la direction du programme de la NASA. Nous présentons un concept d'organisation et de gestion qui reflète un modèle réussi utilisé dans ABoVE et LBA-ECO (**Figure 22**). Cette structure permettra l'organisation et la gestion d'un projet à long terme avec un investissement important de la part de partenariats transdisciplinaires et de collaborations à l'échelle nationale et internationale.



**Figure 22.** Structure organisationnelle proposée pour PANGEA.

### 10.1.1 Gestion des programmes

La direction du programme d'écologie terrestre de la NASA organisera et supervisera PANGEA avec le soutien du *bureau de projet PANGEA*. Ils travailleront au sein de la NASA Earth Science Division pour sélectionner et financer les projets de recherche menés par l'*équipe scientifique PANGEA* en vue de leur participation à PANGEA et pour allouer des ressources au *bureau de projet PANGEA*, notamment au *scientifique du projet PANGEA* et au *scientifique adjoint du projet* (conjointement le *Scientific Leadership [SL]*), qui sont également sélectionnés par la direction du programme. La direction du programme sera chargée de représenter les activités PANGEA au sein de la NASA, y compris les autres programmes de la NASA susceptibles de soutenir les activités PANGEA. La direction du programme coordonnera les activités PANGEA avec d'autres partenaires de recherche issus d'agences nationales et étrangères.

## 10.1.2 Bureau des projets

La mise en œuvre de PANGEA sera soutenue par un *bureau de projet* dirigé par le *chef de projet* nommé par la direction du programme et soutenu par un membre du personnel du projet. Le *scientifique du projet PANGEA* et le *scientifique adjoint du projet* seront *membres de droit* du bureau du projet. Le bureau de projet (a) supervisera et gérera les activités et les projets de recherche PANGEA sur le terrain et aéroportés parrainés par le programme d'écologie terrestre de la NASA et d'autres bureaux de programme de la NASA ; (b) coordonnera et fournira un soutien logistique pour la recherche sur le terrain et les campagnes de télédétection aéroportées parrainées par la NASA, y compris la supervision de la sécurité et de la gestion des risques ; (c) fournira un soutien logistique aux groupes de travail et de coordination PANGEA, y compris le soutien des réunions et des ateliers ; et (d) développera et maintiendra le système d'information PANGEA. Le bureau de projet aura des interactions importantes avec les parties prenantes locales et régionales et partagera la responsabilité de ces interactions avec la direction scientifique. Le bureau de projet aidera les membres de l'équipe scientifique à déposer des demandes de permis auprès des autorités compétentes. En fonction des besoins de l'équipe scientifique, le bureau de projet peut également organiser la collecte de données variables de base et l'installation d'infrastructures sur les sites de terrain. Le bureau de projet sera responsable de la gestion des campagnes scientifiques aéroportées. Les membres de l'équipe scientifique travailleront en étroite collaboration avec le bureau de projet et s'appuieront sur les conseils de son personnel pour les activités sur le terrain, les communications avec les parties prenantes et les autorités locales et nationales, et l'utilisation de la cyberinfrastructure PANGEA.

PANGEA donnera la priorité à une coordination étroite entre l'équipe scientifique PANGEA et les activités "Earth Science to Action". Le chef de projet désignera un point de contact (POC) au sein du bureau de projet pour les applications scientifiques de PANGEA. Ce point de contact surveillera les attentes des partenaires des applications à l'égard de l'équipe scientifique PANGEA. Une communication régulière et transparente avec les partenaires potentiels se poursuivra à toutes les étapes du projet PANGEA, et des mises à jour sur les décisions de poursuivre ou de ne pas poursuivre les applications potentielles seront communiquées rapidement. La réputation internationale de la NASA dépend de l'adéquation entre les besoins des utilisateurs et les investissements et capacités de la NASA, ainsi que de la gestion des attentes de tous les partenaires.

## 10.1.3 Définition de la science

Avant le lancement des études scientifiques PANGEA, un groupe de scientifiques et de responsables scientifiques sélectionnés par le bureau du programme collaboreront avec ce dernier pour concevoir le *plan d'expérience concis*. Ce plan présentera un affinement des idées présentées dans ce document de cadrage. L'objectif du plan affiné est de faire correspondre la portée scientifique aux ressources disponibles. Des recommandations spécifiques concernant les sites de recherche, les besoins en infrastructures scientifiques sur le terrain (y compris l'instrumentation) et les exigences en matière de télédétection aéroportée seront définies dans le plan concis. Le plan d'expérience concis répondra aux besoins de la direction du programme de solliciter des investigations scientifiques et servira de guide à l'équipe scientifique sélectionnée pour ses investigations intégrées visant à répondre aux questions scientifiques de PANGEA.

#### 10.1.4 Mise en œuvre du projet

Le projet PANGEA sera mis en œuvre par l'équipe scientifique PANGEA sélectionnée, avec le soutien du bureau de projet, sur une période nominale de six à neuf ans, comme le prévoit l'annonce A.4 de la NASA de 2022. Un *plan de mise en œuvre du projet* sera élaboré sur la base du plan d'expérience concis. Le bureau du projet sera responsable du plan de mise en œuvre, y compris des mises à jour régulières, dont la fréquence sera déterminée en consultation avec l'équipe scientifique et la direction du programme. Le plan de mise en œuvre détaillera les activités de recherche à mener et précise les rôles et responsabilités des chercheurs impliqués dans ces activités au cours de l'exécution de PANGEA. Un calendrier théorique pour la mise en œuvre du projet est présenté au *point 10.4 (tableau 14)*. Au début du projet, environ un an sera consacré à la préparation des activités de collecte de données sur le terrain et par voie aérienne. La période principale de collecte des données s'étendra sur trois à six ans, en fonction de la durée et de la portée globales du projet. L'analyse des données collectées sera continue tout au long du projet. Nous prévoyons que la collecte de données s'achèvera progressivement un à trois ans avant la fin du projet, afin de laisser le temps d'analyser, d'intégrer et de synthétiser les données. PANGEA laissera un héritage de données et de science ouverte qui soutiendra les futures investigations scientifiques qui répondront aux questions scientifiques de PANGEA et aux nouveaux thèmes scientifiques.

#### 10.1.5 Équipe scientifique et direction scientifique

-L'équipe scientifique, dirigée par un scientifique de projet et un scientifique de projet adjoint, sera composée des chercheurs principaux et des cochercheurs des enquêtes sélectionnées, ainsi que des scientifiques recrutés par ces chercheurs principaux et cochercheurs, y compris des scientifiques postdoctoraux et des étudiants. En étroite coordination avec l'équipe scientifique de PANGEA, le bureau du projet et la direction du programme, le scientifique du projet et son adjoint convoqueront et organiseront les ordres du jour des réunions régulières de l'équipe scientifique de PANGEA. L'équipe scientifique se réunira régulièrement, nominalement avec une réunion en personne par an. Pour les réunions virtuelles, PANGEA s'efforcera d'organiser des réunions en tenant compte des fuseaux horaires des personnes représentées. Ces réunions feront progresser la planification de l'équipe scientifique, l'échange des premiers résultats et faciliteront grandement les interactions entre les participants au projet. Les réunions sont une occasion particulièrement importante pour les étudiants et les scientifiques postdoctoraux de rencontrer les scientifiques chevronnés des autres projets. Les lieux de réunion seront choisis de manière à faciliter les déplacements et à minimiser les complications liées à l'obtention de visas. Le scientifique du projet et son adjoint se réuniront avec la direction du programme et la direction du bureau de projet, au moins une fois par trimestre, pour examiner les progrès réalisés, résoudre les problèmes et discuter des prochaines étapes de la mise en œuvre.

L'expérience des projets antérieurs nous apprend qu'il est important de communiquer en temps utile pour gérer les attentes de l'équipe scientifique PANGEA et des chercheurs des projets et organisations partenaires. Le leadership scientifique PANGEA (SL) communiquera les objectifs de recherche et les résultats de l'équipe scientifique financée par la NASA à divers publics. Le SL travaillera avec les partenaires locaux pour définir les attentes vis-à-vis de PANGEA. Le SL communiquera avec précision et rapidité les mises à jour du projet aux partenaires de recherche locaux. Les présentations, les webinaires et les assemblées générales feront appel à des services d'interprétation et les documents du projet seront disponibles dans les langues des pays participants.

Après la collecte des données PANGEA et au fur et à mesure que les produits de données scientifiques seront disponibles, le SL sera chargé de veiller à ce que les partenaires locaux continuent à recevoir des mises à jour régulières. Le SL donnera le ton de PANGEA et veillera à montrer l'exemple au reste de l'équipe scientifique en ce qui concerne la collaboration inclusive et respectueuse et la valeur de la coproduction de la recherche. Le SL et tous les membres de l'équipe scientifique PANGEA adhéreront aux lignes directrices de la communauté PANGEA.<sup>1</sup>

Les études scientifiques de PANGEA seront gérées par la direction scientifique et menées par l'équipe scientifique. Comme indiqué, l'équipe scientifique comprendra des chercheurs sélectionnés par la NASA et des chercheurs recrutés par les PI et les co-I de l'équipe scientifique. Les études PANGEA concerneront un certain nombre de pays sous les tropiques. Sur la base de l'expérience de la NASA dans le LBA, nous recommandons que toutes les enquêtes aient des chercheurs homologues dans les pays de forêts tropicales humides et s'efforcent de former des scientifiques et des techniciens en début de carrière provenant de pays où la recherche PANGEA est active et d'autres pays des tropiques humides. Cela devrait s'appliquer même aux enquêtes qui n'ont pas de composante sur le terrain. Au cours du LBA, la NASA a appris que cette approche présentait de nombreux avantages. En pratique, elle incite les pays d'accueil à soutenir les travaux de la NASA dans le pays, en raison des capacités renforcées par les chercheurs. Les chercheurs ont constaté que les pays d'accueil fournissaient souvent un effet de levier important pour leurs projets de recherche grâce à des contributions en nature et à des financements, en particulier des bourses d'études. Des décennies après la fin de la présence de la NASA en Amérique du Sud pour la LBA, la NASA dispose toujours d'un vaste réseau de collaborateurs amicaux au sein de la communauté scientifique sud-américaine. L'impact de ces chercheurs sur la science dans leur pays d'origine a été considérable. Pour plus d'informations, voir la section 7, *Renforcement des capacités, formation et éducation*.

**PANGEA mettra l'accent et donnera la priorité à la diversité, à l'équité et à l'inclusion dans tous les aspects du projet, y compris une représentation diversifiée au sein de sa direction.**

L'équipe scientifique de PANGEA privilégiera une représentation diversifiée en termes d'expertise scientifique, de spécialités techniques, d'origine nationale, de race, de sexe, de langue maternelle, de stade de carrière, etc. Les chercheurs en début de carrière ont participé activement à l'élaboration de cette proposition exploratoire et prendront part à toutes les étapes du projet, de même que les représentants des pays participants où se dérouleront les recherches sur le terrain. Les membres de l'équipe doivent s'engager à avoir des interactions respectueuses avec les collaborateurs locaux et la diversité culturelle, et à veiller tout particulièrement à préserver la réputation de la NASA au niveau international.

<sup>1</sup> Les lignes directrices de la communauté PANGEA sont un document évolutif que l'on trouve à l'[adresse](https://tropicalforestscoping.com/community-guidelines/) <https://tropicalforestscoping.com/community-guidelines/>. Les lignes directrices dérivées des guides institutionnels existants peuvent être approuvées par la NASA et modifiées en fonction des besoins de la gestion du programme.

**Le leadership et l'engagement au cours du processus de cadrage de PANGEA ont démontré un soutien exceptionnel pour le projet et la diversité des participants ayant la capacité et l'intérêt de contribuer à PANGEA.**

Au cours du processus de cadrage, les co-responsables des groupes de travail thématiques de PANGEA comprenaient 22 personnes du Nord et du Sud. Les données démographiques suivantes illustrent plusieurs axes de diversité représentés par l'équipe dirigeante de PANGEA et les coresponsables des groupes de travail :

- 42% de femmes (n = 14 sur 33)
- 60% de non-blancs (n = 20 sur 33)
- 30 % des pays du Sud (n = 10 sur 33)
- 27% en début de carrière (n = 9 sur 33)

Il est important de noter que l'équipe de PANGEA s'est efforcée d'obtenir une plus grande représentation des pays du Sud au sein de notre équipe dirigeante. En raison des ressources limitées qui peuvent être allouées pour soutenir directement les participants du Sud, nous avons été limités. De nombreuses personnes hautement qualifiées du Sud ont été débordées et n'ont pas pu contribuer à la direction de l'effort de scoping sans compensation. Cependant, plus de 50 % des personnes ayant participé à l'effort de définition du champ d'application par le biais d'ateliers, de réunions, d'assemblées générales et de symposiums étaient originaires de pays du Sud. Les enseignements tirés du processus de définition du champ d'application ont permis d'orienter les recherches de cofinancement pour le projet PANGEA. L'effort de cadrage a également illustré la capacité de PANGEA à mettre en œuvre la diplomatie scientifique au niveau international.

### 10.1.6 Compétences disciplinaires requises

PANGEA est conçu comme un projet transdisciplinaire. Les scientifiques impliqués dans la recherche PANGEA peuvent s'identifier à une seule discipline ou à plusieurs. Nous attendons la participation de scientifiques liés aux sciences physiques, biologiques et sociales. Les compétences et les connaissances associées à un éventail de disciplines seront représentées au sein de l'équipe scientifique PANGEA. Dans le cadre du programme d'écologie terrestre, nous nous attendons à ce que l'écologie à différents niveaux d'organisation (écosystème, communauté, population) soit fortement représentée. La biogéochimie et la chimie atmosphérique sont depuis longtemps associées aux campagnes TE de la NASA, tout comme la physiologie et l'écophysiologie des plantes. L'équipe scientifique comprendra les compétences et les connaissances d'autres disciplines connexes, notamment les systèmes terrestres, la météorologie, l'hydrologie et les sciences sociales. Les spécialistes de la télédétection seront bien représentés dans l'équipe scientifique.

## 10.2 Possibilités de cofinancement

Les niveaux de mesure Baseline, Threshold et Descope définis dans la section 6.2.1 représentent des projets autonomes de la NASA sans dépendances. Toutefois, compte tenu de l'urgence et de l'importance du sujet, il existe un fort potentiel pour augmenter, voire dépasser, les contributions de la NASA. Au cours de la phase de cadrage, l'équipe de direction de PANGEA a fait des progrès considérables dans la recherche de diverses sources de financement pour compléter l'investissement de la NASA. De nombreuses agences gouvernementales américaines, fondations privées, gouvernements internationaux et organisations philanthropiques ont exprimé leur intérêt pour le soutien des activités liées à la PANGEA qui sont à la fois dans le champ d'application de la NASA et en dehors, y compris le soutien direct aux partenaires internationaux et la mise en œuvre de Earth Science to Action (Les sciences de la Terre à l'œuvre). Les possibilités d'obtenir un soutien supplémentaire de la part de partenaires désireux de faire équipe avec la NASA comprennent les partenaires cités en exemple dans le **tableau 12**. Pour plus de détails, voir l'annexe A, *Lettres de soutien*.

Comme dans d'autres projets de terrain TE tels que BOREAS, LBA et ABoVE, l'équipe PANGEA travaillera avec des sponsors non-NASA afin d'incorporer leurs contributions dans le plan d'expérience concis PANGEA. Ce processus comprendra (1) la définition des activités et des bailleurs de fonds pour s'assurer que le soutien est complémentaire et ne fait pas double emploi ; (2) la rationalisation de la gestion, de la communication et de la supervision entre les sponsors ; et (3) la prise en compte des problèmes de sécurité des données. PANGEA s'appuiera sur l'expérience des TE qui ont réussi à combiner les ressources de la NASA et celles d'autres organismes pour combler les lacunes critiques en matière de connaissances sur les sciences de la Terre, et servira de prototype à la NASA pour faire progresser ce type de partenariat à l'avenir.

**Tableau 12.** Possibilités de cofinancement et de soutien en nature de PANGEA.

USFS-IP : Programmes internationaux de l'U.S. Forest Service. ONACC : Observatoire national du changement climatique (Cameroun).

ZONE DU PROJET	PROGRAMMES DE LA NASA	AUTRE GOUVERNEMENT AMÉRICAINE	GOUVERNEMENT INTERNATIONAL	AUTRES
TÉLÉDÉTECTION	TE, Programmes connexes	NOAA, NSF, USDA, USFS, USGS	AGEOS, ESA, INPE	Land and Carbon Lab, MapBiomass
HÉBERGEMENT DE DONNÉES	TE	DAACs, AmeriFlux (DOE)	ESA, ICOS	Global Forest Watch, Google, MoveBank, Planet
RECHERCHE	TE, Programmes connexes	DOE, NOAA, NSF	UK NERC, UE, Fondation de recherche de São Paulo (FAPESP), CNPq, Belmont Forum	Schmidt Sciences, Fondation Moore
FORMATION ET ÉDUCATION	ARSET, DEVELOP, SERVIR, GLOBE, Initiative des peuples autochtones	USAID, USFS-IP	FCDO (UK), initiative "One Forest Vision" (une vision de la forêt)	AmIT, CBSI, R2FAC, Philanthropies, Donateurs
APPLICATIONS	Action pour la Terre, SERVIR, Récolte	USAID, USFS-IP, USGS	UE, GCF-TF, ONACC, OSFAC	Bezos Earth Fund, NICFI, Fondation Moore, Secteur privé

## 10.3 Science ouverte - Gestion et partage des données

PANGEA facilitera la science en libre accès, encouragera la collaboration et maximisera la valeur des données PANGEA à grande échelle et à long terme, conformément à la stratégie de la NASA pour la science en libre accès (Strategy for Data Management and Computing for Groundbreaking Science 2019-2024). Cette stratégie respectera les principes et les pratiques de la communauté et gardera à l'esprit les directives éthiques et la sensibilité culturelle. PANGEA travaillera également en étroite collaboration avec ses partenaires autochtones pour garantir la souveraineté des données, notamment la souveraineté des données autochtones (IDS). PANGEA s'appuiera sur les succès des projets de terrain antérieurs et exploitera les nouvelles avancées en matière de science ouverte et de concepts et technologies de gestion des données.

PANGEA intégrera des flux de données provenant de multiples systèmes d'acquisition de données, partenaires, pays et paradigmes (par exemple, paradigme scientifique occidental, connaissances écologiques autochtones, connaissances écologiques traditionnelles) (voir **tableau 13**). La gestion des données de PANGEA sera conforme aux principes directeurs FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) afin d'améliorer la découverte et l'accessibilité des données, de promouvoir l'interopérabilité et l'intégration des données et d'améliorer la réutilisation et la reproductibilité des données (Wilkinson et al., 2016). La collecte, la gestion et l'utilisation des données PANGEA s'aligneront également sur les principes CARE, qui soulignent l'importance de prendre en compte les droits et les intérêts des peuples autochtones et des communautés locales lors de la gestion des données relatives à leurs communautés, leurs terres et leurs ressources. Les principes CARE pour la gouvernance des données autochtones complètent les principes FAIR en mettant l'accent sur les dimensions éthiques, culturelles et sociales de la gestion des données et en reflétant le rôle crucial des données dans l'avancement de l'innovation et de l'autodétermination autochtones (Caroll et al., 2020).

La collecte, la gestion et l'utilisation des données de PANGEA reconnaissent également l'importance de la souveraineté des données, qui nécessite des partenariats actifs avec les peuples autochtones et les communautés locales. La souveraineté des données est la gestion de l'information d'une manière conforme aux lois, pratiques et coutumes de l'État-nation dans lequel elle se trouve. La souveraineté des données autochtones est le "droit des peuples et des nations autochtones de régir la collecte, la propriété et l'utilisation de leurs propres données, découlant du droit inhérent des nations autochtones de gouverner leurs peuples, leurs terres et leurs ressources", et elle est considérée comme un droit collectif dans les cadres internationaux des droits autochtones (Cannon et al., 2024). Les détenteurs de savoirs autochtones conservent des informations et des données culturellement sensibles. Pour s'assurer que les efforts de PANGEA en matière de collecte et de gestion des données sont éthiques et respectent les droits des peuples autochtones et des communautés locales, PANGEA travaillera avec ses partenaires et les peuples autochtones et les communautés locales en suivant les principes de CARE décrits dans le **tableau 8**.

La participation à l'équipe scientifique PANGEA nécessitera un engagement à fournir un accès libre, ouvert et transparent à toutes les données acquises dans le cadre de PANGEA, conformément aux principes FAIR et CARE. En collaboration avec la direction du programme de la NASA, l'équipe scientifique PANGEA, dirigée par un groupe de coordination de la science ouverte PANGEA, travaillera avec les agences gouvernementales, les partenaires gouvernementaux étrangers et les partenaires autochtones pour établir des accords de collecte, de partage et de traitement des

données et des informations, ainsi que des flux de travail au niveau national, au niveau des agences internationales et au niveau territorial, afin de définir la propriété des données, les droits d'utilisation et les plans de stockage conformes aux principes de la science ouverte, FAIR et CARE. PANGEA donnera la priorité aux publications dont l'auteur est un chercheur en début ou en milieu de carrière, originaire des tropiques, et à l'avancement de la recherche menée par des autochtones.

**Tableau 13.** Exemples d'activités de gestion et de partage de données coordonnées avec des partenaires.

PARTENAIRE(S)	ACTIVITÉ DE GESTION ET DE PARTAGE DES DONNÉES
LBA	LBA et PANGEA travailleront ensemble pour harmoniser les protocoles pour de multiples types de données, y compris l'inventaire forestier, les flux basés sur les tours, et les acquisitions à partir de drones. La politique de données LBA révisée et récemment adoptée (juin 2024) est basée sur les principes et lignes directrices de la science ouverte, l'utilisation et l'exploitation équitables, en conformité avec les principes des données FAIR. Les données LBA adopteront la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-4.0 ; <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ). Élargir l'accès et la collaboration de la communauté scientifique aux données du programme. Ces nouvelles politiques de données LBA devraient rendre les politiques de données et de science ouverte LBA et NASA PANGEA hautement compatibles.
ALLIANCE POUR LA SCIENCE DES FORÊTS TROPICALES (ATFS)	Coordonner avec les partenaires du réseau de placettes forestières tropicales de l'ATFS pour s'assurer que la collecte et la gestion des données au sol et par drone respectent les normes et protocoles existants.
PARTENAIRES AUTOCHTONES ET LOCAUX (PAR EXEMPLE, GATC, RRI)	S'engager avec les partenaires de l'IPLC pendant l'élaboration du plan d'expérience concis, bien avant que les données ne soient collectées. Déterminer qui est responsable de l'octroi de l'autorisation aux parties externes d'accéder aux données et/ou aux territoires indigènes pour la recherche. Créer des étapes ou des politiques à l'intention des chercheurs et/ou des CLPI pour le partage des données et/ou la demande d'autorisation d'accès aux données ou aux territoires des CLPI. Établir un plan de collecte et/ou de suivi des données. Renforcer les capacités et collaborer avec les partenaires, y compris les IPLC, afin d'obtenir un financement pour le stockage et la gestion des données indigènes par les IPLC. Fournir une formation afin de créer des outils pour les IPLC qui soutiendraient la collecte, la gestion et la diffusion des données.
ÉQUIPES SCIENTIFIQUES NEON, SBG ET NISAR	Harmoniser les protocoles entre les communautés de recherche pour faciliter la mise à l'échelle. Parmi les initiatives existantes auxquelles PANGEA participera, on peut citer l'équipe du SBG VSWIR chargée de l'algorithme de la végétation terrestre et le réseau cal/val de NISAR. PANGEA contribuera à l'élaboration de protocoles de collecte de données, de stratégies d'extraction et de traitement des données aéroportées et de structures de base de données qui permettront d'intégrer plus facilement les données aéroportées et de terrain générées conjointement par les communautés dans les ensembles de données d'entraînement des modèles nécessaires à l'amélioration des algorithmes pour les écosystèmes sous-représentés.

PANGEA suivra les directives de la NASA Earth Science Data Preservation Content Specification<sup>2</sup> pour préparer et préserver les données ainsi que les informations associées au-delà de la durée de vie d'un projet. Cela permettra aux futurs utilisateurs de comprendre comment les données ont été utilisées pour obtenir des informations, des connaissances et des recommandations politiques, et d'assurer la reproductibilité pour vérifier la validité et les limites éventuelles des conclusions tirées dans le passé, et pour donner confiance dans les tendances à long terme qui dépendent de données provenant de plusieurs projets. Le document Preservation Content Implementation Guidance<sup>(3)</sup> fournit des lignes directrices et des listes de contrôle pour répondre aux besoins de PCS pour différents types de projets de recherche en sciences de la Terre, y compris les enquêtes aéroportées et sur le terrain.

<sup>2</sup> <https://www.earthdata.nasa.gov/esdis/esco/standards-and-practices/preservation-content-spec>

<sup>3</sup> <https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2022-07/ESDS-RFC-042VERSION1.pdf>

En collaboration avec ses partenaires, le bureau du projet PANGEA développera un **portail d'information PANGEA (PIP)** accessible au public. Ce portail d'information présentera la stratégie de gestion et de partage des données de PANGEA, fournira des liens directs vers les données, les modèles et les informations sur les activités prévues et en cours des chercheurs et des collaborateurs de PANGEA, y compris des inventaires de l'emplacement, du calendrier et des types de données collectées. L'équipe scientifique et le bureau du projet PANGEA travailleront en étroite collaboration avec les propriétaires de données lors de la collecte de données et de l'établissement de liens avec des sources de données existantes, afin de garantir un partage des données collaboratif et éthique, et de respecter les droits et la propriété des données déjà collectées, conformément aux principes FAIR et CARE. Le PIP permettra de découvrir et d'accéder facilement aux données collectées par PANGEA ainsi qu'aux données existantes utiles à la recherche de PANGEA.

Le soutien à la visualisation et au SIG sera essentiel pour maximiser la valeur des données PANGEA auprès d'un public plus large. PANGEA travaillera avec des partenaires orientés vers l'action, tels que Global Forest Watch et Rights and Resources Initiative, afin de développer des applications garantissant l'accessibilité des données aux non-scientifiques. Des mécanismes supplémentaires de communication des données et des résultats constitueront une partie importante de PANGEA afin de garantir l'accessibilité aux partenaires autochtones et aux communautés locales. Les modes de communication spécifiques seront déterminés en collaboration avec les partenaires autochtones et les communautés locales et seront propres à chaque paysage.

La provenance et la reproductibilité des données sont des aspects importants de la science à source ouverte. Les protocoles d'échantillonnage, les métadonnées, le nettoyage des données, les codes, les algorithmes et les flux de travail associés à la création, au traitement et à la validation des données pour PANGEA seront mis en libre accès. PANGEA établira des formats et des pratiques cohérents pour les données et les métadonnées, ainsi qu'une optimisation pour l'accès et l'analyse en nuage, en particulier pour les nouveaux types de données, tels que les ensembles de données basés sur les drones. Ces activités s'appuieront sur les efforts existants en matière de données et de disciplines spécifiques, plutôt que de tenter de les reproduire. Les réseaux et programmes existants tels que FLUXNET, NEON, ICOS, OzFlux, TERN et SAEON ont investi dans la définition de normes pour le traitement et la distribution des données et s'orientent vers la mise en œuvre de FAIR. Les réseaux régionaux ont également des activités dans les zones tropicales ; par exemple, l'ICOS coordonne le projet KADI (Knowledge and climate services from an African observation and Data research Infrastructure, <https://kadi-project.eu/>) qui a pour but de concevoir et de mettre en place un système panafricain d'observation du climat.

Les conversations visant à garantir l'alignement sur ces efforts ont déjà commencé. La coordination s'approfondira après la sélection pour s'assurer que les données au sol, les données des tours de flux, les données des drones, les données des pièges photographiques, les données bioacoustiques, les connaissances écologiques indigènes et traditionnelles, etc. sont collectées, stockées et partagées de manière appropriée et selon les meilleures pratiques disponibles. PANGEA exploitera et intégrera autant que possible les capacités et les systèmes existants et émergents offerts par les systèmes de données des sciences de la Terre de la NASA. Il s'agit notamment des Distributed Active Archive Centers (DAAC) pour les données aéroportées, des outils et services DAAC destinés à faciliter l'utilisation des données aéroportées et orbitales pour la recherche en écologie terrestre, de la plateforme de visualisation, d'exploration et d'analyse des données (VEDA) de la NASA.

(<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/veda>), et des efforts en cours pour coordonner la normalisation des données et les protocoles.

PANGEA adoptera également une approche de source ouverte pour les modèles. Les modèles participant aux activités et aux projets liés à PANGEA devront avoir un code source ouvertement disponible via des plateformes collaboratives (par exemple, GitHub), et publié avec des licences permissives conformes au Science Mission Directorate (SMD) Open-Source Science Guidance (guide de la science à source ouverte). PANGEA encouragera la gouvernance du modèle pour l'engagement de la communauté, y compris un code de conduite, des notes techniques et des guides de l'utilisateur, un forum actif pour discuter des problèmes de code, et des voies pour les contributions au développement du modèle de la part de l'ensemble de la communauté scientifique. Pour se conformer aux principes de la science ouverte de PANGEA, les projets faisant partie de PANGEA déposeront la version exacte des modèles publiés dans des dépôts à long terme avec un DOI, ainsi que les informations sur les paramètres et les données nécessaires pour reproduire les résultats.

PANGEA développera une **plateforme ouverte d'analyse de données en nuage** pour les chercheurs de PANGEA afin de soutenir la recherche ouverte et collaborative. La plateforme d'analyse de données de PANGEA sera basée sur les nuages scientifiques mis en œuvre avec succès par ABoVE, SHIFT, BioSCape et la plateforme d'algorithmes et d'analyse multi-mission de la NASA (MAAP, <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/maap>). Ces efforts témoignent d'une collaboration internationale réussie en matière de données, notamment entre la NASA et l'ESA (MAAP), et en tirant parti du programme de responsabilité sociale d'Amazon Web Services (BioSCape). La plateforme informatique en nuage de PANGEA réduira les barrières à l'entrée, en particulier pour les partenaires internationaux qui sont susceptibles d'être limités en termes de bande passante, de capacité de stockage des données et de puissance de calcul. La plateforme informatique en nuage permettra également aux membres de l'équipe scientifique de PANGEA de partager facilement les premières versions des produits de données (avant qu'ils ne soient prêts pour l'archivage) et de résoudre les problèmes d'analyse des données en commun. En outre, le matériel de renforcement des capacités, en particulier les carnets de codage, peut être développé spécifiquement pour l'environnement informatique en nuage, ce qui permet à n'importe qui, n'importe où dans le monde, de l'utiliser et d'appliquer des approches similaires. L'importance de l'environnement informatique en nuage a été démontrée lors de la campagne BioSCape, dont les membres de l'équipe scientifique sud-africaine auraient autrement été gravement limités dans leur capacité à accéder aux données de la campagne, à les analyser et à les appliquer.

PANGEA assurera le renforcement des capacités en matière de science libre et de gestion des données tout au long du projet, notamment par le biais de formations et d'ateliers sur la gestion des données en collaboration avec les DAAC, FLUXNET, LBA, les organisations partenaires autochtones et locales telles que l'Alliance mondiale des collectivités territoriales, l'ATFS et d'autres encore. Nombre de ces partenaires disposent de programmes de formation existants qui seront mis à profit. PANGEA donnera la priorité aux formations et aux ateliers avec les partenaires pour soutenir les efforts indépendants et coordonnés de gestion des données, ce qui (1) renforce la capacité des peuples autochtones, des communautés locales et des institutions tropicales ; et (2) assure un alignement international qui servira de base aux ensembles de données et à la collaboration qui se poursuivra au-delà du projet PANGEA. Un cofinancement est recherché pour soutenir l'investissement dans l'infrastructure nécessaire pour garantir que la science à source ouverte puisse être réalisée équitablement dans les paysages de PANGEA, y compris le financement de l'électricité locale et de l'infrastructure Internet.

## 10.4 Calendrier

L'équipe PANGEA a utilisé des réunions virtuelles et hybrides pour engager rapidement une équipe scientifique diversifiée. Nous disposons d'approches permettant de gagner du temps et de réduire considérablement le délai nécessaire à l'élaboration du plan d'expérience concis et au passage à la phase de mise en œuvre. **Le tableau 14** présente le calendrier proposé, en supposant que les prochaines activités de PANGEA débutent au cours de l'exercice 2025.

**Tableau 14.** Calendrier proposé pour PANGEA.

SDT : Science Definition Team (équipe de définition scientifique). TE : Écologie terrestre. CEP : Concise Experiment Plan (plan d'expérience concis). PAC : PANGEA Airborne Campaign (campagne aéroportée PANGEA). SATSM : Science and Applications Team and Stakeholder Meeting (réunion de l'équipe chargée des sciences et des applications et des parties prenantes).

ANNÉE D'ÉTUDE	CEP		PHASE I			PHASE II			PHASE III	
			1	2	3	4	5	6	7	8
ACTIVITÉS DU BUREAU DE PROJET	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	A34
PANGEA sélectionné. Début de la planification détaillée : Sélection de l'équipe de définition scientifique. Le PEC est rédigé, soumis à l'examen de la communauté et achevé.										
L'annonce d'opportunité PANGEA (NRA) est publiée par la NASA. Le bureau de projet entame les préparatifs sur la base du CEP. Les propositions de la phase 1 de PANGEA sont attribuées. 1er SATSM.										
2ème atelier SATSM et planification de campagne aéroportée. Campagne aéroportée PANGEA I (PACI)										
3e PANGEA SATSM et planification aéroportée. Campagne aéroportée PANGEA II (PACII). Propositions et sélection de la phase 2 de PANGEA par le NRA de la NASA.										
4e PANGEA SATSM et planification aéroportée. Campagne aéroportée PANGEA III (PACIII).										
5e SATSM PANGEA. Campagne aéroportée PANGEA IV (PANIV).										
6e SATSM PANGEA. Campagne aéroportée de soutien PANGEA V (PANV). NASA NRA PANGEA Phase 3 Propositions et sélection.										
7ème PANGEA SATSM.										
8ème PANGEA SATSM.										

## 10.5 Évaluation des risques

PANGEA utilisera une gestion proactive des risques afin d'atténuer tous les risques liés à l'ensemble des activités du projet, notamment les déplacements, le travail sur le terrain, l'utilisation d'équipements et les opérations aériennes et sur le terrain dans la vaste gamme d'études tropicales nécessaires à la réalisation d'études scientifiques à fort impact. Le bureau de projet dressera une liste exhaustive des risques liés au projet, les évaluera à l'aide d'une matrice d'évaluation des risques standard, fournira ces évaluations des risques aux participants et contrôlera le respect des règles. Le projet sera également coordonné avec les exigences en matière de santé et de sécurité de chaque institution partenaire. Pour les cas à haut risque et à risque moyen, le projet élaborera et mettra en œuvre un plan d'atténuation, qui sera examiné avec le bureau du programme de la NASA. PANGEA s'attend à ce que la plupart des risques relèvent de trois catégories : (1) la santé et la sécurité ; (2) la réalisation des objectifs scientifiques ; et (3) la réalisation des objectifs en matière d'engagement communautaire et d'applications.

**Santé et sécurité :** Le projet suivra les directives relatives à la santé et à la sécurité des voyageurs émises par le Bureau des affaires consulaires du Département d'État américain et les personnes suivront les évaluations des risques spécifiques au projet élaborées par le bureau de projet de PANGEA. PANGEA s'adressera également aux ambassades et consulats américains locaux ainsi qu'à leurs bureaux de sécurité régionaux pour obtenir des conseils. Compte tenu de l'éloignement de nombreux sites d'étude, le projet élaborera des plans pour assurer la sécurité du transport vers les sites d'étude sur le terrain, que ce soit par véhicule tout-terrain, par bateau ou par d'autres méthodes. Le projet développera également des plans pour la sécurité de l'équipage aéroporté et des opérateurs d'instruments pendant les campagnes, en suivant les directives de la NASA pour les opérations aériennes et au sol. Certaines régions d'étude potentielles présentent des risques de paludisme, de fièvre jaune et d'autres maladies ; le projet veillera à ce que les participants soient informés des vaccins et autres mesures prophylactiques nécessaires avant les visites sur le terrain.

**Atteindre les objectifs scientifiques :** Le bureau du projet travaillera de manière proactive pour engager des partenaires institutionnels et développer des protocoles d'accord formels, avec l'aide du bureau OIIR de la NASA, de l'ESPO et du département d'État américain. Les campagnes aéroportées internationales ont toujours été entravées par la lenteur des autorisations d'atterrissement et la bureaucratie associée, et une grande partie de ces problèmes peut être évitée en entamant très tôt le processus de protocole d'accord officiel. L'utilisation d'avions de la NASA pour les observations aéroportées présente des avantages, mais elle nécessite une autorisation diplomatique à la fois dans les pays de la zone d'étude et pendant le transit. L'autorisation diplomatique ne peut parfois être obtenue qu'à une date proche de la date limite, de sorte que des parties de campagnes ou des campagnes entières peuvent être annulées à court terme. En outre, les avions de la NASA étant exploités par des fonctionnaires américains, il existe un risque avéré que la fermeture du gouvernement américain tarde ou annule les vols scientifiques, en particulier entre octobre et décembre. Le bureau du projet PANGEA tiendra compte de ces risques et d'autres encore et pourrait envisager d'utiliser des avions commerciaux pour atténuer ces risques.

Les conditions météorologiques sont également un facteur important pour la réussite des acquisitions de données sur le terrain et aéroportées pour PANGEA, en particulier pour les observations optiques qui nécessitent des conditions sans nuages. Au cours de la phase de définition scientifique, PANGEA

effectuera une analyse climatique afin de déterminer la meilleure période de l'année pour les observations aériennes. Pendant les campagnes aéroportées, PANGEA travaillera avec les prévisionnistes météorologiques locaux qui connaissent le climat local afin de faciliter les récupérations aéroportées et les mesures sur le terrain.

Le travail sur le terrain présente de multiples risques. Pour ceux qui ne travaillent pas dans les forêts tropicales, des risques tels que les serpents venimeux et les araignées vénéneuses viennent à l'esprit. Bien que ces risques biologiques soient réels, PANGEA peut les gérer en établissant et en appliquant des directives de sécurité et en éduquant les participants. Le risque le plus important pour les participants au projet est souvent lié au transport vers et depuis les sites de terrain. Les déplacements en camion et en bateau ont constitué le risque le plus important pendant l'étude LBA. PANGEA peut atténuer ce risque en veillant à ce que les chauffeurs soient formés et à ce que les véhicules soient correctement entretenus. Les autres risques sur le terrain comprennent les maladies et la perte d'équipement en raison du vol et de la violence. La prophylaxie médicale peut atténuer les maladies endémiques, telles que le paludisme, et la violence peut être évitée grâce à de bonnes relations avec les communautés, à la connaissance de la situation et à la communication. PANGEA atténuerà tous ces risques en organisant sur le terrain des formations spécifiques à la sécurité et à la sensibilisation culturelle et en établissant de bonnes relations avec les communautés locales.

**Atteindre les objectifs en matière d'engagement communautaire et d'applications :** L'engagement auprès des communautés locales et le développement de résultats scientifiques et d'applications qui seront utiles à un large éventail de personnes nécessitent une coordination et un effort réel. Le risque pour PANGEA est que les efforts d'engagement ne soient pas couronnés de succès et/ou que les applications ne soient pas utiles. PANGEA prendra plusieurs mesures pour atténuer ces risques. PANGEA coproduira des plans d'engagement pour chaque paysage au cours de l'élaboration du plan d'expérience concis, qui comprendra des étapes, des objectifs et des mesures pour évaluer le succès régulièrement tout au long du projet. PANGEA adoptera l'inclusivité et travaillera activement au développement et à la promotion de pratiques inclusives et co-développées tout au long du projet. L'élaboration conjointe de projets et la collaboration équitable avec tous les partenaires, y compris les peuples autochtones et les communautés locales, peuvent prendre beaucoup de temps. PANGEA continuera à travailler dur pour construire des relations de longue date. Cependant, étant donné la durée limitée du travail de PANGEA sur le terrain dans chaque lieu, il existe un risque que le projet n'atteigne pas ces objectifs. PANGEA travaillera avec ses partenaires pour développer des plans de soutien continu au-delà de la durée du projet. PANGEA s'efforcera de maintenir les relations avec les partenaires communautaires tout au long du projet et travaillera avec les partenaires internationaux et industriels pour obtenir un financement supplémentaire afin de soutenir ces efforts et d'accroître la profondeur et l'importance de ces relations.

# 11 Crédits de figure

**Figure 1.** Publié dans Liu et al. (2017).

**Figure 2.** Le panneau (a) a été adapté de Schimel et al. (2015). Le panneau (b) a été créé par Alison Hoyt, Clarice Perryman et Fa Li.

**Figure 3.** Créé par Félicien Meunier. Le panneau (a) a été adapté de Friedlingstein et al. (2014) (mise à jour de CMIP5 à CMIP6). Le panneau (b) a été redessiné à partir de l'AR6 du GIEC avec des données récentes.

**Figure 4.** La figure principale a été créée par Jamy Silver. Le schéma de mise à l'échelle sur le côté droit de la figure a été créé par Lizbeth de la Torre.

**Figure 5.** Créé par Yanlei Feng, Robinson Negron-Juarez et Hannah Stouter.

**Figure 6.** Créé par Hannah Stouter.

**Figure 7.** Créé par Elsa Ordway.

**Figure 8.** Créé par Sofia Shen.

**Figure 9.** Créé par Yanlei Feng, Hannah Stouter et Marcos Longo.

**Figure 10.** Créé par Elsa Ordway.

**Figure 11.** Créé par Ovidiu Csillik.

**Figure 12.** Publié dans Cavender-Bares et al. (2022).

**Figure 13.** Adapté de Ordway et al. (2022).

**Figure 14.** Adapté de Chadwick et Asner (2016a).

**Figure 15.** Créé par Hannah Stouter, Marius von Essen, Ane Alencar et Maria Santos.

**Figure 16.** Créé par Yanlei Feng et Hannah Stouter.

**Figure 17.** Créé par Marcos Longo.

**Figure 18.** Créé par Félicien Meunier et Elsa Ordway.

**Figure 19.** Figure originale de Fisher et Koven (2020), nouveaux processus inclus par Marcos Longo et Renato Braghieri.

**Figure 20.** Créé par Virginia Zaunbrecher.

**Figure 21.** Créé par Adia Bey.

**Figure 22.** Créé par Michael Keller et Elsa Ordway

## 12 Glossaire

**Bioéconomie** : Un système économique fondé sur la recherche et l'innovation dans les sciences de la vie et la biotechnologie, qui englobe des applications transformatrices fondées sur la biologie et la biotechnologie dans des domaines tels que l'énergie, les produits chimiques, les matériaux avancés, l'assainissement de l'environnement, l'agriculture, l'électronique et la santé. Il est rendu possible par les avancées technologiques dans les domaines de l'ingénierie, de l'informatique et des sciences de l'information ([Schmidt Futures, 2022](#)).

**Biodiversité** : La variété de la vie sur Terre, y compris sa variation au niveau des gènes, des espèces, des traits fonctionnels et des écosystèmes. Dans les forêts tropicales, la biodiversité est exceptionnellement élevée au sein des forêts et d'une forêt à l'autre, ce qui favorise les interactions complexes et la fonction des écosystèmes, et entraîne une hétérogénéité des réponses et de la résilience au climat.

**Cycles biogéochimiques** : Les cycles biogéochimiques englobent le mouvement et la transformation d'éléments essentiels (par exemple, le carbone, l'azote et le phosphore) à travers la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère de la Terre. Dans les forêts tropicales, ces cycles sont très dynamiques, avec un renouvellement rapide des nutriments et de la biomasse ; néanmoins, les forêts tropicales jouent un rôle important dans le stockage du carbone à l'échelle mondiale.

**Stocks et flux de carbone** : Les stocks de carbone désignent la quantité totale de carbone stockée dans un système (par exemple, dans la végétation, les sols ou les océans), tandis que les flux de carbone représentent le mouvement du carbone dans et hors de ces stocks par le biais de processus tels que la photosynthèse, la respiration et la décomposition, et comprennent les flux de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et les flux latéraux de carbone.

**Interactions et rétroactions climatiques** : Interactions bidirectionnelles entre les systèmes climatiques et les écosystèmes. Les forêts tropicales régulent directement les cycles du carbone, de l'eau et de l'énergie. Les changements climatiques (tels que les variations de température et de précipitations) et les changements dans l'utilisation et la couverture des sols (tels que les incendies et la dégradation des forêts) peuvent modifier la dynamique des écosystèmes forestiers, créant ainsi des boucles de rétroaction qui affectent la stabilité du climat mondial.

**Co-bénéfices** : Contributions positives conjointes de la biodiversité et de la diversité culturelle pour les humains et les autres espèces. Ces contributions sont associées aux concepts de contributions de la nature à l'homme et de contributions de l'homme à la nature (Levis et al, 2024).

**Communauté** : Groupes formels et informels de personnes qui se perçoivent comme membres et qui peuvent partager des intérêts, des expériences, des ressources, des activités, des professions, des moyens de subsistance, une culture, une géographie, des origines, une langue ou toute combinaison de ce qui précède.

**Dynamique des perturbations** : La dynamique des perturbations varie en fonction du type, de l'intensité et de la fréquence, et implique des événements naturels ou d'origine humaine, tels que les incendies, les tempêtes, la sécheresse et l'exploitation forestière, qui perturbent les écosystèmes et affectent leur structure et leur fonction. Dans les forêts tropicales, ces perturbations peuvent entraîner des changements dans les cycles biogéochimiques, la biodiversité et les rétroactions sur le climat et les systèmes socio-écologiques.

**L'écosystème :** PANGEA utilise la définition de travail de l'écosystème du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui inclut les personnes en tant qu'organismes clés, et donc les agro-écosystèmes et, plus largement, les systèmes socio-écologiques. Unité fonctionnelle composée d'organismes vivants, de leur environnement non vivant et des interactions entre eux et en leur sein. Les composantes d'un écosystème donné et ses limites spatiales dépendent de l'objectif pour lequel l'écosystème est défini : dans certains cas, elles sont relativement nettes, tandis que dans d'autres, elles sont diffuses. Les limites des écosystèmes peuvent changer au fil du temps. Les écosystèmes sont imbriqués dans d'autres écosystèmes et leur échelle peut aller de très petite à la biosphère entière. À l'époque actuelle, la plupart des écosystèmes contiennent des êtres humains en tant qu'organismes clés ou sont influencés par les effets des activités humaines sur leur environnement. (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

**Services écosystémiques :** Les services écosystémiques sont les avantages que l'homme tire des écosystèmes naturels, notamment les services d'approvisionnement (par exemple, nourriture, eau), de régulation (par exemple, régulation du climat, contrôle des inondations), de soutien (par exemple, cycle des nutriments, formation des sols) et les services culturels (par exemple, loisirs, valeur spirituelle).

**Dégradation des forêts :** Une forêt est dégradée lorsque le taux de perturbation exogène dépasse le taux moyen à long terme de perturbation exogène pour l'écosystème et que les effets de cette perturbation peuvent être distingués de la structure et/ou de la composition de la forêt ancienne. L'exploitation forestière, les incendies, l'exploitation minière et la fragmentation sont des causes courantes de dégradation des forêts.

**Activités respectueuses de la forêt :** Activités économiques qui utilisent les ressources forestières de manière à préserver l'intégrité écologique de la forêt et à soutenir les moyens de subsistance durables des communautés locales UICN (2021).

**Fonction forestière :** La fonction forestière fait référence aux rôles écologiques des forêts, tels que la régulation du climat, le soutien de la biodiversité, le cycle des nutriments et la fourniture d'habitats, qui contribuent à la santé et à la stabilité globales des écosystèmes. Les fonctions forestières comprennent la productivité primaire brute (PPB), la productivité ligneuse, la respiration de l'écosystème et l'évapotranspiration.

**Structure de la forêt :** Biomasse, hauteur de la canopée, densité des tiges, hétérogénéité de la hauteur verticale et distributions verticales de la densité de la surface végétale.

**Activités humaines :** Pratiques et comportements formels, informels, légaux, illégaux et traditionnels en matière d'économie, de subsistance, de culture et de développement qui conduisent à l'exploitation, à l'altération et à la dégradation des écosystèmes forestiers, notamment l'exploitation forestière, le développement d'infrastructures, l'agriculture, l'élevage, les incendies, l'exploitation minière, la chasse et l'exploitation de la faune sauvage, et la production de charbon de bois.

**Changement d'utilisation des terres :** Les changements d'utilisation et de couverture des sols font référence à la modification de la surface de la Terre, y compris les changements dans la manière dont les sols sont utilisés (par exemple, l'agriculture, l'urbanisation) et les changements dans leur couverture physique (par exemple, la déforestation, la reforestation, l'expansion urbaine).

**Résilience** : La capacité des systèmes sociaux, économiques et écologiques interconnectés à faire face à un événement dangereux, à une tendance ou à une perturbation, en réagissant ou en se réorganisant de manière à maintenir leur fonction, leur identité et leur structure essentielles. La résilience est un attribut positif lorsqu'elle maintient la capacité d'adaptation, d'apprentissage et/ou de transformation (Conseil de l'Arctique, 2016). (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

**Systèmes socio-écologiques** : Systèmes interconnectés entre l'homme et la nature, où les composantes écologiques et sociales interagissent et s'influencent mutuellement. Dans les forêts tropicales, ces systèmes sont façonnés par les moyens de subsistance, les pratiques culturelles et l'utilisation des ressources des communautés locales et mondiales, tandis que les changements écologiques ont un impact sur le bien-être social, créant des rétroactions complexes entre les activités humaines et la stabilité de l'écosystème.

**Communautés vulnérables** : Les communautés les plus susceptibles de subir les effets néfastes du changement climatique et de la dégradation de l'environnement, notamment les peuples autochtones, les communautés à faible revenu et celles dont les moyens de subsistance dépendent des ressources naturelles. Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (2020).

**Vulnérabilité** : La propension des systèmes sociaux et écologiques et de leurs pratiques à être affectés négativement par les changements, englobant leur sensibilité à ces changements et leur capacité d'adaptation. Adapté de (FAO 2013).

## 13 Acronymes et abréviations

<b>AboVE</b>	Expérience sur la vulnérabilité de la forêt boréale arctique
<b>ABSOLUG</b>	Simulateur de gouvernance de l'utilisation des sols basé sur des agents
<b>AGEOS</b>	Agence d'études et d'observations spatiales (Gabon)
<b>AGU</b>	Union géophysique américaine
<b>IA</b>	Intelligence artificielle
<b>IA/ML</b>	Intelligence artificielle et apprentissage automatique
<b>AI4ESP</b>	Artificial Intelligence for Earth System Predictability (Intelligence artificielle pour la prévisibilité du système terrestre)
<b>AmeriFlux</b>	Réseau américain de tours Flux à covariance de Foucault
<b>AmIT</b>	Institut de technologie d'Amazon
<b>AMMA-CATCH</b>	Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
<b>AMMI</b>	Maîtres africains de l'intelligence artificielle
<b>AMSR-E</b>	Radiomètre à balayage à micro-ondes avancé pour la mission EOS
<b>AndesFlux</b>	Tours de flux exploitées par la PUCP
<b>ARES</b>	Installation de recherche aéroportée pour le système terrestre
<b>ARL</b>	Aniveau de préparation de la demande
<b>ASTER</b>	Radiomètre perfectionné d'émission et de réflexion thermique aéroporté
<b>ATBC</b>	Association pour la biologie tropicale et la conservation
<b>ATFS</b>	Alliance pour la science des forêts tropicales
<b>ATTO</b>	Observatoire des tours d'Amazonie (Presidente Figueiredo, Brésil)
<b>BiomeE</b>	A Modèle démographique de végétation NASA-GISS
<b>BioSCape</b>	Enquête sur la biodiversité du Cap
<b>BOREAS</b>	Étude de l'atmosphère et de l'écosystème boréal
<b>CARAFEC</b>	Expérience sur les flux de carbone dans l'air
<b>CarbonTracker</b>	Système d'assimilation de données pour le suivi du CO <sub>2</sub>
<b>CARDAMOM</b>	Cadre de modélisation des données sur le carbone

<b>CARE</b>	Bénéfice collectif, autorité de contrôle, responsabilité et éthique
<b>PFBC</b>	Partenariat pour les forêts du bassin du Congo
<b>IBC</b>	Institut du Bassin du Congo
<b>CBSI</b>	Initiative scientifique pour le bassin du Congo
<b>CCE</b>	Cycle du carbone et écosystèmes (bureau de la NASA)
<b>CENAREST</b>	Centre national de la recherche scientifique et technologique (Gabon)
<b>CEOS</b>	Comité sur les satellites d'observation de la Terre
<b>PEC</b>	Plan d'expérience concis
<b>CFIS</b>	Spectromètre imageur de fluorescence chlorophyllienne
<b>CGIAR</b>	Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale
<b>CH<sub>4</sub></b>	Méthane
<b>CHIME</b>	Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (Mission d'imagerie hyperspectrale pour l'environnement)
<b>CIAT</b>	Centre international d'agriculture tropicale
<b>CIFOR-ICRAF</b>	Centre pour la recherche forestière internationale et l'agroforesterie mondiale
<b>CliMA</b>	Alliance pour la modélisation du climat
<b>CLM</b>	Modèle foncier communautaire
<b>CMIP</b>	Projet de comparaison de modèles couplés
<b>CMIP5</b>	CMIP-Phase 5
<b>CMIP6</b>	CMIP-Phase 6
<b>CMS-Flux</b>	Système de surveillance du carbone Système d'inversion de flux
<b>CNES</b>	Agence spatiale française
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>COCCON</b>	COLlaborative Carbon Column Observing Network (réseau collaboratif d'observation de la colonne de carbone)
<b>Co-I</b>	Co-Investigateur
<b>COMIFAC</b>	COMIFAC
<b>CongoFlux</b>	Tour de flux par covariance de Foucault dans le bassin du Congo
<b>COS</b>	Sulfure de carbonyle

<b>CSDA</b>	Commercial SmallSat Data Acquisition (acquisition de données pour les petits satellites commerciaux)
<b>CUE</b>	Efficacité de l'utilisation du carbone
<b>DEI</b>	Diversité, équité et inclusion
<b>DGVM</b>	Modèle dynamique de la végétation mondiale
<b>DLR</b>	Centre aérospatial allemand
<b>DOE</b>	Département de l'énergie
<b>RDC</b>	République démocratique du Congo
<b>E3SM</b>	Modèle énergétique exascale du système terrestre
<b>EBV</b>	Variable essentielle de biodiversité
<b>ECOSTRESS</b>	Expérience de radiomètre thermique spatial sur l'écosystème à bord de la station spatiale
<b>ED</b>	Démographie des écosystèmes
<b>ED2</b>	Modèle de démographie de l'écosystème version 2
<b>ED3</b>	Modèle de démographie des écosystèmes, version 3
<b>EDGE</b>	Explorateur géodésique de la dynamique terrestre
<b>ADNe</b>	Acide désoxyribonucléique de l'environnement
<b>ELM</b>	Modèle terrestre E3SM
<b>EMIT</b>	Enquête sur les sources de poussières minérales de surface Earth
<b>ENSO</b>	Oscillation australe El Niño
<b>Ent TBM</b>	Modèle de biosphère terrestre de l'Ent
<b>EOS</b>	Système d'observation de la Terre
<b>ES2A</b>	Stratégie de mise en œuvre des sciences de la Terre de la NASA
<b>ESA</b>	Société écologique d'Amérique
<b>ESA</b>	Agence spatiale européenne
<b>ESM</b>	Modèle du système terrestre
<b>ESRI</b>	Institut de recherche sur les systèmes environnementaux, Inc.
<b>ET</b>	Evapotranspiration
<b>EUDRE</b>	Règlement de l'Union européenne sur les produits de base exempts de déforestation

<b>FAIR</b>	Findable, accessible, interopérable et réutilisable
	FAOOrganisation pour l'alimentation et l'agriculture (Nations unies)
<b>FAPESP</b>	Fondation de recherche de São Paulo
<b>FATES</b>	Simulateur d'écosystèmes terrestres fonctionnellement assemblés
<b>FIFE</b>	Première expérience de terrain de l'ISLSCP
<b>FLEX</b>	Mission d'exploration Fluorescence
<b>FLUXNET</b>	Réseau mondial de tours de flux à covariance de Foucault
<b>ForestGEO</b>	Observatoire mondial des forêts
<b>ForestPlots</b>	Réseau de mesure, de suivi et de compréhension des forêts du monde entier
<b>FORMIND</b>	Modèle forestier Modèle basé sur l'individu
<b>FTAC</b>	Comité d'action rapide (sur les services climatiques)
<b>GAO</b>	Observatoire mondial aéroporté
<b>GATC</b>	Global Alliance of Territorial Communities (Alliance mondiale des collectivités territoriales)
<b>GCF-TF</b>	Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts
<b>GEDI</b>	Global Ecosystem Dynamics Investigation (enquête sur la dynamique de l'écosystème mondial)
<b>GEM</b>	Réseau mondial de surveillance des écosystèmes
<b>GEO BON</b>	Group on Earth Observations Réseau d'observation de la biodiversité
<b>GEO</b>	Groupe sur l'observation de la Terre
<b>GEO-TREES</b>	Groupe sur l'observation de la Terre - Arbres
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>SIG</b>	Système d'information géographique
<b>GISS</b>	Institut Goddard d'études spatiales (NASA)
<b>GLOBE<sub>Global</sub></b>	Learning and Observations to Benefit the Environment (Apprentissage et observations au service de l'environnement)
<b>GNSS</b>	Système mondial de navigation par satellite
<b>GOES</b>	Satellites opérationnels géostationnaires pour l'étude de l'environnement
<b>GOSAT</b>	Satellite d'observation des gaz à effet de serre

<b>GPM</b>	Mesure globale des précipitations
<b>GPP</b>	Productivité primaire brute
<b>GPS</b>	Système de positionnement global
<b>GPUG</b>	Unité de traitement graphique
<b>GRACE</b>	Gravity Recovery and Climate Experiment (Expérience sur la récupération de la gravité et le climat)
<b>GRACE-FO</b>	Mission de suivi de l'expérience sur la récupération de la gravité et le climat (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On)
<b>GSFC</b>	Centre de vol spatial Goddard
<b>Guyaflux</b>	Tour de flux de covariance Eddy à la station de terrain de Paracou (Sinnamary, Guyane française)
<b>Guyafor</b>	Réseau de 54 parcelles à long terme réparties sur 17 sites en Guyane française
<b>H<sub>2</sub></b>	OWater
<b>HBCUs</b>	Historically Black Colleges and Universities (collèges et universités noirs historiques)
<b>HiLDEN</b>	Réseau écologique de drones des hautes latitudes
<b>SIÈGE</b>	Siège social
<b>HYSPLIT</b>	Modèle de transport et de dispersion atmosphérique de la NOAA
<b>HyTES</b>	Spectromètre hyperspectral à émission thermique
<b>IA</b>	Accord de mise en œuvre
<b>ICCN</b>	Institut congolais pour la conservation de la nature
<b>ICOS</b>	Système intégré d'observation du carbone
<b>IEK</b>	Connaissances écologiques indigènes
<b>IITA</b>	Institut international d'agriculture tropicale
<b>ILAMB</b>	Projet international d'étalonnage des modèles terrestres
<b>INPA</b>	Institut national de recherche amazonienne (Brésil)
<b>INPE</b>	Institut national de recherche spatiale (Brésil)
<b>IPBES</b>	Plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
<b>GIEC</b>	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>IPLCs</b>	Peuples autochtones et communautés locales

<b>IRD</b>	Institut de recherche pour le développement (France)
<b>ISLSCP</b>	Projet international de climatologie de surface terrestre par satellite
<b>ISRO</b>	Organisation indienne de recherche spatiale
<b>ITCZ</b>	Zone de convergence intertropicale
<b>UICN</b>	Union internationale pour la conservation de la nature
<b>JAXA</b>	Agence japonaise d'exploration aérospatiale
<b>JSBACH</b>	Jena Scheme for Biosphere-Atmosphere Coupling in Hamburg model (Schéma d'lena pour le couplage biosphère-atmosphère dans le modèle de Hambourg)
<b>JULES</b>	Simulation de l'environnement terrestre du Royaume-Uni
<b>K34</b>	Tour de covariance de tourbillon du kilomètre 34 (Manaus, Brésil)
<b>K67</b>	Tour de covariance de tourbillon du kilomètre 67 (Belterra, Brésil)
<b>LAI</b>	Indice de surface foliaire
<b>LBA</b>	Expérience à grande échelle sur la biosphère et l'atmosphère en Amazonie
<b>LBA-ECO</b>	Contribution du programme d'écologie terrestre de la NASA à la première phase du LBA
<b>LBNL</b>	Laboratoire national Lawrence Berkeley
<b>LCLUC</b>	Changement de l'occupation et de l'utilisation des sols (NASA)
<b>LEK</b>	Connaissances écologiques locales
<b>LPJ</b>	Modèle dynamique de végétation mondiale de Lund-Potsdam-Jena
<b>LPJ-GUESS</b>	Simulateur général d'écosystème LPJ
<b>LST</b>	Température de la surface terrestre
<b>LUH2</b>	Projet d'harmonisation de l'utilisation des sols, version 2
<b>LVIS</b>	Capteur de terre, de végétation et de glace
<b>MAAP</b>	Plate-forme d'analyse et d'algorithme multi-missions
<b>MapBiomas</b>	Initiative Biome Mapper
<b>MASTER</b>	Radiomètre spatial d'émission et de réflexion thermique MODIS/ASTER
<b>MetaFlux</b>	Cadre de méta-apprentissage pour les sciences du climat
<b>MINFOF</b>	Ministère des forêts et de la faune, Cameroun
<b>ML</b>	Apprentissage automatique

<b>ModEX</b>	Modèle-Expérimentation
<b>MODIS</b>	Spectroradiomètre imageur à résolution modérée
<b>MÉMORANDUM D'ACCORD</b> Protocole d'accord	
<b>MRV</b>	Suivi, rapport et vérification
<b>MSI</b>	Institution au service des minorités
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Oxyde nitreux
<b>NASA</b>	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace
<b>NASA-CASA</b>	Modèle d'écosystème NASA Carnegie-Ames-Stanford
<b>NBE</b>	Échange net de la biosphère
<b>NDVI</b>	Indice de végétation par différence normalisée
<b>NEON</b>	Réseau national d'observatoires écologiques
<b>NGEE-Tropiques</b>	Expériences sur les écosystèmes de prochaine génération - Tropiques
<b>ONG</b>	Organisation non gouvernementale
<b>NISAR</b>	Mission SAR NASA-ISRO
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administration nationale des océans et de l'atmosphère)
<b>NOANET</b>	Réseau d'accès ouvert du Nord-Ouest
<b>PPN</b>	Productivité primaire nette
<b>NSB</b>	Conseil national de la science
<b>NSC</b>	Glucides non structurels
<b>NSF</b>	Fondation nationale de la science
<b>NST</b>	Conseil national de la science et de la technologie
<b>OCO-2/3</b>	Observatoire orbital du carbone-2 ou -3
<b>Autres</b>	mesures de conservation efficaces
<b>OFVi</b>	Initiative "Une vision de la forêt" (One Forest Vision Initiative)
<b>OIIR</b>	Bureau des relations internationales et interagences de la NASA
<b>ONACC</b>	Observatoire national du changement climatique (Cameroun)
<b>ORCHIDEE</b>	Organiser le carbone et l'hydrologie dans les écosystèmes dynamiques

<b>ORNL</b>	Laboratoire national d'Oak Ridge
<b>OSFAC</b>	Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale
<b>OSSE</b>	Expérience de simulation du système d'observation
<b>PAC</b>	Campagne aéroportée Pangea
<b>PACE</b>	Plancton, aérosols, nuages, mission sur l'écosystème océanique
<b>PANGEA</b>	PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (étude de la biochimie et de l'adaptation écologique)
<b>PecAn</b>	Analyseur prédictif d'écosystème
<b>PFT</b>	Type fonctionnel de l'usine
<b>PhenoCam</b>	Caméra phénologique
<b>PI</b>	Investigateur principal
<b>PIP</b>	Portail d'information PANGEA
<b>PUCP</b>	Université catholique pontificale du Pérou
<b>AQ/CQ</b>	Évaluation et contrôle de la qualité
<b>R2FAC</b>	Réseau de recherche forestière d'Afrique centrale
<b>RAINFOR</b>	Réseau d'inventaire de la forêt amazonienne
<b>RepastSimphony</b>	Boîte à outils de simulation d'agents poreux récursifs avec interface Java Symphony
<b>RESSAC</b>	Programme de recherche appliquée en écologie et sciences sociales
<b>RVB</b>	Rouge vert bleu
<b>RRI</b>	Initiative sur les droits et les ressources
<b>RUBISCO</b>	Réduire les incertitudes dans les interactions biogéochimiques par la synthèse et le calcul
<b>SATSM</b>	Réunion de l'équipe chargée des sciences et des applications et des parties prenantes
<b>SBG</b>	Mission de biologie et de géologie de surface
<b>SDTS</b>	Équipe de définition scientifique
<b>SERVIR</b>	SERVIR est un partenariat entre la NASA et l'USAID qui soutient les efforts locaux visant à renforcer la résilience climatique, la sécurité alimentaire et hydrique, la gestion des forêts et du carbone, et la qualité de l'air.
<b>SES</b>	Systèmes socio-écologiques

<b>SHIFT</b>	Séries temporelles à haute fréquence du SBG
<b>SIF</b>	Fluorescence (chlorophylle) induite par le soleil
<b>SOIE</b>	École des savoirs indigènes et locaux
<b>SimPachamama</b>	Modèle de simulation hybride pour les compromis socio-environnementaux
<b>SL</b>	Leadership scientifique
<b>SLA</b>	Superficie foliaire spécifique
<b>SMAPSoil</b>	Moisture Active Passive (Humidité du sol active et passive)
<b>SMOS</b>	Humidité du sol et salinité de l'océan
<b>SPUN</b>	Société pour la protection des réseaux souterrains
<b>CSE</b>	Comité scientifique directeur
<b>SSP</b>	Voies socio-économiques partagées
<b>SST</b>	Température de surface de la mer
<b>STEM</b>	Science, technologie, ingénierie et mathématiques
<b>STILT</b>	Modèle de transport lagrangien stochastique inversé dans le temps
<b>STRI</b>	Institut de recherche tropicale de Smithsonian
<b>SWOT</b>	Mission de topographie des eaux de surface et des océans
<b>Tallo</b>	Une base de données mondiale sur l'allométrie des arbres et l'architecture des couronnes
<b>TBD</b>	A déterminer
<b>TCCON</b>	Réseau d'observation de la colonne de carbone total
<b>TE</b>	Écologie terrestre
<b>TEK</b>	Connaissances écologiques traditionnelles
<b>TERN</b>	Réseau de recherche sur les écosystèmes terrestres
<b>TIR</b>	Rayonnement infrarouge thermique
<b>TIR</b>	Capteur infrarouge thermique
<b>TmFO</b>	Observatoire des forêts tropicales aménagées
<b>TRISHNA</b>	Satellite d'imagerie infrarouge thermique pour l'évaluation à haute résolution des ressources naturelles
<b>TRLTechnology</b>	Readiness Level (niveau de préparation technologique)

<b>TROLL</b>	Représentation arborescente d'un modèle au niveau du paysage
<b>TROPOMI</b>	Tropospheric Monitoring Instrument (instrument de surveillance de la troposphère)
<b>TRY</b>	Base de données des caractères végétaux
<b>ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE</b>	États-Unis d'Amérique
<b>UAV</b>	Véhicule aérien non révisé
<b>UCLA</b>	Université de Californie, Los Angeles
<b>CCNUCC</b>	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
<b>UN-SDSN</b>	Réseau des Nations unies pour les solutions de développement durable
<b>USAID</b>	Agence américaine pour le développement international
<b>USDA</b>	Département de l'agriculture des États-Unis
<b>USFS</b>	Service des forêts des États-Unis
<b>USGS</b>	Service géologique des États-Unis (U.S. Geological Survey)
<b>VEDA</b>	Visualisation, exploration et analyse de données
<b>VIIRS</b>	Suite de radiomètres imageurs dans le visible et l'infrarouge
<b>COV</b>	Composé organique volatil
<b>VOD</b>	Profondeur optique de la végétation
<b>VPD</b>	Déficit de pression de vapeur
<b>VPRM</b>	Modèle de photosynthèse et de respiration de la végétation
<b>VSWIR</b>	Infrarouge visible à ondes courtes
<b>WRI</b>	World Resources Institute (Institut des ressources mondiales)
<b>WUE</b>	Efficacité de l'utilisation de l'eau

## 14 Annexes

- A. Lettres de soutien
- B. Partenaires et activités d'engagement de PANGEA
- C. Engagement au cours de l'étude exploratoire
- D. Activités de recherche et de surveillance prévues et en cours
- E. Tableau détaillé des mesures PANGEA
- F. Réponses au retour d'information
- G. Sujets hors du champ d'application de PANGEA

## Modèles de tableaux

**Tableau X.** Légende du tableau PANGEA.

Tableau Note PANGEA.

INTITULÉ DU TABLEAU C PANGEA	INTITULÉ DU TABLEAU C PANGEA	INTITULÉ DU TABLEAU C PANGEA RÉDUIT MANUELLEMENT À 8 PT
Remplissage standard des titres de colonnes : 198/224/220	Remplissage alternatif du sous-titre gris : 210/210/210	Remplissage alternatif de l'intitulé bleu de la même nuance que le vert : 194/225/241
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA Remplissage des rangs standard : 227/240/249	Tableau Texte PANGEA Remplissage gris alternatif : 239/239/239	Tableau Texte PANGEA réduit manuellement à 8 pt-as devra probablement être fait dans certains endroits.
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	Tableau Texte PANGEA	Tableau Texte PANGEA
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	• Tableau Bullet PANGEA	Tableau Texte PANGEA
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	Tableau Texte PANGEA	Tableau Texte PANGEA
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	Tableau Texte PANGEA	Tableau Texte PANGEA
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	Tableau Texte PANGEA	Tableau Texte PANGEA
INTITULÉ DU TABLEAU L PANGEA	Tableau Texte PANGEA	Tableau Texte PANGEA

Tableau Note PANGEA.

### Case X. Intitulé de la case PANGEA

Texte encadré PANGEA. Remplissage de l'encadré bleu : 228/232/251.

Texte encadré PANGEA. Remplissage du cadre vert : 217/234/211.

Tableau unicellulaire factice pour contenir la figure et la légende (pas de cadres) :

Figure dans Figure PANGEA Style du mot.

**Figure X.** Légende dans le style Word de la légende de la figure PANGEA (avec le numéro de la figure mis en gras manuellement).

## A. Lettres de soutien

Institut Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt) ; <https://www.humboldt.org.co/>

Alliance Bioversity et Centre international d'agriculture tropicale (CIAT) ;  
<https://alliancebioversityciat.org/>

AmeriFlux - le réseau de tours de flux à covariance de Foucault des Amériques ;  
<https://ameriflux.lbl.gov/>

Amazon Institute of Technology (AmIT) ; <https://amit.institute/>

Observatoire des tours d'Amazonie (ATTO) ; <https://www.attoproject.org/>

AndesTours de flux exploitées par l'Université catholique pontificale du Pérou (PUCP)

Installation de recherche aéroportée pour le système terrestre (ARES) ;  
<https://www.uzhfoundation.ch/en/projects/sustainability/ares-airborne-research-facility-for-the-earth-system-1>

Réseau d'observatoires écologiques nationaux (NEON) de Batelle ;  
<https://www.neonscience.org/>

Enquête sur la biodiversité du Cap (BioSCape) ; <https://www.bioscape.io/>

Modèle démographique de végétation BiomeE-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) ; <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017198>

Centre pour la recherche forestière internationale et l'agroforesterie mondiale (CIFOR-ICRAF) ; <https://www.cifor-icraf.org/>

Centre d'études sur l'Amazonie durable (CEAS) ; <https://ceas.usp.br/>

Alliance pour la modélisation du climat (CLiMA) ; <https://clima.caltech.edu/>

Initiative scientifique du bassin du Congo (CBSI) ; <https://congobasinscience.net/>

CongoFlux- tour de flux par covariance de Foucault dans le bassin du Congo - équipe de l'Université de Gand ; <https://www.congo-biogeochem.com/congoflux>

Programme de recherche sur la mesure et l'échantillonnage des tourbières du Congo ; <https://congopeat.net/>

Communauté de modélisation de la démographie des écosystèmes (ED2) ;  
<https://github.com/EDmodel/ED2>

Embrapa (Société brésilienne de recherche agricole) Acre ;  
<https://www.embrapa.br/en/international>

Embrapa Florestas ; <https://www.embrapa.br/en/international>

Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) ; <https://www.esri.com/en-us/home>

FLUXNET CH4 - initiative visant à compiler une base de données mondiale de

mesures de flux de méthane par covariance d'eddy ;  
<https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ;  
<https://www.fao.org/fao-office-climate-change-biodiversity-environment/en>

ForestGEO ; <https://forestgeo.si.edu/>

ForestPlots - réseau de mesure, de surveillance et de compréhension des forêts du monde ; <https://forestplots.net/>

Agence gabonaise d'études et d'observations spatiales (AGEOS) ;  
<http://spaceinafrica.com/2019/02/26/all-about-ageos-gabon-space-program/>

Groupe sur l'observation de la Terre et les arbres (GEO-TREES) ; <https://geo-trees.org/>

Global Land Analysis & Discovery (GLAD) ; <https://glad.umd.edu/>

Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts (GCF-TF) ;  
<https://www.gcftf.org/>

Tour de covariance Guyaflux-eddy à la station de terrain de Paracou (Sinnamary, Guyane française) ; <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>

Guyafor - réseau de 54 parcelles à long terme réparties sur 17 sites en Guyane française ; <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyafor-network>

Système intégré d'observation du carbone (ICOS) ; <https://www.icos-cp.eu/>

Institut international d'agriculture tropicale (IITA) ; <https://www.iita.org/>

Initiative MapBiomass-Biome Mapper ; <https://brasil.mapbiomas.org/en/> NASA Harvest ; <https://www.nasaharvest.org/>

Centre national de recherche scientifique et technologique du Gabon (CENAREST) ;  
<https://www.cenarest-gabon.org/>

Institut national de recherche spatiale, Brésil (INPE) ; <https://www.inpe.br/crc/>

Observatoire national du changement climatique, Cameroun (ONACC) ;  
<https://onacc.cm/>

Expériences sur les écosystèmes de prochaine génération (NGEE)-Tropiques ;  
<https://ngee-tropics.lbl.gov/>

Initiative "One Forest Vision" (OFVi) ; <https://www.oneforestvision.org/>

Université d'État de Pennsylvanie, département de météorologie et de sciences atmosphériques ; <https://www.met.psu.edu/>

Planet; <https://www.planet.com/>

Predictive Ecosystem Analyzer (PecAn) ; <https://pecanproject.github.io/>

Rainforest Foundation Norway ; <https://www.regnskog.no/en/>

Réduction des incertitudes dans les interactions biogéochimiques par la synthèse et le calcul (RUBISCO) ;

<https://climatemodeling.science.energy.gov/projects/reducing-uncertainty-biogeochemical-interactions-through-synthesis-and-computation-rubisco>

Institut de recherche pour le développement, France (IRD) ; <https://en.ird.fr/>  
Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale (OSFAC) ;  
<https://www.osfac.net/> Société pour la protection des réseaux souterrains (SPUN) ;  
<https://www.spun.earth/>

Réseau des solutions pour le développement durable des Nations unies (UN-SDSN) ;  
<https://www.unsdsn.org/>

UK Centre for Ecology and Hydrology; <https://www.ceh.ac.uk/>

Universidad Nacional del Altiplano (UNAP) Pérou ; <https://www.portal.unap.edu.pe/>

*Lettre en espagnol, suivie de sa traduction en anglais*

Universidad Nacional de Piura Peru (UNP)-Département d'agronomie ;  
<https://www.gob.pe/unp>

Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Peru (UNTRM);  
<https://www.untrm.edu.pe/portal/en/>

Université catholique de Louvain, Belgique-Institut de la Terre et de la Vie ;  
<https://uclouvain.be/en/research-institutes/eli>

Université de Californie, Los Angeles (UCLA) Vice Chancellors Office for Research and Creative Activities ; <https://www.research.ucla.edu/>

Université de l'énergie et des ressources naturelles (UENR) Ghana, Bureau du vice-chancelier ; <https://uenr.edu.gh/>

Programme international de l'US Forest Service (USFS-IP) ;  
<https://www.fs.usda.gov/about-agency/international-programs>

Réseau Flux Afrique de l'Ouest

Wildlife Conservation Society (WCS) ; <https://www.wcs.org/>

Centre climatique et de recherche Woodwell ; <https://www.woodwellclimate.org/>

Institut des ressources mondiales (WRI) ; <https://www.wri.org/>



December 4<sup>th</sup> 2024

**NASA Earth Science Division**

NASA Headquarters  
300 E Street SW  
Washington, D.C. 20546

Dear Members of the NASA Earth Science Division,

On behalf of the Alexander von Humboldt Institute, I am writing to express our strong support for the PAN-Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) initiative. We are eager to collaborate in advancing PANGEA's scientific objectives in Colombia, and to contribute to the broader goal of understanding tropical forest resilience to climate change and land-use dynamics.

The Humboldt Institute's mission is to conduct basic and applied research on Colombia's biodiversity, including the creation of a national inventory of the country's biotic, hydrobiological, and genetic resources. This mission aligns perfectly with PANGEA's goal to investigate tropical forests and their responses to environmental change. We have a significant expertise in conducting biodiversity monitoring using a variety of tools, including forest inventory plots, plant trait measurements, bioacoustic monitoring, camera traps, and eDNA collection. We also specialize in integrating field-based data with advanced remote sensing, such as hyperspectral and lidar technologies, making us a strong partner for PANGEA's goal of scaling biodiversity measurements across tropical landscapes. Our ongoing research in the Colombian Amazon, Andean regions, and other tropical ecosystems positions us well to support PANGEA's efforts, particularly in enhancing our understanding of the impacts of climate change and land-use on biodiversity and ecosystem function.

A key objective of PANGEA is to prepare the next generation of scientists from tropical countries, particularly from regions like the Amazon and Congo Basins, who will carry the work forward. The Humboldt Institute is deeply committed to fostering capacity building for effective biodiversity conservation and its sustainable use, particularly among local and Indigenous communities. We have a strong record of engaging postdocs, and undergraduates in field research, as well as facilitating exchanges with global researchers. We therefore look forward to contributing to PANGEA's training efforts by offering research opportunities and mentoring to students and early-career scientists from Colombia and the broader tropical regions. By collaborating on workshops and field-based training, the Humboldt Institute can help ensure that PANGEA's activities are aligned with local research priorities and the knowledge needs of tropical nations.

---

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad



Ultimately, our primary goal is to ensure that biodiversity knowledge is transformed into actionable solutions for conservation and sustainable development. To reach this objective, we work hand-in-hand with local communities, decision-makers, and the private sector to implement science-based solutions for biodiversity conservation, land-use planning, and climate adaptation. These efforts directly support PANGEA's objective of using science to inform decision-making and guide actions for climate change mitigation, biodiversity conservation, and sustainable land use.

In sum, the Humboldt Institute is well-positioned to support PANGEA's goal of developing tools for monitoring environmental changes, such as fire risks, biodiversity trends, and carbon sequestration. Our expertise in biodiversity monitoring, our commitment to capacity building, and our experience translating scientific research into actionable knowledge make us a valuable partner for PANGEA. Together, we can contribute to more resilient, sustainable, and informed management of tropical forests and the biodiversity they support.

Sincerely,

Jose Manuel Ochoa  
Centro de Estudios Socioecológicos y Cambio Global  
Alexander von Humboldt Institute  
Bogotá, Colombia

---

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad



RM-CJ-209-2024  
August 21, 2024

**Dr. Elsa Ordway**  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

CIAT is a non-profit, non-governmental research organization established in 1967, with headquarters in Palmira-Colombia and various regional offices worldwide. Our goal is to deliver research-based solutions that harness agricultural biodiversity and sustainably transform food systems to improve people's lives in a climate crisis. To achieve our objectives, we currently conduct research on crop improvement, agrobiodiversity conservation, and climate-smart agriculture in regions including Latin America, Africa, and Asia.

PANGEA aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, CIAT can provide cost-shared funding in the form of in-kind support. This includes staff time, as well as evidence-based data and information derived from our collaborations with national and regional governments, other CGIAR Centers and private sector actors. These partners play a critical role in advancing agricultural and ecological research in their respective regions and are essential in achieving sustainable land management practices. Engaging with these partners is beneficial for PANGEA as they bring local knowledge, research expertise, and strong connections with farming communities that



The Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is part of CGIAR, a global research partnership for a food-secure future.

Bioversity International is the operational name of the International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI).

The Americas Hub  
Km 17, Recta Cali-Palmira CP 763537  
Apartado Aéreo 6713  
Cali, Colombia  
Tel. (+57) 602 4450000

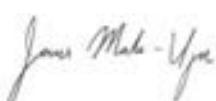
[alliancebioversityciat.org/](http://alliancebioversityciat.org/)  
[www.cgiar.org](http://www.cgiar.org)

are directly affected by climate change. Our expertise spans sustainable and zero-deforestation business and investment models, bioeconomy, biodiversity monitoring, and climate services, integrating comprehensive crop and soil data.

We conduct various initiatives and projects in the Amazon Basin within the tropical rainforest ecosystem because it is a critical region for global biodiversity and carbon storage. This site is of strategic importance to PANGEA due to its high biodiversity and the significant impact of deforestation and land-use change on global climate patterns. CIAT has been working in this location for over 40 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with local stakeholder engagement, data collection, and capacity-building activities.

While our organization excels at harnessing agricultural biodiversity to drive sustainable food systems and improve livelihoods, particularly through our expertise in community engagement, the integration of crop and soil data, and biodiversity monitoring, we seek to engage with PANGEA to enhance our work in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest. Specifically, PANGEA can support us by providing advanced Earth observation tools and methodologies that will complement our on-the-ground research. This collaboration will help us improve our understanding of ecosystem dynamics, monitor deforestation impacts, and strengthen our ability to develop climate-smart strategies. By integrating PANGEA's insights with our existing data, we can enhance our efforts in biodiversity conservation and sustainable land management in this critical region.

PANGEA offers a unique opportunity to explore novel research hypotheses that are crucial for understanding tropical forest systems in the face of rapid environmental changes. We are excited to collaborate on this groundbreaking research and contribute to advancing our collective knowledge of these vital ecosystems. We look forward to engaging in new research endeavors under the PANGEA initiative and leveraging its insights to enhance our efforts in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest.



**Javier Mateo-Vega**

**Global Director Partnerships & Communications**



,  
Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary  
Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Jena, December 5, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with activities conducted by the Amazon Tall Tower Observatory.

The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO; [www.attoproject.org](http://www.attoproject.org)) is a Brazilian-German collaborative project funded primarily by the Brazilian Ministry for Science Technology and Innovation (MCTI), the German Ministry for Education and Research (BMBF), and the Max Planck Society. ATTO, the Amazon Tall Tower Observatory, is a unique scientific platform in the central Amazon, 150 km northeast of Manaus. The overall goal of ATTO is to provide a site for long-term research on the changing role of Amazon forests in the Earth system. Research at ATTO seeks to improve fundamental understanding of the complex physical, chemical and biological interactions between the world's largest expanse of tropical forest and the atmosphere. It includes multidisciplinary studies with over 200 collaborating researchers using the single site to study the balance of energy, water and trace gases, the importance of forests in atmospheric chemistry and aerosol formation, clouds and convection, and the processes underlying seasonal and interannual variations in atmosphere-forest exchange for the diverse ecosystems found in the footprints of ATTO's 80-m and 325-m tall towers.



It is clear that the goals of ATTO and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and ATTO will seek to link remotely sensed (aircraft and satellite) characteristics with ground observations. Likewise, ATTO is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the ATTO project will be open to opportunities for collaboration. ATTO already involves ~200 collaborating researchers from a range of institutions and disciplines. We have a process for integrating new projects that involves a proposal by potential new investigators, a search for synergies with ongoing research, an assessment of resources needed to support implementation, and an ultimate decision about the integration of the proposed research through our Science Steering Committee. We imagine there are many ways that ATTO can find synergies with PANGEA, and also that PANGEA help can put ATTO measurements into the broader context of other tropical forests.

PANGEA is an exciting project that will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the co-coordinator of ATTO from the German side of the project, I confirm our interest in and support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between ATTO and PANGEA.

Sincerely,

Prof. Susan Trumbore, PhD

Dept. Biogeochemical Processes



Lawrence Berkeley National Laboratory



Dr. Margaret S. Torn

Senior Scientist & Senior Program Advisor

Climate & Ecosystem Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory

mstorn@lbl.gov

Oct 20, 2024

Dear Dr. Elsa Ordway and PANGEA Team,

I am writing on behalf of the AmeriFlux Management Project to express our support for the NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA), and to signify our intent to collaborate with PANGEA to produce actionable science on tropical forests around the world.

I lead the AmeriFlux Management Project (AMP), which serves the AmeriFlux Network of 674 field sites and teams measuring land-atmosphere fluxes of carbon, water, and energy using the eddy covariance technique. The U.S. DOE established AMP at Berkeley Lab in 2012 to support the AmeriFlux community and AmeriFlux sites, through activities like data quality assurance and control (QA/QC), technical support, and outreach. AmeriFlux site teams across the Americas, from Chile to Alaska, share their data with the network and we make data openly available at [ameriflux.lbl.gov](http://ameriflux.lbl.gov). The network also encompasses the global community of scientists and stakeholders who use the data for myriad applications. AmeriFlux datasets, and the understanding derived from them, provide crucial linkages between terrestrial ecosystem processes and climate-relevant responses at landscape, regional, and continental scales.

AmeriFlux has a long history of working with NASA and providing validation data for NASA missions. In fact, we have just convened a Theme Year of Remote Sensing, which emphasized the value of combining remotely sensed and ground-based observations, and increased collaborations with NASA partners. If PANGEA is selected for funding, we will coordinate with the project to advance these capabilities further.

Tropical forests are important ecosystems of interest for the AmeriFlux community. If PANGEA is selected for funding, we will work with the project and make AmeriFlux resources available in a number of ways.

- The AmeriFlux data archive, with over 3500 site-years of downloadable data, will be available to PANGEA researchers. It would be highly beneficial to expand the set of observations in tropical forests, specifically.
- AMP maintains a set of eddy-flux instrument packages which we loan for up to three years (rapid response systems); PANGEA-affiliated scientists would be able to apply to deploy these systems in tropical forests.
- We will coordinate with PANGEA on joint events, such as workshops and training opportunities.
- We will invite PANGEA researchers to participate in our active research community and events. AmeriFlux regularly comes together in community events, and forms working groups to address new challenges and harness opportunities. The PANGEA project would be invited to host sessions at the AmeriFlux Annual Meeting, give updates at the AmeriFlux AGU Town Hall, and other participation.
- Should new eddy covariance sites for measuring carbon fluxes be established for PANGEA, we will assist in registering them in AmeriFlux, offer technical advice, and provide data QA/QC, processing, and publication.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Margaret Torn".

Margaret Torn



November 7<sup>th</sup>, 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express our strong support for NASA's Terrestrial Ecology Field Campaign proposal: PAN-tropical Investigation of Biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, this campaign will address gaps in data, methods, and applications related to measuring, understanding, and scaling carbon, water, and energy fluxes in tropical forests, as well as their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGEA has the potential to support and enhance the Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and International Research and Innovation Networks activities led and conducted by AmIT in the Pan-Amazon region.

The Amazonian Institute of Technology (AmIT) is a non-profit initiative established in 2022 in Brazil (<https://amit.institute/>). Our mission is to contribute to the socioeconomic development and improved quality of life of the Amazonian population, in synergy with the conservation and valorization of forests and rivers, by transforming scientific and traditional knowledge into technological innovation serving the Amazon and the world. To achieve our objectives, we plan to operate in the countries of the Amazon basin. Currently, we are in contact with Peru and Colombia to develop activities involving: Advanced Technologies for the Amazon; Human Development for the Amazon; Sustainability for the Amazon Biome; Amazonian Environmental Services; and Applied Biological Sciences for the Development of the Amazon.

We recognize alignment between the efforts and objectives of AmIT and PANGEA, particularly in Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and Formation of International Research and Innovation Networks. We are eager to support PANGEA's efforts to leverage Earth observation with multidisciplinary methods to conduct research. AmIT is enthusiastic about the prospect of engaging diverse communities in the tropics to promote scientific understanding, strengthen research and monitoring capacity, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We seek initiatives with local communities and institutions in partner with Amazonian countries. We are undertaking this initiative in the Amazon due to our strategic geographic position and the region's importance to PANGEA, considering the risks the Amazon faces. AmIT proposes the socioeconomic



development of Amazonian populations through the use of Science and Technology to address the region's major challenges in strategic areas such as conservation, bioeconomy, health, infrastructure, and technological innovation. AmiT has a 25-year agenda for its work in the Amazon.

If PANGEA is funded, our team will also consider developing joint research proposals to seek funding that supports participation in studies related to PANGEA and AmiT. We believe this is an important project with high-impact potential that can significantly contribute to knowledge about the Amazon. On behalf of AmiT, I express my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support for PANGEA will allow us to pursue this common interest.

Sincerely,

Adalberto Luis Val  
Amazonian Institute of Technology  
Manaus, AM, Brazil

INTE 050-2024

**Dr. Elsa Ordway**

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Lima, 22 October, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, this campaign will fill critical gaps in our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests and their feedbacks with climate, biodiversity, and human activities. PANGEA will also complement and reinforce national and international activities led by NASA and DOE, aligning with ongoing collaborations with AndesFlux, a network led by the Pontifical Catholic University of Peru.

The synergies between AndesFlux and PANGEA are evident, particularly in the measurement and analysis of biogeochemical gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ), using eddy flux towers, and forest dynamics, using inventory plots. For years, AndesFlux has been at the forefront of monitoring these processes across five sites spanning the climatic gradient of the western Amazon. Our goal is to elucidate the drivers of biogeochemical gas fluxes and forest dynamics in one of the most understudied regions of the Amazon basin.

We are enthusiastic about PANGEA's vision to leverage Earth observation data and multidisciplinary approaches to advance tropical ecology. The campaign's commitment to engaging diverse communities across the tropics resonates with our own objectives of advancing scientific understanding, building capacity for research and monitoring, and applying results to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

The western Amazon holds strategic importance for achieving PANGEA's objectives. The data we are collecting here are critical for developing a comprehensive understanding of Amazonian ecosystems. Should PANGEA be funded, AndesFlux can offer logistical support across our five sites to validate and improve satellite-derived measurements. We also envision using our existing data to collaborate on PANGEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding.



As a longstanding leader in measuring biogeochemical gases and forest dynamics in the Western Amazon, the Pontifical Catholic University of Peru is equally committed to capacity building. Through PANGEA, we aim to expand opportunities for Peruvian scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize AndesFlux data. This will ensure a pipeline of skilled researchers equipped to tackle critical ecological questions.

PANGEA represents an unparalleled opportunity to enhance our collective understanding of Earth systems. As professors and principal investigators of AndesFlux, we express our unwavering support for this campaign and are optimistic that NASA's backing will enable us to pursue these shared research goals.

Founded in 1917, the Pontifical Catholic University of Peru is a leading private research institution based in Lima. Our mission is to advance knowledge and innovation through rigorous research, academic excellence, and community engagement. To achieve these objectives, we operate projects in diverse ecosystems, including tropical forests, coastal zones, and Andean environments, where we focus on ecological monitoring, capacity building, and sustainable development initiatives.

We look forward to the potential of contributing to PANGEA and are confident that this partnership will yield transformative scientific and societal impacts.

**Eric G. Cosio, Ph.D.**  
Director, INTE-PUCP  
Professor  
Science Department

**Norma Salinas, Ph.D.**  
Senior Research Scientist, INTE-PUCP  
Associate Professor  
Science Department



UZH, President's Services, Rämistrasse 71, 8001 Zurich

Prof. Dr. Elsa M. Ordway  
University of California, Los Angeles  
USA

**Prof. Dr. Michael Schaepman**  
Professor of Remote Sensing  
University of Zurich  
Switzerland

09 November 2024

**Letter of Support for PANGEA**

Dear Dr. Ordway

This letter of support refers to your white paper of PANGEA («The PAN tropical of bioGeochemistry and Ecological Adaptation») discussing the scoping of a NASA-sponsored field campaign.

The above white paper provides in depth information on the scientific rationale, a study design concept for a field campaign, addressing the key science questions of PANGEA, and its rationale and implementation. We have read with great interest the white paper and we are pleased to fully support its goals within the possibilities of the University of Zurich.

More specifically, the University of Zurich acts as Principal Investigator for an airborne observatory named ARES (Airborne Research Facility for the Earth System) with the imaging spectrometer AVIRIS-4 serving as core instrument. AVIRIS-4 is an instrument jointly developed between NASA JPL and the University of Zurich and in operation since 2024.

The ARES team and infrastructure is glad to support PANGEA with airborne acquisitions. The scientific content of PANGEA is of utmost importance and relevance; therefore, the University of Zurich expresses its willingness to provide some in-kind financing for the deployment of ARES for PANGEA.

We are looking forward to a continued excellent collaboration!

Kind regards,

Prof. Dr. Michael Schaepman  
President, Professor of Remote Sensing

[Click or type here to enter the enclosures.]



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
elsaordway@ucla.edu

Dear Dr. Ordway,

On behalf of Battelle and the NEON program, I am writing regarding your research proposal entitled, “PANGEA (PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation) - A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign” being submitted to NASA’s Terrestrial Ecology Program.

If PANGEA is funded, Battelle will work together with you on the proposed effort as we would for any appropriately related NASA-funded project, subject to availability of resources and alignment of the proposed activities with NEON’s mission.

PANGEA is a proposed, decade-long campaign that employs satellite and airborne remote sensing paired with ground and flux tower measurements to characterize how heterogeneous tropical forests within and among continents vary in response to anthropogenic pressures to understand and predict their vulnerability or resiliency to future change. If selected, PANGEA will establish a network of centrally coordinated field and airborne campaigns that are distributed across targeted tropical forest ecosystems to fill data gaps and enable scaling between field and remotely sensed datasets, as well as regional and pan-tropical scale modeling.

The National Ecological Observatory Network (NEON), funded by the U.S. National Science Foundation and operated by Battelle, offers open, high-quality, continental-scale ecological data and samples. These resources are freely accessible, enabling researchers to understand and predict ecological responses to environmental changes. NEON operates 47 terrestrial and 34 aquatic sites across the U.S., including Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In coordination with in-situ observational and instrumented systems (e.g., eddy covariance flux towers), NEON conducts airborne remote sensing surveys, with the Airborne Observation Platform (AOP), to gather regional-scale landscape data during peak greenness, providing insights into land cover, ecological changes, and the impact of invasive species. All NEON data and resources are freely accessible for download, sharing, and analysis via the NEON Data Portal or the NEON Data API.

We are closely integrated with the environmental and ecological research community through collaboration, standardized practices, data usage, and research support services. NEON also provides educational and training resources to foster the next generation of students and scientists and aims to broaden and diversify the community for effective utilization of NEON data, samples, and technology.

Battelle promotes a safe and inclusive working environment on the NEON Program that complies with the NSF requirement for Safe and Inclusive Working Environments for Off-Campus or Off-Site Research. It is expected that any individuals working with NEON staff will adhere to the NEON Code of Conduct to create a safe and positive community experience for all.

We are actively collaborating with the NASA EMIT team to develop scaling workflows between NEON and satellite data in preparation for NASA's upcoming Surface Biology and Geology (SBG) mission, and PANGEA could strengthen collaboration and engage a broader research community. There will be strong synergies between NEON and PANGEA in methods optimization and advancement, data collection and processing standards, algorithm development, scaling approaches, training, validation of satellite analyses and large-scale synthesis studies using NEON-like data across global ecological gradients. The NEON Program would benefit from collaboration with PANGEA, given NEON's sites in Hawaii and Puerto Rico fall within PANGEA's extended pan-tropical domain.

PANGEA will be crucial for assessing the resilience and vulnerability of tropical forests to climate change, and provide guiding data in biodiversity conservation, climate change adaptation, and mitigation.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Paula Mabee". The signature is fluid and cursive, with "Paula" on the top line and "Mabee" on the bottom line.

Paula Mabee, Ph.D.

Chief Scientist and Observatory Director  
National Ecological Observatory Network (NEON)  
Battelle  
Boulder, CO USA  
[mabee@battelleecology.org](mailto:mabee@battelleecology.org)

Dear Review Panel,

It is our pleasure to recommend the PANGEA project and to offer the experience and expertise of BioSCape as a resource for its success. BioSCape is a biodiversity-focused airborne and field campaign funded by NASA's Biodiversity and Ecological Conservation Program. The project aims to enhance our understanding of terrestrial and aquatic ecosystems in South Africa through advanced imaging spectroscopy, thermal, and lidar data collection. The ultimate goal of BioSCape has been to advance our capability to measure biodiversity from space, shedding light on ecosystem structure, function, and composition.

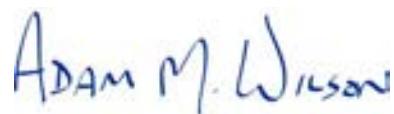
The BioSCape campaign presented an exceptionally complex Concept of Operations. The science team included 19 PI-led research teams with unique objectives and distinct geographic regions of interest. The campaign required near-simultaneous data collection of target areas by four NASA instruments aboard two separate aircraft—an orchestration made even more challenging by varying environmental conditions and science requirements. Moreover, the BioSCape team was intentionally international, with over 150 members, nearly half of whom were affiliated with institutions outside the U.S. While this diversity brought tremendous value, it also presented challenges in equitable funding due to restrictions on direct U.S. federal funding for non-U.S. affiliates. Additionally, the science team was diverse in scientific discipline, proximity to end-users, field experience, local knowledge, technical capacity, and culture. Consequently, BioSCape was vulnerable to parachute science. Being aware of this risk, BioSCape made a concerted effort to prevent parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.

BioSCape was a huge success, and we hope to share the lessons we learned with PANGEA and support them in executing high-quality, inclusive international NASA science. Specifically, the BioSCape leadership team will support PANGEA by offering advice on:

- Executing a complex airborne and field campaign in a middle-income country with a diverse set of science team objectives.
- Making progress in best practices for preventing parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.
- Running an inclusive international campaign and cultivating an ethical and high-trust team dynamic.
- Garnering support and participation from multiple local, regional, and national agencies and institutions on the ground in Africa.

The BioSCape team strongly supports the goals of PANGEA and is committed to contributing to its success. We look forward to the possibility of collaborating with the PANGEA team and seeing their accomplishments in advancing NASA's research objectives.

Sincerely,



ADAM M. WILSON

Adam Wilson (PI) on behalf of the BioSCape leadership team: Erin Hestir (Co-PI), Jasper Slingsby (South African PI), and Anabelle Cardoso (Science Team Manager)



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095, USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to confirm our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the field campaign as proposed is selected, PANGEA will fill a fundamental gap on the data needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with climate change and human activities, contributing towards an improved understanding of how tropical forests are responding to the rapid global changes. PANGEA's overarching goals are closely aligned to the endeavor of modeling global vegetation dynamics and land surface fluxes at NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) in its earth system model, ModelE.

Demographic vegetation modeling (BiomeE) is a model development project within GISS ModelE that has been supported by the NASA Modeling, Analysis, and Prediction (MAP) program since 2020 (<https://map.nasa.gov/research/ROSES20/>). This project's main objective is to model global vegetation dynamics and its feedback to climate systems. Tropical forest ecosystems are a major component in this modeling effort.

We foresee the synergistic activities and opportunities for collaboration between the land modeling group at GISS and PANGEA. Both projects aim at improving the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings will improve the predictive skills of terrestrial biosphere models and quantify the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. We have submitted a proposal to NASA MAP 2024 on integrating observations across multiple scales with NASA GISS's demographic vegetation model (BiomeE) based on data assimilation and machine learning approaches to gain process-understanding of the main drivers of forest-savanna ecosystem state shifts in the tropical regions of South America and Africa. This topic is also an important objective for PANGEA.

We will look for possible ways for direct involvement with PANGEA should the field campaign be selected for improving the modeling of tropical forest ecosystem in GISS ModelE. We will

look for calls for proposals and funding opportunities from PANGEA and other programs (e.g., MAP, Carbon Science, and Biological Diversity & Ecological Conservation), and seek contributions that are related to the goals of PANGEA.

PANGEA is a critically important project that would significantly advance our scientific knowledge of the ecosystems that are still poorly represented in Earth system models. As the developer of the terrestrial ecosystem module in GISS ModelE, we would like to offer our enthusiastic support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration with PANGEA.

Sincerely yours,



Ensheng Weng  
Associate Research Scientist  
Center for Climate Systems Research, Columbia University  
NASA Goddard Institute for Space Studies  
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA  
Email: [ew2560@columbia.edu](mailto:ew2560@columbia.edu), [ensheng.weng@nasa.gov](mailto:ensheng.weng@nasa.gov)  
Office: 212-678-5585  
<http://www.giss.nasa.gov/staff/eweng.html>



Benjamin Cook  
Research Physical Scientist  
NASA Goddard Institute for Space Studies  
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA  
Email: [benjamin.i.cook@nasa.gov](mailto:benjamin.i.cook@nasa.gov)  
Office: 212-678-5669  
<https://www.giss.nasa.gov/staff/bcook.html>



**Prof. Paulo Artaxo**

Centro de Estudos Amazônia Sustentável  
Universidade de São Paulo



Phone: +[55] (11) 3091 7016

+55-11-991158970

e-mail: [artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)

São Paulo, November 9, 2024

**To whom it may concern**  
**PANGEA letter of support**

The Center for Sustainable Amazonia Studies (CEAS) from the University of São Paulo (USP) is pleased to support the PANGEA proposal fully. This innovative approach will help us better understand the critical role that tropical forests play in the global climate. The Brazilian scientific community is eager to join PANGEA's efforts. We are running LBA, ATTO, FACE, and many large-scale experiments that are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The University of São Paulo has recently set up a Center for Sustainable Amazonia Studies, which has more than 200 USP researchers from several areas. Our multidisciplinary approach is online with PANGEA, and we will be happy to help and support PANGEA activities.

The FAPESP Global Change Program, of which I am one of the coordinators, will also be happy to join forces. CEAS is already running several FAPESP Thematic projects, and integrating these different initiatives will benefit all of us.

We fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with this critical scientific agenda.

*Sincerely,*

Prof. Paulo Artaxo

Director, CEAS – Center for Sustainable Amazonia Studies



Elsa Ordway, PhD  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

05 December 2024.

**Support Letter for PANGEA (PAN Tropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation)**

We are writing to convey our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, the PANGEA program will greatly enhance research activities in forest monitoring, climate change, and capacity building under the leadership of the Centre for International Forestry Research and the World Agroforestry Centre (CIFOR-ICRAF).

CIFOR-ICRAF is an international research organization focused on global issues, namely climate change, biodiversity, food, value chains, and equity. It is dedicated to producing research information to support decision-makers worldwide in improving well-being. Our scientists bring the latest research findings and analysis on forests, trees, and agroforestry to major global forums. CIFOR-ICRAF has offices in 26 countries and works on all six continents.

PANGEA's goals align closely with our ongoing efforts, addressing global challenges like deforestation and biodiversity loss, the climate crisis, inequity, unsustainable supply and value chains, and dysfunctional food systems. We are applicants for supporting PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in researching tropical forests, peatlands, and coastal ecosystems.

If PANGEA is selected, CIFOR-ICRAF can offer in-kind support through its extensive network and logistical structure in the three tropical basins. There is also the possibility to initiate resource mobilization from other sources to support joint activities with PANGEA, as it represents a project with significant potential impact.

As Chief Executive Officer at CIFOR-ICRAF, I fully support the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement will facilitate this valuable partnership, advancing our shared goals in climate mitigation, adaptation, and conservation, with a particular emphasis on forest ecosystems.

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eliane Ubalijoro'.

Dr. Eliane Ubalijoro

CEO of CIFOR-ICRAF



Linde Center for Global Environmental Science  
Division of Geological and Planetary Sciences

Mail Code 131-24  
Pasadena, CA 91125  
(626) 395-6143  
[tapio@caltech.edu](mailto:tapio@caltech.edu)  
[www.clima.caltech.edu](http://www.clima.caltech.edu)

10 September 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
Los Angeles, CA, 90095

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway:

I am writing to express the Climate Modeling Alliance's (CliMA) strong interest in the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. We are excited by the potential of PANGEA to advance our understanding of tropical forest ecosystems and their response to climate and anthropogenic changes. The alignment between PANGEA's research objectives and CliMA's mission makes this an excellent opportunity for future collaboration and mutual benefit.

At CliMA, our core mission is to deliver actionable climate predictions to empower effective climate adaptation and mitigation planning. We are developing a next-generation Earth system model that leverages machine learning, data assimilation, and extensive ground and space-based observations. Our goal is to predict changes in critical climate phenomena such as droughts, heat waves, and extreme rainfall events, with a focus on providing accurate, localized information.

PANGEA's focus on assessing the impact of global changes on tropical biogeochemical cycles and forest structure aligns with our research interests. We see tremendous potential in integrating high-resolution simulations from our Earth system model with on-the-ground and satellite data collected by PANGEA. This synergy can enable us to quantify uncertainties, offer novel insights into ecosystem responses, and contribute to addressing PANGEA's Science Question 1 regarding the similarities and differences in tropical forest biogeochemistry and structure.

Furthermore, the Earth observations gathered by PANGEA would be invaluable for refining CliMA's models and improving our predictions of ecosystems under future climate scenarios. The opportunity to access data from underexplored tropical forest regions would be particularly beneficial in enhancing our understanding of and capabilities to model these critical ecosystems.

We are also enthusiastic about PANGEA's commitment to open science and capacity building in the Global South. CliMA shares these values and is dedicated to making our scalable, open-source modeling platform accessible to a wide range of stakeholders through cloud resources. We believe that fostering collaboration and providing user-friendly tools for real-world decision-making are essential for addressing the complex challenges posed by climate change.

We eagerly anticipate the outcomes of the PANGEA Scoping Campaign and are optimistic about the potential for future collaboration. Should the PANGEA program secure NASA funding, we would be keen to explore opportunities to leverage CliMA's modeling capabilities in support of PANGEA's research objectives.

Thank you for considering our perspective. We look forward to staying engaged with the PANGEA initiative and contributing to its success in the future.

Sincerely,



Tapio Schneider  
Theodore Y. Wu Professor of Environmental Science and Engineering  
Principal Investigator, CliMA



Dr. Renato K. Braghieri  
Research Scientist  
Land Modeling Lead, CliMA

## Congo Basin Science Initiative

c/o Congo Basin Water Resources Research Center  
Department of Natural Resources Management  
University of Kinshasa  
Bâtiment FOGRN BC  
Kinshasa  
Democratic Republic of Congo

Email: [info@congobasinscience.net](mailto:info@congobasinscience.net)



# Congo Basin Science Initiative

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

26 November 2024

Dear Dr. Ordway,

### **RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities, via new data, methods, and techniques. The field campaigns will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. We co-chair the Congo Basin Science Initiative, which is closely aligned to PANGEA's main goals.

The Congo Basin Science Initiative (CBSI) is a large network of scientists, led by those from the region, to understand the Congo Basin as a changing regional entity, train a new generation of scientists from the region, and deliver this new data and knowledge to policy makers and civil society. Our main source of funds is from the UK government, to implement the CBSI Science and Capacity Plan, which includes distributed data collection across the region including climate, hydrology, vegetation and biogeochemistry, biodiversity, land cover and land use change, and socio-ecological data, to understand the full climate-water-forest-society system.

CBSI and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and CBSI are working at the large-scale, but with complementary methods, PANGEA focused more on airborne and spaceborne sensors and CBSI more ground-based and process-oriented data collection. Likewise, the ultimate aim of both endeavours is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests.

Should PANGEA be selected, CBSI will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to joint PANGEA and CBSI goals.

We will also look to maximize the exposure of our cohort of PhD and MSc students from the region to NASA and wider US science.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As co-chairs of CBSI, we confirm our full support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between CBSI and PANGEA in the hopefully near future.

Sincerely,



Prof. Raphael Tshimanga  
Co-chair, Congo Basin Science Initiative  
Professor  
University of Kinshasa, DRC



Professor Simon L Lewis FRS  
Co-chair, Congo Basin Science Initiative  
Chair of Global Change Science  
University of Leeds, UK

Rik Van de Walle  
Rector

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

E [rector@ugent.be](mailto:rector@ugent.be)  
T +32 9 264 30 01

Campus Ufo, Rectorate  
Sint-Pietersnieuwstraat 25  
BE-9000 Ghent  
Belgium

[www.ugent.be](http://www.ugent.be)

DATE	PAGE	OUR REFERENCE
06 November 2024	1/3	2024/RVDW/ddb/068

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express strong support of Ghent University for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and fundamental research gaps related to the understanding and scaling of CO<sub>2</sub> (and other greenhouse gasses) and water fluxes in tropical forests, especially in Central Africa. PANGEA will support and reinforce the data collection, modelling and more generally many of the research activities led and carried out at Ghent University by multiple colleagues, including Prof. P. Boeckx, Prof. M. Bauters, Prof. H. Verbeeck, Prof. W. Hubau and Dr. F. Meunier.

Furthermore, Ghent University is interested to become a member of the science planning team of PANGEA. Ghent University is an internationally renowned public higher education institution of around 50,000 students and 16,000 employees. Our 11 faculties offer over 200 programs and conduct in-depth research in a wide range of scientific fields. Our credo is "Dare to Think", which encourages everyone to question conventional views and dare to take a nuanced position. We are a pluralistic university open to all, whatever their ideological, political, cultural or social background. Ghent University is also the first European university to start a campus on Incheon Global Campus in Korea. We are a Dutch-speaking university, but English is widely spoken by students and staff, and international students can choose from a wide variety of courses and programs in English.

DATE	PAGE	OUR REFERENCE
06 November 2024	2/3	2024/RVDW/ddb/068

We see several aligned efforts and complementarities between Ghent University's activities in Central Africa and PANGEA, especially in relation to our unique activities in Yangambi, DR Congo, since 2010. In Yangambi we operate since 2020 the first eddy covariance flux tower (CongoFlux) for the Congo basin. CongoFlux follows ICOS protocols and is an associated tower to the ICOS network. We also coordinate a ground-based network of permanent 1 ha inventory plots as well as ForestGeo (1), GEM (4) and regrowth plots (5 chronosequences), ecosystem monitoring, terrestrial and airborne laser scanning, in Yangambi and in multiple other locations in DR Congo and other rainforest countries in Central Africa. We also have specific experience with dynamic vegetation models applied to the tropics, in particular to Central Africa. In addition, we have added tropospheric ozone and black carbon analyzers, FTIR for total column measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO as well as solar induced fluorescence (SIF) sensors.

We and some organizations to which our colleagues are related (e.g., CongoFlux, the Congo Biogeochemical Observatory, the Congo Basin center of Excellence, and the center of excellence for the African Great Lakes' Natural Capital) look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and multidisciplinary data collection and methods to conduct research. We are particularly excited to strengthen via PANGEA the remote sensing component (e.g., LIDAR and hyperspectral data) at the CongoFlux site to allow scaling our observations. Hence, we look forward to the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen local capacity (both technicians and researchers) for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We have already pursued various sensitizing and capacity building initiatives with local communities, the National Institute for Agronomic Study and Research (INERA) in Yangambi, the Universities of Kisangani, Lubumbashi and Bukavu and Mountains of the Moon, as well as various national parks (Kahuzi-Biéga, Salonga, Rwenzori). Ghent University has been working in Yangambi for 15 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with e.g., logistics for new data collection, the synthesis of ancillary data and the modeling of the ecosystems. We have a team of ca. 25 PhDs, 4 local professors and 5 technical staff in the Kisangani-Yangambi landscape.

Should PANGEA be funded, Ghent University can provide in-kind support in the form of data, local networks, logistics, and many other types of support that can be useful. Our team will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies.

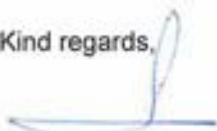
In conclusion, our institution is one of the few international organizations actively collecting ground-based data in central Africa. We excel at collecting and analyzing different types of ground-based data, including eddy covariance data, plot inventories, wood and leaf trait data, at

DATE	PAGE	OUR REFERENCE
06 November 2024	3/3	2024/RVDW/ddb/068

strengthening capacity of local universities and government officials, and at engaging with local population via various sensitizing activities. We seek to further strengthen our capacities to link vegetation models, ground based, eddy covariance and remote sensing data to improve our understanding of pantropical carbon accounting and ecosystem functioning.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Rector of Ghent University, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue these common interest and efforts.

Kind regards,



Rik Van de Walle  
Rector



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

7 November 2024

Dear Dr. Ordway,

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

I am writing to express strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will fill critical data, methodological, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon cycle dynamics in tropical peatlands and their interactions more broadly with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change and disturbance dynamics, human activities. PANGEA will also support and reinforce future mapping activities particularly combining ground and Earth Observation data analysis led and carried out by CongoPeat.

CongoPeat is a collaboration between five UK Universities, Marien Ngouabi University in Republic of the Congo and the universities of Kisangani and Kinshasa in the Democratic Republic of the Congo, first established in 2012. Our goal is to understand the past, present and future function of the central Congo peatlands, and supply new knowledge to policy makers and civil society to enhance their long-term protection. To achieve our objectives, we have previously conducted diverse fieldwork across the 16.7 million hectare peatland region, published landmark studies (Dargie et al. 2017, Nature; Garcin et al. 2023 Nature; Hawthorne et al. Quaternary Science Reviews, Young et al. 2024 Global Change Biology), and assisted the establishment of a new law in Republic of the Congo protecting the peatlands from industrial use.

We currently have long-term activities in Ekolongouma (Republic of the Congo), Ossendo and Ossango (Republic of the Congo) and Lokolama (DRC) where we are installing a flux tower and other instrumentation with partners at University of Kisangani, University of Ghent, and University of Kinshasa. We are training a new generation of students in diverse aspects of peatland and wetland science, including 12 current students from Republic of Congo and DRC.

We see several aligned efforts and general aims between CongoPeat and PANGEA, in particular in combining ground data and Earth Observation data to produce better maps of the peatlands; understanding the carbon balance of the peatlands; understanding methane fluxes from the peatlands, and modelling how these might change in the future.

We look forward to working together with PANGEA and its efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics on peatland and wetland research to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, CongoPeat will try to align our research activities and assist PANGEA to understand how we can gain additional scientific insights from this. There will be no in-kind benefits from the Republic of Congo and DRC Universities or staff, as we do not have spare capacity or resources. The UK universities may provide in kind support depending on the details of the research programs to be determined, or we will consider developing research proposals where the Republic of Congo and DRC partners co-lead collaborations for win-win research in the Global South and Global North.

We believe that PANGEA is a very important project with the potential for high impact. As founder and Co-lead of CongoPeat, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort to understand the world's largest tropical peatland complex, and protect its 29 billion tonnes of stored carbon and world's highest densities of lowlands gorillas and forests elephants for the long-term.

Yours sincerely

S. L.

Professor Simon L. Lewis FRS  
Chair in Global Change Science  
School of Geography  
University of Leeds  
Leeds. LS2 9JT. UK.  
**Tel:** +44 (0)113 343 3337  
**Email:** [s.l.lewis@leeds.ac.uk](mailto:s.l.lewis@leeds.ac.uk)



November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing in support of the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If selected, PANGEA will address important knowledge gaps regarding the role of structurally and functionally diverse tropical moist forests on carbon, energy, water, and nutrient cycles. The proposed field campaigns will advance our knowledge on the risks of different tropical forest regions undergoing critical, potentially irreversible, transitions due to intensification of climate extremes and expansion of deforestation and forest degradation.

PANGEA's main objectives and vision are closely aligned to the modeling and model-data integration activities conducted by the Ecosystem Demography Model (ED2) team. The ED2 model is a process-based land-surface model that accounts for the dynamic, heterogeneous nature of forest structure and composition, and the resulting impacts of this heterogeneity on ecosystem function. ED2 has been used in multiple studies to answer scientific questions relating to the role of diverse forests in the Earth System, at scales ranging from a single site to entire continents. ED2 can provide mechanistic understanding and quantification of the role of tropical forest functional diversity on increasing the resilience of tropical forests to global change, which is one of the key PANGEA's overarching questions. Importantly, with respect to PANGEA's goals, ED2 has been extensively applied to: (i) study the dynamics of terrestrial carbon, water and energy cycles in tropical regions; (ii) determine and quantify the impacts of using new forms of terrestrial remote sensing observations – including, lidar and radar measurements of forest structure, imaging spectrometry-based measurements of forest composition, and microwave measurements of canopy and soil moisture – to constrain predictions of long-term, large-scale terrestrial ecosystem dynamics; and (iii) bench-marking predictions of terrestrial ecosystem dynamics, including several assessments in tropical regions.

The development and application of the ED2 modelling framework has been supported by multiple United States funding agencies over the past two decades. While NASA has been the primary supporting agency, the National Science Foundation and the Department of Energy have also provided support. Should PANGEA be selected for funding, the ED2 modeling group will seek out opportunities to directly engage with PANGEA activities, including submitting

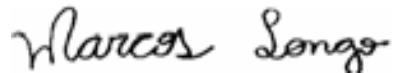
proposals to funding opportunities from the above US agencies that are related to PANGEA's overarching goals. We will also seek opportunities for contributing to capacity building and training of students on land-surface terrestrial ecosystem modeling, both within the US and in the tropics.

PANGEA is a timely and critically important project that will advance our current understanding of the resilience of tropical forests to on-going global environmental change. We enthusiastically support the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and look forward to exploring opportunities for collaboration between ED2 and PANGEA.

Sincerely,  
The ED2 model development team



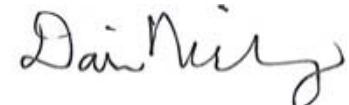
Paul R. Moorcroft  
Harvard University  
Professor of Organismic and Evolutionary Biology  
Faculty Affiliate, Environmental Science and Engineering Program, Harvard University  
Cambridge, MA 02138



Marcos Longo  
Research Scientist  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Berkeley, CA 94720



Ryan Knox  
Ecosystem Modeler  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Berkeley, CA 94720



David Medvigy  
Associate Professor  
University of Notre Dame

Department of Biological Sciences  
Notre Dame, IN 46556



Michael C. Dietze  
Professor  
Boston University  
Department of Earth & Environment  
Boston, MA 02215



Naomi M. Levine  
Professor  
University of Southern California  
College of Letters, Arts and Sciences  
Los Angeles, CA 90089



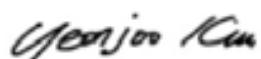
Abigail Swann  
Professor  
University of Washington  
Department of Atmospheric and Climate Science  
Seattle, WA 98195



Xiangtao Xu  
Assistant Professor  
Cornell University  
Dept. of Ecology and Evolutionary Biology  
Ithaca, NY 14853



Hans Verbeeck  
Associate Professor  
Ghent University  
Department of Environment  
B-9000 Gent, Belgium



Yeonjoo Kim  
Professor  
Department of Civil and Environmental Engineering  
Yonsei University  
Seoul, Korea.



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**  
**Ministério da Agricultura e Pecuária**  
Embrapa Acre  
Rodovia BR-364, km 14, Caixa Postal 321  
CEP 69900-97 - Rio Branco-AC  
Telefone: (68) 3212-3200  
[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)

Carta nº 109/2024-CPAF-AC/CHGE

Rio Branco, 04 de dezembro de 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Assunto: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance with data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon fluxes in tropical forests and/or their interactions with climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with similar activities conducted by Embrapa Acre/C-arouNd in Western Brazilian Amazon.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions - C-arouNd is a EJP that has been supported by Embrapa and international institutions since 2023 (<https://ejpsoil.eu/soil-research/second-external-call-international-call/c-around>). C-arouNd's goals include to investigate how short and long-term agricultural management practices affect SOM persistence in the soil profile and contribute to inclusion of the effects in national inventories to inform policy to reduce net greenhouse gas emissions and mitigate global change. We are currently investigating this persistence in tropical soil of Acre, Western of Brazilian Amazon at Rio Branco and Mâncio Lima, a regional scale.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and C-arouNd are interesting in tropical areas. Likewise, C-arouNd is producing field data that can be used to integrate observations across multiple scales with models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests and also agroecosystems, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the C-arouNd group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, We will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. We confirm our intention to support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA.

Sincerely,

Dr. BRUNO PENA CARVALHO  
Chefe-Geral da Embrapa Acre



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Pena Carvalho, Chefe-Geral**, em 04/12/2024, às 15:57, conforme art. 6º, parágrafo 1º do Decreto 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [https://sei.sede.embrapa.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.sede.embrapa.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **11489040** e o código CRC **AB5C82E6**.

Colombo, December 2<sup>nd</sup>, 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance on data, training gaps/needs related to the greenhouse gases measurement in tropical forests, climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with samples collection and greenhouse gases (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) analysis, using chromatographs activities conducted by Embrapa Florestas.

I am interested in exchanging experience and learning about modeling with your team, also I can see future connections with my projects with alternative biomasses for energy, that can mitigate deforestation. Also, in a Project to produce gold bioextractor produced with leaves from an Amazon native tree that can be used also for mining forest recuperation areas. These projects are related with PANGEA, once it can provide regional changes that can have global impacts on carbon cycle dynamics and biodiversity loss.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. I confirm my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for.

Sincerely,

 Documento assinado digitalmente  
MARINA MOURA MORAES  
Data: 04/12/2024 13:51:40-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Marina Moura Morales  
Embrapa Florestas  
Researcher Sustainable systems  
[marina.morales@embrapa.br](mailto:marina.morales@embrapa.br)  
+55 41 3675 5705 / +55 41 992087182

MARCELO FRANCIA  
ARCO  
VERDE:70842817972  
Assinado de forma digital  
por MARCELO FRANCIA  
ARCO VERDE:70842817972  
Dados: 2024.12.03 16:07:52  
-0300

Marcelo Francia Arco-Verde  
Embrapa Florestas  
Main head  
[cnpf.chgeral@embrapa.br](mailto:cnpf.chgeral@embrapa.br)  
+55 41 3675 5610



**Subject: Esri Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly advance the application of existing and emerging geospatial technologies developed by Esri towards both social and environmental outcomes. PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics perfectly aligns with Esri's demonstrated commitment to sustainable development initiatives and the conservation of biodiversity.

The Environmental Systems Research Institute, Esri Inc. is a global leader in Geographic Information Systems committed to advancing the understanding of our world through geographic technologies. Esri serves over 650K organizations worldwide who leverage our technology across a wide variety of industries. Our mission is to develop best of class technology, serve the communities using these tools and advance greater efficiencies, understanding and positive impacts for society and the environment.

Esri's primary technology framework, ArcGIS, provides considerable imagery and remote sensing management and analysis capabilities increasingly including emerging hyperspectral capabilities. A close partnership with PANGEA, if selected, would provide Esri an opportunity to exercise these existing and emerging capabilities for positive environmental and social impact. Esri provides complimentary and low-cost access to its technology for Education, Conservation, Humanitarian, and Disaster Response initiatives through formal programs serving tens of thousands of organizations globally. Alignment with PANGEA presents an opportunity for demonstrating the potential of emerging technologies and data sources to communities who can substantially benefit from a new class of geospatial information products and decision support solutions.

We are eager to work with PANGEA to practically apply and improve ArcGIS to further advance Earth observation capabilities. We strongly endorse PANGEA's collaborative and multidisciplinary approach to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change to support the development of innovative and effective solutions.

If PANGEA is selected, ESRI can provide in-kind support through the access of Esri technology for key stakeholders including nonprofits, academic institutions and Local and Indigenous



Communities. Our team is also prepared to explore funding opportunities to formally participate in PANGEA-related research and applications activities through support from Esri Professional Services and our global network of partner organizations.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As the Director of Conservation Solutions at ESRI, I offer my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our impact towards sustainable development, climate and biodiversity conservation goals.

David Gadsden

A handwritten signature in black ink, appearing to read "David Gadsden".

Director, Conservation Solutions  
Esri Inc.  
380 New York Street  
Redlands, California



Dr. Elsa Ordway  
 Department of Ecology and Evolutionary Biology  
 UCLA

4 December 2024

Re: PANGEA Application

Dear Dr. Ordway and the PANGEA Team,

We are writing in support of your project “PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)” and to express our intent to collaborate with you on the project. We established and coordinate the FLUXNET-CH<sub>4</sub> network and we are currently establishing a network of new methane flux towers across the Amazon and into Africa, in collaboration with researchers in these regions. This includes eddy flux measurements in Brazil, Peru, French Guiana, and Botswana, as well as synthesis of data from flux towers across the South America, Africa and Southeast Asia. The tropics are a large and growing source of methane emissions, but measurements of these fluxes remain extremely limited. PANGEA’s proposed work will fill this gap by providing new measurements locations and a platform to scale these findings with remote sensing.

We would welcome the chance to collaborate with you on PANGEA. We see many synergies between our efforts and PANGEA’s proposed work. For example, one of our major goals is synthesis of existing *in situ* methane flux data from tropical ecosystems. This will complement PANGEA’s airborne campaigns and provide a valuable foundation to target new field measurements. Additionally, we have developed virtual training materials on methane flux data processing to improve data quality from tropical sites. A collaboration with PANGEA would offer a platform to disseminate these resources more widely. In summary, if PANGEA is selected for funding, we see many opportunities to align our research and training efforts to improve our understanding of tropical methane emissions.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Rob Jackson".

Robert B. Jackson  
 Douglas Provostial Professor  
 Department of Earth System Science  
 Stanford University  
 Stanford, CA 94305  
 (650) 497-5841 (Ph)  
 rob.jackson@stanford.edu

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Alison Hoyt".

Alison M. Hoyt  
 Assistant Professor  
 Department of Earth System Science  
 Stanford University  
 Stanford, CA 94305  
 (650) 283-9862  
 ahoyt@stanford.edu



Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, IT

[www.fao.org](http://www.fao.org)

Rome, Italy 24 September 2024

Dr Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps and needs related to the measurement of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce several activities led and carried out by the Climate Change, Biodiversity and Environment Office of the United Nation Food and Agriculture Organization (FAO).

We see several aligned efforts and general aims between FAO and PANGEA, in particular, improving our understanding of the tropical forest biomes and all the land use change processes that are occurring in these regions. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, FAO can provide in-kind support in the form of data exchange, cooperation and direct/indirect participation to many projects occurring in the tropical regions. Our team will also consider supporting participation in PANGEA-related studies.

While our organization excels at strength (e.g. community engagement, collecting and analysing ground-based data, strengthening capacity of local government officials, etc.), we seek to engage in research activities such as, "leveraging satellite imagery to improve carbon cycle assessment".

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As leader of the Climate Action Support Team in the Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB), I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.



Martial Bernoux  
Senior Natural Resources Officer  
Climate Action Support Team  
Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB)  
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)  
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy



# Forest Global Earth Observatory

*Smithsonian Tropical Research Institute*

6 December 2024

To: Dr. Elsa Orway  
PANGEA Lead, Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am pleased to provide my strong support for your NASA proposal entitled "*PAN-tropical bioGeochemistry Airborne Experiment in Africa and the Americas (PANGEA)*." This is an extremely important initiative that will lead to a huge leap in understanding of how tropical forests are and will respond to the combined effects of climate and land-use change.

As Director of the Forest Global Earth Observatory (ForestGEO) at the Smithsonian Institution, I am excited to contribute to this research effort through ForestGEO activities across the tropics. Leveraging the long-term site-based monitoring of tropical forests by ForestGEO partners over the past 40 years, will advance the goals of PANGEA and will be hugely beneficial to ForestGEO's goals of tropical forest science and capacity sharing and strengthening.

Please feel free to contact me if you require any further information.

Yours sincerely,

Stuart J. Davies  
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science  
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)  
Smithsonian Institution  
[www.forestgeo.si.edu](http://www.forestgeo.si.edu)  
[daviess@si.edu](mailto:daviess@si.edu)

**School of Geography**  
University of Leeds  
Leeds LS2 9JT  
U.K.



+44 (0) 113 34 36832 (direct)  
Email: o.phillips@leeds.ac.uk



**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

21st November 2024

Dear Dr. Ordway,

I write to express my enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly enhance the understanding of Earth's most precious ecosystems. It will also help support the work of many tropical partners of ForestPlots.net, connecting them better to the remote-sensing community.

ForestPlots.net is a global collaboration of many networks and almost 3,000 scientists engaged in measuring, monitoring and analysing the world's tropical forests. Our primary aims are to connect people measuring forests on the ground, to fund fieldwork in tropical countries, and to support our tropical partners so they can manage their data effectively and engage equitably in global science.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ForestPlots.net, perhaps especially in central Africa where we have received new funding recently from the Central African Forest Initiative (CAFI) to support AfriTRON partners in their long-term forest measurements. We are eager to support PANGEA's collaboration with the forest plot community to advance equitable collaboration, integrate of field measurements and knowledge with Earth observation, and develop a multidisciplinary approach to research in tropical forests, peatlands, and wetlands.

ForestPlots.net partner scientists are interested in diverse themes, such as tree mortality and its drivers, pan-tropical biodiversity and ecosystem function patterns and processes, and forest resilience to climate change. Our contributing networks are grounded in local partnerships, and especially active in Amazonia and tropical Africa. These partnerships and the deep knowledge of tropical forest ecosystems embedded in the ForestPlots.net community will facilitate PANGEA's objectives as this

expertise and ForestPlots.net's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation across the tropics.

If PANGEA is selected, we are interested to explore funding opportunities so our partners can directly participate in PANGEA-related research and applications activities. We see opportunities in PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, connecting our partners' work to help them collaborate with this community, and generating new sources of funding to support the vital fieldwork which underpins the calibration and validation of remote-sensors and their products.

I strongly believe that PANGEA represents a project with high potential impact. As Coordinator of the global ForestPlots.net initiative and the RAINFOR network in Amazonia, and Chair in Tropical Ecology at the University of Leeds, I therefore offer my full support for the PANGEA campaign. I hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared goals on climate mitigation and adaptation goals and globally-equitable science, with a particular emphasis on resilient forests and locally led solutions.

Yours sincerely

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Oliver Phillips", is written over a blue horizontal line.

Professor Oliver Phillips  
Chair in Tropical Ecology  
University of Leeds  
School of Geography  
Leeds, UK  
(44) 113-343-6832  
[www.rainfor.org](http://www.rainfor.org)  
[www.ForestPlots.net](http://www.ForestPlots.net)  
o.phillips@leeds.ac.uk



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce Gabonese national forest characterization and monitoring activities already led and carried out by AGEOS.

AGEOS is a government agency that was established in 2010 in Gabon (<http://ageos.ga/>). Our goal is to involve in the implementation of the Government's policy on the acquisition, analysis and availability of data from space observation of the national land for the sustainable management of the environment, natural resources, land use, regional planning, research and innovation. To achieve our objectives, we develop a national strategy for space observation activities ; manage the space infrastructure ; ensure the monitoring and evaluation of the implementation of public policies (roads, housing, energy, natural resources, etc.) ; provide data related to climate change and promote training, research and capacity building in earth observation tools.

We see several aligned efforts and general aims between AGEOS and PANGEA, in particular in biogeochemical cycles and carbon dynamics, ecosystem structure, function and biodiversity and climate feedbacks and interactions.

We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our organization/institution excels at analyzing remote sensing data and collecting ground-based data, we seek to engage in leveraging satellite imagery (data), data collect method and capacity building (advanced level) planned in PANGEA framework to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As [General Director of AGEOS, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common interest/activity/effort.



Aboubakar MAMBIMBA NDIOUNGUI  
General Director  
AGEOS  
NKOK Special Economic Zone (ZES) - Plot R27- PK27  
Gabon



2 December 2024

To: Dr. Elsa Orway  
PANGEA Lead  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly advance understanding of the role of tropical forests in the earth system. It will also benefit and be synergistic with the recently established GEO-TREES initiative.

GEO-TREES is a ground-based reference system for the calibration and validation of earth observation satellite estimates of forest carbon. GEO-TREES is working with hundreds of partners across the world's forests to establish a representative network of permanent reference sites. This involves ground plots, terrestrial laser scanning, and airborne laser scanning at each site, and is underpinned by significant investments in training and capacity sharing. Our initial goal is to establish 100 core reference sites globally, with at least 60 sites in tropical forests.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at GEO-TREES, particularly in understanding current and future changes in tropical forest dynamics and functioning. We are eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, and wetlands that span intact to disturbed forests. We see a particular opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further GEO-TREES goals through the incorporation of biodiversity monitoring in tropical forests.

If PANGEA is selected, GEO-TREES will endeavor to support PANGEA research and training initiatives at sites across the tropics. We would also welcome the opportunity to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities. The longstanding experience of the GEO-TREES leadership team and partner sites and networks across the tropics will be of strategic importance to PANGEA's objectives.

On behalf of the GEO-TREES Executive Board, we offer our full support to the PANGEA campaign. We believe PANGEA represents a project with high potential impact, and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals.

Yours sincerely,



Stuart J. Davies  
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science  
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)  
Smithsonian Institution  
[www.forestgeo.si.edu](http://www.forestgeo.si.edu)



Jérôme Chave, CNRS  
UMR5300 Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement,  
CNRS, INPT, IRD, Université de Toulouse, France  
<https://jeromechave.github.io/>



December 4, 2024

Re: PANGEA letter of support

To whom it may concern:

I am writing in support of the PANGEA research campaign and its goals of discovering the impacts of climate and land-use change on the world's humid tropical forests, focusing on the Americas and Africa. Our GLAD (Global Land Analysis and Discovery - glad.umd.edu) laboratory at the University of Maryland generates the annual global forest loss maps that are the core data set of the Global Forest Watch (globalforestwatch.org) program, and much of our work is focused on humid tropical forests. By definition, primary humid tropical forests are a finite resource. Our data show an increasing rate of loss for this invaluable, and non-renewable, environmental asset. The outcomes of deforestation are well documented, including carbon emissions, biodiversity loss, and local and global downstream climate impacts. Change in humid tropical forests used to be predominantly mechanical extraction/clearing. Increasingly, we see fires consuming rainforests. Whether accidental or intentional, practically all rainforest fires are human set and track with climate anomalies. What is clear is that land use and climate change have made the rainforests more likely to burn, and we are in critical need of understanding and mitigating this dynamic. The list of interventions is long, but must be informed by science. Without such action, per the concept of the tipping point, humid tropical climate systems may change states and lead to the conversion of rainforests without any direct human action.

All of this is to say that PANGEA fits the need and call for action. The proposed field campaign will help us understand the differences and commonalities between rainforests, building a data-driven framework that advances our monitoring, modeling, and possible mitigation of the effects of large-scale climate and land use change on rainforests.

Our work at GLAD is a ready input to this effort. While we work pan-tropically, we also partner with national governments, NGOs and universities. Our capacity building efforts advancing land remote sensing in the tropics, whether supporting national reporting with the forestry agencies of the Democratic Republic of the Congo and Republic of Congo, or in a scientific advisory capacity with MapBiomas in Brazil, constitute a host of in place partnerships ready to synergize with PANGEA.

Please, use this letter as evidence of my unqualified and enthusiastic support for PANGEA and its comprehensive and ambitious plan to advance our understanding of current rainforest dynamics in helping to mitigate future rainforest loss.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Matthew Hansen".

Matthew Hansen  
mhansen@umd.edu  
University of Maryland, Professor

November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

On behalf of the Governors' Climate and Forests Task Force (GCF Task Force), we are writing to express our ongoing support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical needs in terms of data, capacity building, and improved understanding of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGEA also has significant potential to support and reinforce forest protection and land use governance efforts led and carried out by member jurisdictions of the GCF Task Force.

Established in 2009, the GCF Task Force is a unique coalition of 43 states and provinces from 11 countries working to establish and enhance jurisdiction-wide approaches to reducing deforestation and promoting sustainable land use. We work directly with the Governors, Secretaries, and civil servants in our member states and provinces as well as with their partners from civil society, Indigenous and local communities, academia, and the private sector to develop innovative, collaborative approaches to the problems of deforestation and climate change.

We see several aligned efforts and general aims between the GCF Task Force and PANGEA, particularly helping to ensure close collaboration between researchers, data scientists, and land use decisionmakers. To that end, we were pleased to co-sponsor a PANGEA scoping [workshop](#) in Lima, Peru in June 2024. Technical civil servants from GCF Task Force member jurisdictions in Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru, together with academic researchers from these same countries, convened to learn about PANGEA and to provide insight into how improved data, methods, and applications from this field campaign could support both scientific and forest governance advancements on the ground.

The GCF Task Force was an early advocate for the proposal to design the PANGEA scoping study (see attached support letter), and we look forward to continuing to support PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. Should PANGEA be funded, we are particularly excited at the prospect of increasing the engagement of diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices. We hope to leverage our network of policymakers, technical staff, and partners from across our 43 member states and provinces to use PANGEA products and participate in capacity building activities.

We believe this is an important project with the potential for high impact. We look forward to working with you and your team and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort together.

Sincerely,



William Boyd  
Project Lead



Jason Gray  
Project Director

Attachment: Support Letter for Scoping Studies



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the PANGEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGEA will also be synergistic to Guyaflux activities led and carried out by INRAE in French Guiana.

Guyaflux (GF-Guy), located at the Paracou field station in French Guiana, is a long-term research program led by INRAE and funded by INRAE and various European contracts since 2003 (<https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>). Guyaflux aims at analyzing the impact of environmental conditions, particularly climate change, on greenhouse gas fluxes between the tropical rainforest ecosystem and the atmosphere. The Guyaflux site has power (solar panels) and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGEA. Participants of PANGEA will also have access to labs located at INRAE's research center at Kourou (45-min drive from Paracou field station).

There are multiple highly aligned goals between Guyaflux and PANGEA. For example, both projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGEA be selected, the Guyaflux team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGEA, to advance direct collaboration with PANGEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI and scientific head of the Guyaflux site, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyaflux.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "D. Bonal".

Dr. BONAL Damien  
Senior Scientist  
INRAE  
UMR SILVA, 54180 Champenoux, France



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the PANGEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGEA will also be synergistic to Guyafor activities led and carried out by Cirad in French Guyana.

Guyafor network (GF-Guy) is a long-time survey program of experimental forest plots led by Cirad and funded by Cirad and various French and European fundings since 1984 (<https://paracou.cirad.fr/>). Guyafor network aims at assessing the response of guyanese forests dynamics, structure and functioning to climatic variability and logging practices. We currently integrate regular forest inventories, botanical identification, environmental data and remote sensing data at the scale of experimental stations across the territory and at regional scale in french guyana. Within the Guyafor network, Paracou station has power and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGEA, and the UMR EcoFoG labs are accessible in Kourou (45-min drive from the Paracou station).

There are multiple highly aligned goals between Guyafor and PANGEA. For example, both

projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGEA be selected, the Guyafor team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGEA, to advance direct collaboration with PANGEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI of Paracou station and among scientific coordinators of Guyafor network, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyafor.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mirabel".

Dr. MIRABEL Ariane  
Researcher  
Cirad  
UMR EcoFoG, 97310 Kourou, France

To

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Dr. habil. Werner Leo Kutsch**

Director General  
Integrated Carbon Observation  
System (ICOS ERIC)

Email: [werner.kutsch@icos-ri.eu](mailto:werner.kutsch@icos-ri.eu)

Helsinki, 15 November 2024

Dear Dr. Ordway,

**Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests. PANGEA will also support and reinforce international research, training, and data collation activities led and carried out by ICOS.

The Integrated Carbon Observation System (ICOS) is a distributed Research Infrastructure to generate high-precision data and integrate knowledge on the carbon cycle and greenhouse gas (GHG) budgets and of their perturbations. ICOS conducts long-term observations in three networks – atmosphere, ecosystems, and oceans – as required to understand the present state and extrapolate to the future behaviour of the global carbon cycle and GHG fluxes. ICOS has an increasing role in scientific support of climate policy.

ICOS has a number of activities ongoing in Africa, in particular with one Ecosystem Associate station (Yangambi in the Democratic Republic of Congo) and the Atmospheric station in La Réunion, and in French Guiana with the Associated Ecosystem station GuyaFlux. In addition, ICOS coordinates an EU project that has the aim to design an environmental Research Infrastructure in Africa (<https://kadi-project.eu/>).

We see a number of aligned efforts and general aims between ICOS and PANGEA, in particular in advancing research that leverages satellite imagery to advance methods to scale fluxes, and to validate and calibrate remote sensing products using the data collected at the flux towers. The ICOS Ecosystem stations have long histories of data being used for Cal/Val and model benchmarking, and a set of standardized tower-based remote sensing data are being implemented in the ICOS network, including FAPAR, canopy thermal measurements and imaging, phenology cameras and spectral data. PANGEA would help to fill spatial gaps thanks to the extensive use of remote sensing data (including the European satellites) and help to build a consistent and robust link between local scale field measurements and large scale continental and global products.

The collaboration between ICOS and PANGEA will improve accessibility to high quality carbon cycle data and can develop common or coordinated training initiatives and material for the next generation of scientist, in particular on the scalability of in situ measurements using high quality remotely sensed data. The plan of PANGEA in extending training material and activities in Portuguese and French languages would make the training more effective and accessible in the target areas of Africa and South America.

Should PANGEA be funded, ICOS will be excited to coordinate activities, and support PANGEA through the ICOS stations in tropical regions, the ICOS Ecosystem Thematic Centre and the ICOS Head Office

and Carbon Portal. Among the activities, ICOS will continue to perform rigorous eddy covariance data processing and distribution services, including for possible new sites in Africa, and evaluate the extension of measurements and products as funding availability allows. ICOS will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGAEA-related scientific and training activities.

We recognize the mutual benefits in coordinating with PANGAEA and sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of tropical terrestrial ecosystems and better leverage Earth observation datasets to support our Research Infrastructure goals. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for the research and understanding in the carbon cycle, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As the Director General of ICOS, I express my utmost support on behalf of the PANGAEA campaign scoping team and hope that NASA's support of PANGAEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,



Dr. habil. Werner Leo Kutsch

**International mailing address**

IITA Ltd, Suite 32  
5th floor, AMP House  
Dingwall Road  
Croydon  
CR0 2LX

**Headquarters**

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe  
Ibadan, Nigeria  
Tel: +1 201 6338094  
+234 700 800 4482  
Fax: +44 (208) 711 3786 (via UK)

14 November 2024

Co-Director,  
Centre for Tropical Research and Congo Basin Institute  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
410K Botany Building  
University of California  
Los Angeles, CA 90095.

Dear Dr. Ordway,

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

I am writing to express the support of the International Institute of Tropical Agriculture (IITA) for the proposed National Aeronautics and Space Administration (NASA) Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions. This aligns well with IITA's mission to offer a leading research partnership that facilitates agricultural solutions to hunger, poverty, and natural resource degradation throughout sub-Saharan Africa.

IITA leads the One CGIAR's African continental agenda and operates in twenty-one (21) research stations in Africa covering sixteen (16) countries, including multiple stations in the Congo Basin covering Burundi, Cameroon, Central African Republic, Chad, Republic of Congo, DR Congo (DRC), Equatorial Guinea, Gabon, Rwanda, and São Tomé and Príncipe. IITA's operations focus on Research for Development (R4D) and Partnerships for Delivery (P4D), a structure designed to bridge the gap between research and its deployment in Africa. Through partnerships with governments, development partners, and communities, IITA deploys successful technologies and methods to sustainably advance food security in Africa.

As a leading organization focused on conducting research and deploying advances to address food insecurity, we anticipate partnering to use data and methodological improvements from PANGEA through an Earth Science to Action (ES2A) framework. Specifically, improved remote sensing data from the tropics could be leveraged as part of the One CGIAR Sustainable Farming program, a multi-institutional initiative on sustainable food production, with a focus on sub-Saharan Africa. Specifically, the PANGEA initiative aligns perfectly with IITA's programs on breeding for resilient crops under the genetic innovation research area, plant health, natural resource management and mixed crop agronomy under the resilient farming systems research area, as well as the climate adaptation under the system transformation research area. Methodological improvements from PANGEA offer opportunities to remotely track the impact of agronomy interventions on crop yields, significantly increasing our ability to measure the uptake and impact of new agronomic inputs and methods. We also anticipate using findings from PANGEA to advance climate-smart agriculture, and better understand the impacts of climate change on crop productivity.

**International mailing address**

IITA Ltd, Suite 32  
5th floor, AMP House  
Dingwall Road  
Croydon  
CR0 2LX

**Headquarters**

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe  
Ibadan, Nigeria  
Tel: +1 201 6338094  
+234 700 800 4482  
Fax: +44 (208) 711 3786 (via UK)

Remote sensing is a particularly powerful tool in a region like Central Africa, where the vast majority of farmers are smallholders, many of whom live in relatively remote areas. Improved remote sensing capabilities, and in particular improved resolution that allows remote research on parcels of less than 1 ha, offer significant promise to improve our ability to understand and improve food production in the region. Improved resolution on multiple scales is also needed to understand the interrelation between smallholder farms and forest loss and to reliably track land use changes at scale in the region.

PANGEA initiative is led by the University of California, Los Angeles (UCLA) with which IITA has established an initiative named Congo Basin Institute (CBI) that aims to integrate the dual goals of biodiversity and forest conservation while improving local community livelihoods. Since 2015, CBI has developed various initiatives aiming at connecting agricultural improvement activities with biodiversity and forest conservation to achieve more efficient traits that will maintain yield under heterogeneous environments. The PANGEA initiative will then be a unique opportunity for this partnership to further produce an impact on the needs to feed the growing population while conserving forest cover and biodiversity in the Congo Basin region that harbors the second-largest rainforest in the world, representing 30% of the global forest area, and that faces accelerated degradation due to multiple pressures among which poorly practised agriculture alone contributes up to 84% of the forest cover loss.

If selected, we look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods in ways that align with these IITA efforts. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for improved food security, climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, IITA expects to use the resulting data and methodologies to inform our research to sustainably improve food security in Africa and to monitor the deployment of those technologies. Our team also plans to develop research proposals to seek funding to apply PANGEA's data and methodologies to improve food security in Central Africa.

We believe this is an important project with the potential for high impact. As the Deputy Director General, Partnership for Delivery of IITA, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to collaboratively pursue these common interests.

Yours Sincerely,

Signed by:

Dr. Kenton Dashiell

4C88BD4F06234C8...

Dr. Kenton Dashiell  
Deputy Director General Partnerships for Delivery

**“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”**

Pucallpa, 10 de setiembre de 2024

**CARTA No. 149-2024-MRA-PMRA**

Señores

**ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE AERONÁUTICA Y EL ESPACIO – NASA**

Presente. -

**ASUNTO: APOYO A LA INICIATIVA PANGEA**

Por medio de la presente, me complace dirigirme a ustedes a fin de saludar la posibilidad de impulsar la iniciativa PANGEA por parte de la NASA, la misma que permitiría realizar una campaña de investigación de campo de largo a nivel de la Amazonía.

En el Perú, los gobiernos subnacionales de la Amazonía hemos conformado la Mancomunidad Regional Amazónica – MRA y pertenecemos a la plataforma de los Gobernadores por el Clima y los Bosques – GCF Task Force (por sus siglas en inglés) que agrupa a 43 gobiernos subnacionales a nivel global, incluyendo a los gobiernos subnacionales de Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe de Ecuador; Caquetá en Colombia; Pando, Santa Cruz y Tarija de Bolivia; Maranhão, Amapá, Tocantins, Pará, Roraima, Mato Grosso, Amazonas, Rondonia y Acre de Brasil; y Amazonas, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Piura, San Martín y Ucayali del Perú.

Actualmente en mi calidad de Gobernador Regional de Ucayali en Perú, soy Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú, representando 7 gobiernos subnacionales peruanos y presido actualmente también la plataforma del GCF Task Force, representando a 43 gobiernos subnacionales, de los cuales 22 pertenecen a la Amazonía en 5 de los países amazónicos.

Los gobiernos subnacionales, especialmente los de la Amazonía somos conscientes de que los bosques tropicales están experimentando cambios climáticos dramáticos, se ha incrementado la pérdida de biodiversidad y hay cada vez mayor presión por cambios en el uso de la tierra, sin que contemos con las capacidades y la información necesaria para hacer frente a estos desafíos.

Los cambios en la dinámica del flujo de carbono, el ciclo del agua, los eventos climáticos extremos y las migraciones de las especies están generando cambios importantes que afectan la vida y la producción de alimentos, lo cual pone en riesgo la seguridad alimentaria de nuestras poblaciones, especialmente de pueblos indígenas que habitan nuestra Amazonía.

**“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”**

La Amazonía es reconocida en el mundo entero por ser megadiversa y por ello altamente vulnerable al cambio climático y aunque los ecosistemas de bosques tropicales están mostrando evidencia de respuestas de adaptación frente al mismo, no conocemos a profundidad que esta sucediendo y cómo podríamos contribuir con este proceso de forma más eficiente y urgente.

Consideramos que la iniciativa PANGEA nos serviría para impulsar mejoras continuas en la ciencia de la teledetección, la recopilación de datos y la aplicación de esta ciencia para mejorar la gobernanza forestal, la planificación territorial, los esfuerzos de comando y control, la lucha contra incendios, combate a las economías ilegales y otras acciones críticas en el territorio.

Estamos comprometidos con la iniciativa PANGEA para mejorar la comprensión a través de sus tres pilares:

- *Utilizando la ciencia para avanzar en la comprensión de cómo las regiones de bosques tropicales responderán de manera diferente al cambio global.*
- *Desarrollando capacidades en nuestros científicos de las regiones amazónicas para que puedan liderar estos esfuerzos científicos.*
- *Actuando con mejores capacidades de teledetección satelital para mapear y monitorear el carbono, la biodiversidad y la agricultura.*

Esperamos que la NASA tenga a bien seleccionar la iniciativa PANGEA y esperamos poder contribuir desde nuestros gobiernos subnacionales en el trabajo de campo que pueda ser realizado, estamos seguros de que la recopilación de datos de sensores remotos aéreos, el uso de sensores remotos satelitales y modelos para comprender mejor la dinámica de los bosques tropicales contribuirán a una mejor gestión de los bosques brindándonos evidencia científica para tomar mejores decisiones de política pública.

Atentamente,



Manuel Gambini Rupay  
Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú  
Presidente del Grupo de Gobernadores por el Clima y los Bosques

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

15.11.2024

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter indicates my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). PANGEA will significantly advance the science and data to understand and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. Combined with land use change mapping initiatives such as the ones produced by the MapBiomass Network, this may be a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use.

I see a lot of potential for synergies with lots of positive feedback when MapBiomass and PANGEA spreads across Latina America, Congo Basin and Southeast Asia. It is especially important for ensuring local capacity across the board to generate timely, accurate and relevant information about the tropics.

I look forward to the collaboration and generation of lots of fruits!

Sincerely,  


Tasso Azevedo  
General Coordinator  
MapBiomass Network



**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly enhance/advance/benefit several NASA Harvest-led initiatives including: agricultural climate risk assessments, environmental health research, agricultural insurance for sustainable farming transitions, and climate finance frameworks.

NASA Harvest is NASA's Global Food Security & Agriculture program, established in 2017, and led and implemented by the University of Maryland, College Park. Harvest is committed to advancing Earth observations for agricultural decision-making and food security. Our network of over 45 leaders in agriculture and Earth observation works across public, private, NGO, and humanitarian sectors. Our team pursues objectives that include improving crop yield forecasting, enhancing early warning systems for food security, and advancing satellite-based agricultural monitoring through active projects in Africa, Southeast Asia, and Latin America.

Several of PANGEA's objectives directly align with NASA Harvest's priorities, particularly in mapping and monitoring agricultural expansion and intensification in tropical forest regions, advancing methods to track carbon stocks and fluxes in agricultural-forest landscapes, improving crop type, yield, and condition monitoring capabilities using new satellite sensors, and supporting agricultural adaptation to climate change through enhanced monitoring.

NASA Harvest can provide valuable support through our ground validation data from agricultural monitoring sites, local logistics and community engagement through regional partners, technical expertise in agricultural remote sensing and machine learning, and access to our global network of food security stakeholders. The integration of PANGEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics.

The integration of PANGEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics. As NASA Harvest's Director, I enthusiastically support PANGEA and believe it will significantly advance our shared goals of sustainable agriculture and food security.





We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director at NASA Harvest, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared food security and climate mitigation and adaptation goals.

Sincerely,

Inbal Becker-Reshef  
NASA Harvest, Director  
University of Maryland  
2181 Lefrak Hall, College Park, MD 20742



[www.nasaharvest.org](http://www.nasaharvest.org)



Professor Elsa Ordway  
618 Charles E. Young Drive S.  
Los Angeles, CA 90095

21<sup>h</sup> November, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are pleased to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, the PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA has the potential to significantly advance our understanding of tropical forest resilience, climate impacts, and biodiversity conservation, with Gabon serving as a pivotal region, as led by the Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST).

Established in 1976, CENAREST is Gabon's national center for scientific and technological research, committed to fostering innovative research for sustainable resource management and poverty reduction. Gabon, known for its high carbon storage and low forest degradation within the Congo Basin, offers an exceptional environment for these efforts. CENAREST's work focuses on understanding the impacts of land use and climate change on biodiversity, ecosystem services, and the socio-economic aspects of conservation. CENAREST collaborates extensively on tropical ecology and global environmental change through active partnerships with regional and international organizations across the Congo Basin.

PANGEA's objectives align closely with CENAREST's mission, particularly in the integration of satellite data with ground and airborne measurements. These tools are critical for improving predictions of tropical forest responses to climate and land-use

changes, enabling the development of robust, science-based strategies for mitigation and adaptation. We are excited about PANGEA's emphasis on Earth observation technologies and its multidisciplinary approach to studying tropical forests, peatlands, and wetlands, which are essential for addressing complex ecological challenges.

CENAREST actively partners with key Gabonese institutions, such as the Agence Nationale des Parcs Nationaux (ANPN), the Agence d'Etude et d'Observation Spatiale (AGEOS), the National Climate Council (CNC), and the Gabonese Ministry of Water and Forests. These established partnerships, combined with our in-depth regional expertise, position CENAREST to provide robust local support for PANGEA's implementation in Gabon. If PANGEA is selected, CENAREST is prepared to offer in-kind support, including data sharing, assistance with local logistics, facilitation of research permits, and community engagement. Furthermore, we are committed to exploring funding opportunities to actively contribute to PANGEA's research and application activities.

We are confident that PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities will complement and enhance our own efforts, including improved carbon stock assessments, deeper understanding of land-use changes, and strengthened biodiversity conservation strategies.

As Commissaire General (Executive Director) of CENAREST and African Senior scientist on tropical and global ecology, I strongly believe that PANGEA represents an exceptional opportunity to tackle some of the most pressing global challenges. We are proud to offer our full support for this groundbreaking campaign and are optimistic that NASA's endorsement will help bring this valuable partnership to fruition, furthering our shared objectives of climate mitigation and biodiversity conservation.

Sincerely yours,





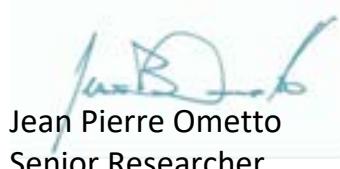
São José dos Campos, November 11, 2024

## PANGEA letter of support

To whom it may concern:

The Strategic Projects Division of the National Institute for Space Research is pleased to support the PANGEA proposal. I foresee that the innovative approach in PANGEA will help to advance the understanding of the critical role that tropical forests play in the global climate, ecosystem services and relevance to local communities. Several projects developed by the Brazilian scientific community (e.g., LBA, ATTO, AMAZONFACE, ADAPTABRASIL, to name a few) are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The team of scientists linked to the Strategic Project and the Impact, Adaptation and Vulnerability Divisions (where I also work) are eager to fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with its critical scientific agenda.

  
Jean Pierre Ometto  
Senior Researcher  
Head of the Strategic Project Division



**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly contribute to enhance relevant initiatives currently carried out by the National Observatory on Climate Change for Cameroon (ONACC).

ONACC is a State autonomous Scientific and Technical Institution created by a Presidential Decree and placed under the Technical supervisory authority of the Cameroon Ministry of Environment. ONACC has as main mission to monitor and assess the socioeconomic and environmental impacts of climate change and to propose prevention, mitigation and/or adaptation measures to fight the adverse effects and risks associated with these changes. To this end, it shall in particular:

- define relevant climate indicators for monitoring the environmental policy;
- conduct prospective studies to propose a vision on the evolution of climate in the short, medium and long terms;
- monitor the evolution of climate, provide weather and climate data/information to all sectors of human activity concerned and produce the annual climate report for Cameroon;
- initiate and promote studies on the identification of indicators, impacts and risks related to climate change;
- collect, analyze and make available to policy makers, private as well as various national and international organizations, reference information on climate change in Cameroon.
- initiate activities to promote awareness and information on the prevention of climate change;
- serve as operational tool to all other activities aimed at reducing greenhouse gases;
- carry out greenhouse inventories and produce annual Carbon balance of all socioeconomic development sectors;
- propose to the Government preventive measures for the reduction of greenhouse gas emissions, as well as mitigation and/or adaptation to the adverse effects and risks associated with climate change;
- serve as an instrument of cooperation with other regional or international observatories operating in the climate sector;

ONACC's primary focus is on several key action areas: the production of robust and precise climate services and forecasting, vulnerability studies, assessment of the economic cost of climate variability on the one hand and on the other, GHG emission inventory and production of annual carbon balance of the various socioeconomic development sectors including but not limited to agriculture, forestry and other land-uses. ONACC uses GIS and remote sensing tools to monitor forest cover change (losses and gains). She also uses climate modelling for forecasting weather and climate dynamics.

It is important to state here that PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ONACC. We are eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, wetlands and agricultural systems.

ONACC currently works on specific domains such as assessing the economic costs of climate change in the agricultural sector, disaster risk prediction and monitoring, and supporting farmers in climate adaptation efforts with partners including FAO, WFP, FIDA, GIZ, WWF, IUCN, ACF, USFS. Our shared expertise and ONACC's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation in Cameroon and the Central African Sub region.

If PANGEA is selected, ONACC can provide in-kind support through local logistics, regionally relevant translation of science to action, and coordination with government ministries. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and application activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as desired collaboration to enhance fire risk monitoring capabilities and develop fire monitoring tools to guide farmer land-use practices to support low-emissions agriculture, improve local and regional weather and climate predictions and improve local and regional early warning systems, and assess the economic cost of extreme weather events in the various socioeconomic development sectors.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director General at ONACC, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals, with a particular emphasis on resilient and sustainable development based on scientific evidence and local knowledge.

Prof. AMOUGOU Joseph Armathé  
Director General  
National Observatory on Climate Change, Cameroon  
Email: [info@onacc.cm](mailto:info@onacc.cm), [josepharmathe@yahoo.fr](mailto:josepharmathe@yahoo.fr)  
Website: [www.onacc.cm](http://www.onacc.cm)  
App. onacc.alerte downloadable from Google playstore





# BERKELEY LAB

CLIMATE AND ECOSYSTEM  
SCIENCES DIVISION

---

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter confirms our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). Should the proposed field campaign be selected, PANGEA will provide critical data on the dynamics of tropical forests across the tropics, train a new generation of scientists domestically and internationally, and foster collaborative international research that will help advance pressing scientific needs on the future of tropical forests under global change. Importantly, PANGEA will be synergistic to the Next Generation Ecosystem Experiments (NGEE-Tropics) activities led and carried out by Lawrence Berkeley National Lab and our partner institutions.

NGEE-Tropics is a long-term, multi-institutional project that has been supported by the Department of Energy since 2015 (<https://ngee-tropics.lbl.gov>). NGEE-Tropics aims at development and testing of a process-rich ecosystem model that can be used to project the future of tropical forests under global change. To this end, we currently are developing and testing the ELM-FATES model, which represents plant demography and a broad set of tropical forest processes, as well as field activities to measure plant physiology, forest demography, soil hydrology and biogeochemistry, and ecosystem carbon and water cycling, at multiple field sites, including in Panama, Brazil, and Malaysia.

There are multiple highly aligned goals between NGEE-Tropics and PANGEA, as both projects

**Lawrence Berkeley National Laboratory**

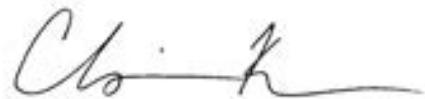
---

One Cyclotron Road / Berkeley, California 94720 / phone 510-486-4000

aim to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. For example, both projects seek to understand the processes that govern forest carbon and water cycling, and growth and mortality dynamics of tropical forest trees. We also share the same vision on integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests. There are also key areas of complementarity between the projects, for example PANGEA's focus on African tropical forests, which NGEE-Tropics was not able to investigate as fully as forests in the Americas and Asia.

If PANGEA is selected, our team will also seek opportunities for direct collaboration with PANGEA, for example, through the development of proposals for funding opportunities aligned with PANGEA's goals.

PANGEA is a much-needed project that has the potential to greatly expand the scientific knowledge of critical yet under-studied ecosystems. Being the lead PI of NGEE-Tropics, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with NGEE-Tropics.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Charlie Koven".

Charlie Koven  
Senior Scientist  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Lawrence Berkeley National Lab



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of the One Forest Vision Initiative (OFVi) to express our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce international scientific cooperation and data collection activities led and carried out by OFVi.

OFVi is a scientific initiative that was initiated in 2023 in France by the coalition of 6 French research institutions: CEA, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD and MNHN, (for further details, please refer to our website: <https://www.oneforestvision.org/eng>). Our goal is to provide scientific support to countries within tropical basins with a specific focus on preserving their environmental integrity, particularly regarding the biodiversity and carbon stocks contained in tropical forests and wetlands. To achieve our objectives, we currently (i) increase and disseminate scientific knowledge on biodiversity and carbon; (ii) strengthen the skills and autonomy of researchers and managers in the Congo Basin; (iii) develop and disseminate biodiversity and carbon monitoring tools in the Congo Basin, more specifically in Congo, DRC and Gabon.

We see several aligned efforts and general aims between One Forest Vision and PANGEA, in particular in the measurement and monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue scientific activities and collaboration with local institutions from Congo, DRC, Gabon, Cameroon and Uganda. We are conducting field activities in 8 “super-sites” in these countries (link to the super-sites map : <https://www.oneforestvision.org/eng/scientific-productions/pillar-1>). These locations may be of strategic importance to PANGEA because of their habitat type and long-term data. Members of One Forest Vision have been working in some of these locations for years and can facilitate PANGEA’s implementation by helping with local expertise and the access to crucial data.

Should PANGEA be funded, One Forest Vision can provide aligned activities in the form of workshop and event expenses. While our initiative aims to assess the state of animal biodiversity in relation to plant biodiversity and the structure and functioning of the forest habitat ; to develop new approaches to enable multi-year monitoring at high spatial resolution of the structure, above-ground biomass and functional composition of tropical forests ; to build capacity building for local researchers and managers in the Congo Basin, we seek to ensure our activities are synchronized and complementary to other similar efforts carried out in the region. We already participate to monthly meetings with the PANGEA scoping team and the ongoing Congo Basin Science Initiative team.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact. As co-coordinators at One Forest Vision initiative, we express our utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA’s support of PANGEA will enable us to pursue this common activity.

The 24th September 2024:



**Jean-François Soussana**  
*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*  
Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)  
147 rue de l'Université, 75338 Paris, France



**Laurent Durieux**  
*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*  
Institut national de Recherche pour le Développement (IRD)  
44 boulevard de Dunkerque 13572 Marseille, France



**Alain Billand**  
*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*  
Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)  
42, rue Scheffer, 75116 Paris France



Dr. Elsa Ordway  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles  
410K Botany Building, Los Angeles, CA, 90095

**Department of Meteorology  
and Atmospheric Science**  
The Pennsylvania State University  
502 Walker Building  
University Park, PA 16802

814-865-0478  
meteodept@meteo.psu.edu  
met.psu.edu

Re: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We thank you for your leadership in developing the science plan of the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. We, the undersigned at The Pennsylvania State University, enthusiastically support the PANGEA program as it calls for novel and urgently needed research to advance the current understanding of the structure and function of the iconic tropical rainforests, which are undergoing major degradation in response to the influences of a rapidly changing global climate and land use changes.

Penn State University has several academic units and research groups, which have active interdisciplinary research programs related to the processes and activities that PANGEA will address over the next few years. In addition, we have strong graduate programs in Ecology, Ecosystem Science and Management, and Geography that grant Master of Science and Doctoral degrees. The academic program in Climate Science provides outstanding academic training in emerging research areas such as numerical modeling, data assimilation, machine learning, and artificial intelligence. At Penn State University, one key strength of academic training and research activities relates to climate change investigations and climate solutions, as evidenced by the Earth and Environmental Systems Institute, the Institute of Energy and Environment, and our new Penn State Climate Consortium ([climate.psu.edu](http://climate.psu.edu)). Our pioneering strategies of engaging traditionally underrepresented groups in science and engineering will advance the community engagement component of the PANGEA initiative.

We wish to contribute to PANGEA's goals to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. New findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems and the people that depend upon them. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research and academic priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and generate multidisciplinary data sets and methods to conduct ecological research. We are particularly excited to engage with diverse partners, including Indigenous communities, throughout the Tropics such that we can develop and advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, at Penn State University, we can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of research infrastructure such as laboratories equipped with contemporary technologies, and climate and ecological numerical models, and academic tuition or stipend support, commensurate with our university commitment to supporting graduate and undergraduate education. In addition, the Penn State University team will develop research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies. Our research proposals would draw from our current research interests and expertise that are closely related to PANGEA science questions: **"How do ongoing and projected changing climate impacts influence the resilience of the tropical carbon sink?"** and **"How does the weakening of the carbon sink influence additional feedbacks on the Earth's climate?"**

Our interest in PANGEA stems from previous experiences and partnerships that we have pursued in the Amazon rainforest. We have established long-term collaborations with diverse colleagues from academic institutions and government agencies in South America. Such partners will participate in PANGEA-related activities and play key roles in developing new research aimed at addressing regional and national land management practices. The Amazon rainforest plays critical roles not only in terms of water and carbon cycling but also in influencing the Earth's climate. Therefore, the Amazon is a strategic region to be investigated as part of the PANGEA initiative. Given our previous research in the Amazon during the last two decades, we can help facilitate PANGEA's implementation by assisting with ground-validation studies, numerical modeling, and community engagement. We will contribute analysis tools that identify causal feedback processes related to water and carbon cycling that lead to improved understanding of the nonlinear processes within the climate dynamics. In that context, one specific goal is to develop process-based numerical models to estimate the magnitude of feedbacks that can then be employed to perform targeted ground-based observations and thus enhance the fidelity of the data collection process. Our expertise with Earth System Modeling will be critical for identifying pathways that will inform ways to collect observational data that can inform causal inference estimates of tropical forest structure and function, and provide validation of remote sensing information. Our research community has existing and growing research interests working directly with Indigenous communities in the tropics, including in tropical South America and Africa. This work engages directly on issues related to climate resilience, socio-ecological systems, and Indigenous knowledge systems, providing ample opportunities for bridging Earth system modeling through a co-design framework.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), data sets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. PANGEA will certainly provide the unique venue to achieve a common set of novel research hypotheses that would create needed knowledge of tropical forest systems in a rapidly changing environment. We, therefore, are enthusiastic to join in the pursuit of new research endeavors under the auspices of PANGEA.

Sincerely,



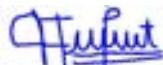
Erica Smithwick

Distinguished Professor of Geography, Walker Building, 302 North Burrowes Street, University Park, PA 16802; Director, Earth and Environmental Systems Institute; Associate Director, Institute of Energy and the Environment; The Pennsylvania State University, University Park, PA USA; Email: [smithwick@psu.edu](mailto:smithwick@psu.edu)



Chris E Forest

Professor of Climate Dynamics, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 507 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: [ceforest@psu.edu](mailto:ceforest@psu.edu)



Jose D Fuentes

Professor of Atmosphere Science, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 508 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: [jdfuentes@psu.edu](mailto:jdfuentes@psu.edu)



Dr. Elsa Ordway  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles

10 December 2024

Dear Dr. Ordway,

Planet Labs expresses its strong support for the UCLA-led proposal entitled *The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA) and the diverse coalition the initiative has brought together and continues to build. Planet believes that, if granted, the proposal has the potential to use space to help life on Earth by building understanding of the variation between and within Earth's two largest tropical forests in the Americas and Central Africa as they face rapid and large-scale climate and land-use changes that are already underway.

In addition, Planet believes that PANGEA, drawing on Planet's Earth observation data and analytics, can help make change visible, accessible, and actionable in accordance with Planet's mission. This mission aligns with PANGEA's well-established aim to establish patterns of recent and ongoing change in tropical forest landscape states, dynamics, and feedbacks; delineate the processes control heterogeneity in the vulnerability of tropical forest landscapes to structural and functional change; and the integration of space-based and in situ data to assess functional diversity, canopy foliar traits, carbon stocks, vertical structure of ecosystems, and other key characteristics in these regions.

Planet constantly evaluates new capabilities and providers developing new satellite products and services. For the reasons set forth above, in the event the proposal is selected for award, Planet is prepared to offer its support to PANGEA, subject to a more formal agreement.

Yours sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Amy Rosenthal".

**Amy Rosenthal, Senior Global Director, Conservation Initiatives**  
Planet Labs PBC

**Boston University**

Department of Earth and Environment  
685 Commonwealth Ave, Rm 130  
Boston, MA 02215



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance the measurement and modeling of tropical ecosystem processes, biogeochemistry, and greenhouse gas dynamics and their interactions with climate and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with the model-data fusion activities conducted by the PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer) project.

PEcAn is a community cyberinfrastructure project that has been supported by a wide range of funding agencies (NASA, NSF, DOE, DoD SERDP, ARPA-E) and tech partners (Google, Amazon, Red Hat) since 2009 (<https://pecanproject.org/>). PEcAn's vision is to see ecosystem science, policy, and management informed by the best available data and models. We aim to achieve this through our mission to develop and promote open, accessible tools for reproducible ecosystem modeling and forecasting. This includes interoperable support for running >20 land models and analyzing them through a wide range of tools for data ingest, uncertainty propagation and partitioning, model calibration, validation, visualization, and iterative data assimilation. In particular, PEcAn is currently focused on developing continental-scale carbon cycle reanalysis products that fuse numerous bottom-up and remotely-sensed data constraints

with process-based models to produce harmonized carbon budgets with sophisticated uncertainty accounting across space, time, and pools/fluxes. We are working with a number of international, federal, and state agencies to integrate these products into carbon inventories, with an aim to expand to a global scale over the next few years.

PEcAn and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and PEcAn are focused on uncertainty quantification, field campaigns inspired by modeling needs and uncertainties, and better connecting science to policy, management, and decision making (e.g., national C inventories, REDD, voluntary markets). Likewise, PEcAn is deeply interested in integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the PEcAn group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals, and will make PEcAn tools and training available to PANGEA scientists, including but not limited to working to add additional PANGEA-prioritized models to PEcAn and extending existing workflows to PANGEA sites and regional domains.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the PEcAn project lead, I confirm our utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between PEcAn and PANGEA.

Sincerely,



Michael C. Dietze  
Professor, Boston University  
PEcAn project lead  
Director, Ecological Forecasting Initiative

**Letter of support to the PANGEA research project lead by Elsa Ordway**

I am writing to offer my strong support for the research project PANGEA that aims to explore how climate change and land-use changes are influencing the vulnerability and resilience of tropical rainforests, particularly those in Central Africa and the Amazon, and explores the degree to which these rainforests are impacted in similar or divergent ways. By examining both regions in tandem, this study has the potential to provide invaluable insights into how different rainforest ecosystems respond to similar climate and land use stressors and to identify the unique challenges each region faces.

The comparative nature of the research will offer new perspectives on the resilience of these ecosystems and inform conservation strategies that are tailored to the specific needs of each region. Furthermore, the findings could provide important guidance for policymakers and conservation organizations working to mitigate the impacts of climate change on biodiversity and forest health.

The research methodology outlined in the white paper demonstrates a robust approach to understanding the complex interactions between climate change and rainforest ecosystems. The project's interdisciplinary approach promises to yield results that are scientifically sound and of practical importance to global environmental sustainability efforts.

Sincerely,



Tørris Jæger  
Secretary General



November 4, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, California 90095  
USA

Dear Dr. Elsa Ordway:

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

This letter is to provide my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If this field campaign is selected, it will provide critical measurements needed for advancing understanding of Earth's largest store of living carbon and will inform the scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests required for constraining Earth system models and projecting impacts and feedbacks of climate change. The goals and deliverables of PANGEA are well aligned with the simulation and analysis of global biogeochemical cycles conducted in the Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area.

RUBISCO is a project supported by the US Department of Energy that investigates terrestrial and marine biogeochemical cycles by combining observations and models to understand feedbacks of climate change. One of the key products emerging from the project is the open source International Land Model Benchmarking (ILAMB) package, which assesses the fidelity of land carbon cycle models through comparison with best-available observations. PANGEA shares strong synergy with the RUBISCO project for the incorporation of new multi-scale reference (observational) data sets into ILAMB and the creation of new tropical ecosystem-relevant metrics for evaluating mechanistic models of tropical forests.

Should PANGEA be funded, the RUBISCO project team will collaborate directly with PANGEA on constraining models of tropical ecosystems and will seek collaborative funding opportunities to propose additional projects that are synergistic with PANGEA's main goals.

PANGEA has a unique potential to significantly advance understanding and reducing uncertainties on the impacts of global change on tropical forests. Therefore, as the Laboratory Research Manager, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable multiple collaboration opportunities with the RUBISCO project.

Dr. Elsa Ordway

Page 2

November 4, 2024

If I can provide any additional information in support of PANGEA and potential collaborations with the RUBISCO SFA, please contact my at your earliest convenience.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Forrest Hoffman". The signature is fluid and cursive, with a small decorative flourish at the top left.

Forrest M. Hoffman

Distinguished Computational Earth System Scientist

Group Leader, ORNL Integrated Computational Earth Sciences (ICES) Group

Laboratory Research Manager, Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions  
through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area

Le directeur du département ECOBIO

Montpellier, le 5 décembre 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of IRD, the French Institute for Sustainable Development, to express our support to project PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation) submitted to NASA Terrestrial Ecology Field Campaign. If selected, this project will complement the efforts of IRD teams and researchers to collect critical data, develop methods and applications, and build capacities for the monitoring, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities.

PANGEA will more specifically complement IRD research efforts in the Congo Basin forests, where we support for years international scientific cooperation. We see several aligned efforts and general aims between IRD research programs and PANGEA, in particular with activities conducted by our Laboratoire Mixte International DycoFac (Dynamics of Continental Ecosystems in Central Africa (<https://www.lmi-dycofac.org/>), which contributes, with local partners, to the monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the topics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact and we express our utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common activity.

Jean-Christophe AVARRE



**Directeur du département ECOBIO**



Kinshasa November, 22, 2024

N/Réf : OSFAC-HQ/22112024

**Dr. Elsa Ordway**

Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles  
410K Botany Building, Los Angeles, CA. 90095

**Concern**: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr Elsa Ordway,

We are delighted to know that you are submitting a proposal for the implementation of a major international project called "*The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)*" which will address several themes. This excellent initiative will provide a lot of scientific knowledge on tropical ecosystems.

The objectives of PANGEA are in line with the vision of the Satellite Observatory of Forests of Central Africa (OSFAC) which is a Non-Governmental Organization (NGO) with a regional vocation and also representative in Central Africa of the international network Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD). Indeed, OSFAC's vision is that Central Africa has reliable and relevant data to guide decision-making. With this in mind, OSFAC and its partners in Africa and Northern countries work to provide users and decision-makers with reliable and regularly updated information. This information relates to the state of forests, their dynamics (extent of forest cover, deforestation,



degradation, forest fires, restoration of forest landscapes, etc.), the drivers that guide this dynamic, the quantification of biomass, carbon and greenhouse gas emissions, climate change etc.

We are confident that the implementation of the PANGEA Project will be a good opportunity to better understand the composition and functioning of tropical ecosystems, as well as the immense role they play in the living conditions of populations but also on several questions of interest the world today, among other things, climate change. In addition, considering all the teams that could participate in this project, PANGEA will be a place for multicultural meetings, a laboratory of ideas and proposals for innovative solutions.

The methods, tools (satellites, drones, planes) and data (in-situ, optics, Radar, Lidar, etc.) that the PANGEA Project plans to use will make it possible to generate results that will be used to resolve a large part of the environmental problems of the tropical world and contribute to improving the well-being of populations in this region.

It is for this reason that the Satellite Observatory of Central African Forests (OSFAC) of which I am the Director fully supports the PANGEA Project and wishes its funding.

Sincerely,

**DIRECTOR OF OSFAC**



Dr. Landing MANE

---

# SPUN | SOCIETY FOR THE PROTECTION OF UNDERGROUND NETWORKS

Society for the Protection of Underground Networks  
3500 South DuPont Highway, Suite E1-101  
Dover, DE 19901

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

6, September, 2024

## **RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The Society for the Protection of Underground Networks (SPUN) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

SPUN is a scientific research NGO that was established in 2021 ([www.spun.earth](http://www.spun.earth)) with a mission is to map, protect, and harness the mycorrhizal fungal networks that regulate Earth's climate and ecosystems. Mycorrhizal fungi form root symbioses with more than 90% of all plant species, creating underground networks that draw down carbon and provide essential nutrients to plants. These fungi help soil ecosystems store 75% of all terrestrial carbon, but mycorrhizal fungi are overlooked in Natural Climate Solution (NCS) goals. SPUN is developing high-resolution global and regional datasets of mycorrhizal fungal diversity and functioning to advocate for their protection and inclusion in NCS strategies.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities of pinpointing degraded ecosystems with underperforming fungal networks and identifying keystone mycorrhizal species associated with the recovery of threatened ecosystems. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, SPUN can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of SPUN's research infrastructure (e.g., computation resources for fungal bioinformatics, ecological modeling, and geospatial analysis), staff time, and relevant travel costs related to two of SPUN's ongoing project areas:

1) integrating remote sensing tools with *in-situ* mycorrhizal fungal measurements and 2) SPUN's Underground Explorers Grant program. These projects are closely related to PANGEA Science Question 1 (*Examine similarities and differences in forest composition, structure and biogeochemical cycling across tropical regions*), and PANGEA broader impact goals of advancing scientific capacity for researchers in the Global South.

Monitoring changes in mycorrhizal biodiversity is time and resource intensive with on-the-ground measurements. We need a dynamic way to estimate underground network responses in real-time, at scale. Remote sensing technologies offer the ability to observe plant biodiversity and ecosystem functioning with high spatial and temporal resolution, but so far its applications are limited to aboveground ecosystems. SPUN has partnered with Caltech and the 11th Hour Project at the University Chicago Data Science Institute to explore whether remote sensing data can be used to detect changes in mycorrhizal fungal diversity and abundance. Our goal is to identify mycorrhizal signatures in the immense volume of remotely-sensed spectral data from US [National Ecological Observatory Network](#) sites. However, these data do not cover tropical forests or tropical mycorrhizal fungi, meaning that any spectral biology models we develop to estimate mycorrhizal fungi will be incomplete and likely unapplicable for tropical systems. Working with PANGEA, SPUN will leverage our capacity to generate extensive *in-situ* mycorrhizal fungal data paired with the specific flight campaigns of this tropical focused NASA Terrestrial Ecology program. These novel datasets will 1) provide critical insights for understanding the role of mycorrhizal fungi in shaping biogeochemical variation across different tropical forest regions, and 2) expand the range of habitat types represented in our paired spectral-fungal dataset to remotely sensing mycorrhizal symbioses in all forest types.

SPUN has developed efficient data protocols and analysis pipelines for generating precise mycorrhizal fungal data in difficult-to-access regions of the world, including tropical forests in Colombia and Ghana. Our organization excels at community building, with a global network of 415+ Science Associates from more than 79 countries. Additionally, we have awarded a total of 92 Underground Explorer grants to an exceptional cohort of soil fungal researchers from 43 countries. Notably, 83% of these grants have been allocated to scientists based in the Global South. Our Underground Explorers are now conducting soil sampling across every continent, focusing on some of the world's most under-explored ecosystems. To maximize the impact of their research, we provide each Explorer with comprehensive technical and communications support. For specific locations in South America, Africa, Southeast Asia, SPUN can leverage our network of local researchers to engage and coordinate research activities with PANGEA to explore using satellite imagery to improve fungal biodiversity monitoring and belowground carbon accounting in tropical forest ecosystems.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

---

**SPUN** | SOCIETY FOR THE PROTECTION  
OF UNDERGROUND NETWORKS



Dr. E. Toby Kiers  
Professor, Faculty of Science, Ecology & Evolution, Vrije Universiteit Amsterdam  
Executive Director & Chief Scientist, Society for the Protection of Underground Networks



Dr. Michael Van Nuland  
Lead Data Scientist, Society for the Protection of Underground Networks



Dr Elsa Ordway  
Ecology & Evolutionary Biology  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA  
90095, USA

26 August 2024

Dear Dr Ordway

**Re: Support for NASA Research Opportunities in Space and Earth Sciences (ROSES) programme PANGEA – PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation**

I am writing to offer the UK Centre for Ecology & Hydrology's (UKCEH) support for the proposed PANGEA project. We understand that PANGEA will link remote sensing data with on-the-ground measurements in tropical forests across the globe, to answer questions on tropical forest biodiversity, functioning, carbon stocks and sequestration, and how these will be affected by climate and land use change in the future. Answering these questions will lead to fundamental understanding that is crucial to mitigating climate change and enabling successful conservation and restoration of tropical forests.

UKCEH is an independent, not-for-profit research institute and the UK's leading institute for the terrestrial and freshwater sciences. We have a global impact, producing cutting edge scientific discoveries and contributing to understanding and monitoring the environment of our planet. We deliver these through valuable partnerships, using state of the art research facilities, managing interdisciplinary projects and comprehensive monitoring programs supported by 500 expert scientists.

Here at UKCEH we have a long history of collaborations in tropical forest ecology across Latin America, West and East Sub-Saharan Africa and Southeast Asia. My colleagues Dr Jill Thompson, Dr Lindsay Banin and others, are deeply embedded in long-term tropical research sites that could be focal landscapes for PANGEA, or provide complementary, contextual information. Our research questions in the tropics focus around climate change and greenhouse gases, forest functioning, plant community change, plant-animal interactions, land-use change and biogeochemical fluxes, social-ecological interactions, forest recovery and restoration. We also



UK Centre for  
Ecology & Hydrology

UK Centre for Ecology & Hydrology  
Maclean Building, Benson Lane  
Crowmarsh Gifford, Wallingford  
Oxfordshire  
OX10 8BB  
UK

T: +44 (0)1491 838800

process remotely sensed data from a variety of sources and have foundational skills in data management, analysis and synthesis.

The PANGEA proposal could provide a unique opportunity to link remotely-sensed data at various scales with ground-based data that UKCEH could effectively contribute to. UKCEH could provide information and connections with international organizations to assist in site selection for PANGEA activities. We would be keen to seek independent and joint funding with PANGEA members to enable collaborative research between UKCEH and PANGEA to promote our scientific endeavours.

Yours sincerely

**Prof Harry Dixon**  
**Associate Director of International Research and Development**  
Email: [harr@ceh.ac.uk](mailto:harr@ceh.ac.uk)



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical knowledge gaps on the impact of climate change on tropical forests such as the Congo Basin. PANGEA's work will make an important contribution to the activities led and carried out by the Science Panel for the Congo Basin, convened by the United Nations Sustainable Development Solutions Network.

The [Science Panel for the Congo Basin](#) (SPCB) was established in 2023 at COP28, in Dubai, as an independent platform for scientists from the region to synthesize the existing knowledge including Indigenous peoples and autochthonous knowledge on the functioning of, and threats to, the Congo Basin and its ecosystems. The Panel was inspired by the successful Science Panel for the Amazon (SPA). It collaborates with SPA along with the newly formed Science Panel for Borneo (SPB) to facilitate scientific communication across the three tropical forest ecosystems. SPCB is currently engaged in developing its first assessment report to present at COP30, in Belém.

We see several aligned efforts and general aims between the Science Panel for the Congo Basin and PANGEA, in assessing the impact of anthropogenic activities on tropical forest ecosystem health and resilience. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our Panel excels at analyzing the current body of knowledge on the Congo Basin, we require a strong basis of existing information. PANGEA's efforts to expand knowledge on the impact of climate change in tropical forests will contribute to achieve our aim.



We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Strategic Coordinator for the SPCB, I express my strong support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue the common goal to bring the status of the Congo Basin to the global forefront.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Emma Torres".

Emma Torres  
Head of the New York Office and Vice President of the Americas  
Strategic Coordinator of the Science Panel for the Congo Basin  
United Nations Sustainable Development Solutions Network



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO  
VICERRECTORADO INVESTIGACION**

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Dra. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANtropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA)**

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANtropical de biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA). La Oficina del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno está encantada de apoyar el programa PANGEA cuando se confirme la financiación de la NASA.

La Universidad Nacional del Altiplano, Puno, una universidad pública fundada el 29 de Agosto de 1856 en la Ciudad de Puno, Perú con la misión de desarrollar y transmitir el conocimiento científico, tecnológico y humanístico, formando profesionales y posgraduados calificados y competitivos, impulsando el desarrollo de la investigación y la responsabilidad social, la práctica de valores y la identidad cultural, orientadas al estudiante y la sociedad, con miras a contribuir al desarrollo sostenible de la región y del país.

El objetivo de PANGEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGEA, la UNAP proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNAP con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiación para apoyar la participación en estudios relacionados con PANGEA.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**VICERRECTORADO INVESTIGACION**

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de Puno, Carabaya, San Gabán, Sandía que se alinean a los objetivos de PANGEA. La UNAP en alianza con la Universidad de Oklahoma también facilitará alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGEA lleve a cabo.

La UNAP apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Puno, donde los efectos del cambio climático afectan a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el suroeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGEA por ser la región que en la última década ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Puno, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para la siguiente generación de científicos formados en Puno. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías de NASA y aprovechar las imágenes satelitales por ejemplo para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos, métodos de investigación (por ejemplo, modelos numéricos), conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra organización. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,

  
Dr. Angel Rogelio Velasco Cárdenas  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
UNA - PUNO

## Universidad Nacional del Altiplano UNAP Letter of Support – English Translation

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

### **Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the office of the Vice President for Research of the [Universidad Nacional del Altiplano](#), Puno (UNAP) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNAP It is a public university founded on August 29, 1856 in the city of Puno, Peru with the mission of developing and transmitting scientific, technological and humanistic knowledge, training qualified and competitive professionals and graduates, promoting the development of research and social responsibility, the practice of values and cultural identity, oriented to the student and society, with a view to contributing to the sustainable development of the region and the country.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNAP can provide the use of our university experimental stations and support for field work in the rainforest and Andean region. Similarly, we will involve our research faculty experts on the area. UNAP and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonic and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. UNAP and OU will also facilitate alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planned research.

UNAP supports this initiative focused on the Southern Amazon region of Peru where the effects of climate change effects severely the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the southwest Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most with massive deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region in Puno. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Ariel Velasco Cardenas  
Vice Rector de Investigación  
Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Peru



## Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Chachapoyas, 3 de octubre del 2024

### **CARTA N° 065-2024-UNTRM-R**

**Dra. Elsa Ordway**

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles

410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

#### **Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANtropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA)**

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANtropical de Biogeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA). En nombre de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Amazonas (UNTRM) deseo expresar nuestro apoyo al programa PANGEA, una vez se confirme el financiamiento de la NASA.

La UNTRM es una universidad pública creada el 18 de setiembre del 2000 en la Ciudad de Chachapoyas, Perú, con la visión ser líder y referente nacional e internacional en formación académica, investigación científica, tecnológica y humanista de calidad que contribuya al desarrollo de la sociedad.

El objetivo de PANGEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGEA, la UNTRM proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos, especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina, así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNTRM con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiamiento y apoyar la participación en estudios relacionados con PANGEA.

Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de la región Amazonas que se alinean a los objetivos de PANGEA, también, la UNTRM en alianza con la Universidad de Oklahoma promoverán la creación de



## Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGEA lleve a cabo.

La UNTRM apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Amazonas, donde los efectos del cambio climático afectan severamente a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el oeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGEA por ser la región que en las últimas décadas ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Amazonas, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para formar la siguiente generación de científicos formados en la región Amazonas. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías e información de la NASA y aprovechar las imágenes satelitales, por ejemplo, para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos y métodos de investigación, tales como, modelos numéricos, conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra universidad. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS  
Jorge Luis Macelo Quijano Ph.D.  
Rector

## Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza (UNTRM) – English Translation

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

### **Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the [Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza](#) (UNTRM) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNTRM It is a public university created on September 18, 2000 in the city of Chachapoyas, Peru with the vision of being a leader and national and international reference in academic training, scientific, technological and humanistic research of quality that contributes to the development of society.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNTRM can provide access to our university experimental stations and support for field work in the rainforest and surrounding Andean areas. Similarly we will involve our research faculty experts on the area. The UNTRM and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonic and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. The UNTRM and OU will also facilitate

alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planned research.

UNTRM supports this initiative focused on the Northern Amazon region of Peru where the effects of climate change severely affect the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the western Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most the effects of deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Jorge Luis Maicelo Quintana  
President  
Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza,  
Amazonas, Peru



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

## FACULTAD DE AGRONOMÍA

### DECANATO

June 10, 2024

Elsa M. Ordway, Ph.D.

Department of Ecology and Evolutionary Biology Institute of the Environment and Sustainability

University of California, Los Angeles, USA

Dr. Ordway,

I am writing to express my sincerest gratitude for the invitation to participate in the PANGEA Workshop, held at the Pontifical Catholic University of Peru in Lima. It was an enriching and valuable experience, both professionally and personally. The opportunity to share knowledge and experiences with colleagues from various institutions and countries was invaluable.

Additionally, I would like to express the intention of the Faculty of Agronomy at the National University of Piura to collaborate with you. We are deeply interested in working together on the study, analysis, and development of alternatives to address the negative effects of climate change on agriculture and the forest environment of the Amazon. We believe that close collaboration between our institutions can generate innovative and effective solutions to mitigate the impact of climate change in these crucial areas, strengthening our academic development and professional exchange in various scientific specialties.

In the Piura Region, we currently have a diagnosis of the effects of climate change on agriculture. This study has allowed us to propose concrete recommendations to prevent the increased risk in food production and suggest alternatives for biodiversity conservation. We would like to share these findings with you and your team and explore possible areas of collaboration to strengthen our joint efforts.

We look forward to the possibility of working with you and the University of California, Los Angeles, on initiatives that promote the sustainability and resilience of our agricultural and forest systems in the face of climate change.

Once again, thank you for the invitation, and I hope to establish a fruitful collaboration.

Sincerely,

Ing. Jose Remigio

Dean of the Faculty of Agronomy, National University of Piura  
51 990076076; [jremigioa@unp.edu.pe](mailto:jremigioa@unp.edu.pe), [remigiopepe@gmail.com](mailto:remigiopepe@gmail.com)

  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ING. JOSE REMIGIO ARGUELLO M.Sc.  
DECANO

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Louvain-la-Neuve, Belgium, July 25, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The [Land Systems for Sustainability](#) lab that I am leading at the Université catholique de Louvain (UCLouvain) in Belgium is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

Our lab is part of [Earth and Life Institute](#) (ELI). Established in 2009, ELI is UCLouvain's flagship research institute on sustainability and environmental sciences, with over 300 researchers and key research foci on land-use change, climate change, soil sciences, and biodiversity conservation. ELI has a longstanding research track record in Earth Observation, land-use and land-cover change (LULCC) and global change studies in tropical regions. Within ELI, the research in our lab focuses on how land use and more broadly land systems can contribute to sustainability.

PANGEA's aims—to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions—are clearly linked to our research agenda. We have been working on mapping and understanding tropical social-ecological systems, with a focus on the role of governance interventions (public, private and hybrid) and economic dynamics, in particular linked to international supply chains. We have been investigating various processes that are strongly linked to the PANGEA agenda, including tropical deforestation, reforestation, and agricultural expansion, intensification and extensification. Our team has strong expertise in understanding drivers of land use and land system changes, including governance and economic structures such as international supply chains. The work developed in PANGEA throughout its well-identified but strongly articulated Working Groups would be extremely useful for us for embedding our understanding of land system drivers into a broader understanding of their Earth System impacts, including biogeochemical cycles & carbon dynamics, ecosystem structure, function, biodiversity, and climate feedbacks and interactions. Further, we believe that we can develop valuable synergies with the social-ecological systems Working Group,

---

which investigates questions that are very close to our research agenda, such as *how does governance structure, policy, and market dynamics interact with climate change, and land use and land cover change in tropical regions, and which interventions are most effective in restoring and adapting social and ecological processes to changes in tropical regions.*

We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth Observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices. Although our team has been working in various contexts across the Tropics, we have developed a strong focus on the Miombo woodlands of Southern Africa, in particular Mozambique, where we collaborate with colleagues who have a very strong and long-standing expertise in ecosystem dynamics in these forests, in particular at Universidade Eduardo Mondlane (UEM). The Miombo woodlands are a highly understudied both in terms of social and ecological dynamics, and their interactions, and African research institutes are strongly under-represented in global change research. The teams led by our colleagues at UEM are pivotal in the research and the science-policy interface in Mozambique, being directly engaged with public authorities and administrations on policy-making and evaluation. I sincerely believe that engaging further in this region and with these partners would be highly beneficial for the research agenda and the positioning of PANGEA.

Should PANGEA be funded, we are willing to facilitate any engagement of PANGEA in that region, and to consider developing research proposals, including in other regions, to seek funding to support participation in PANGEA-related studies. We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our lab's goals. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,

Professor Dr. Patrick Meyfroidt



-----  
F.R.S. - FNRS &  
Earth and Life Institute - UCLouvain  
Place Louis Pasteur, 3  
1348 Louvain-La-Neuve Belgium  
Email : [patrick.meyfroidt@uclouvain.be](mailto:patrick.meyfroidt@uclouvain.be)  
Tel: +32 10 472 992 <http://www.uclouvain.be/eli>  
<http://landsystems-lab.earth/>

November 19, 2024

Elsa Ordway, Ph.D.  
Assistant Professor, UCLA Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Co-Director, Congo Basin Institute, UCLA  
Co-Director, UCLA Center for Tropical Research

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Professor Ordway,

As the UCLA Vice Chancellor for Research & Creative Activities, I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions.

If awarded, PANGEA will be able to draw upon the extensive research infrastructure at UCLA. As one of the country's largest and most productive research universities with over \$1.5 billion in annual research funding, UCLA has experience managing large complex federal awards. UCLA's Office of Research Administration and other campus offices have the capacity, resources, and expertise needed to ensure appropriate award management.

In addition, UCLA has a history of nurturing international research programs, some of which will facilitate PANGEA's data collection and engagement. UCLA co-founded the Congo Basin Institute (CBI) in 2015 as a model for modern scholarship in Africa. Based in Cameroon and covering the Central African region, CBI has nearly a decade of operational experience, dozens of collaborations with local researchers, and relationships with numerous local communities. Another example, the Center for Tropical Research (CTR), has been housed at UCLA since 2001 and promotes pan-tropical research in the three major tropical basins.

PANGEA will also benefit from the enormous depth and breadth of scholarship at UCLA, which has over 140 departments and interdepartmental programs. Our highly engaged undergraduate and graduate student body will support PANGEA's capacity-building goals. Furthermore, UCLA's status as an emerging Hispanic-Serving Institution and our partnership with Morgan State University, a historically Black university, will facilitate engaging minority and first-generation students in PANGEA's research.

The PANGEA campaign has significant potential for high-impact research. UCLA is committed to supporting the project's success and helping it flourish as part of UCLA's expansive research enterprise.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Roger M. Wakimoto". The signature is fluid and cursive, with "Roger" and "M." on the first line and "Wakimoto" on the second line.

Roger M. Wakimoto, Ph.D.  
Vice Chancellor for Research & Creative Activities



November 7, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Dear Dr. Ordway,

**LETTER OF SUPPORT FOR PAN TROPICAL INVESTIGATION OF BIOGEOCHEMISTRY AND ECOLOGICAL ADAPTATION (PANGEA)**

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce earth observation of forest through satellite imagery, forest biodiversity and conservation, landscape restoration, Non-Timber Forest Products (NTFP) conservation and utilization at the local level for food, energy and medicine, forest resources utilization for indigenous medicine, capacity building and research-related activities led and carried out by the University of Energy and Natural Resources.

The University of Energy and Natural Resources (UENR) is a public funded institution that was established in 2011 in Ghana. Our goal is to promote the development of human resources and skills required to solve the critical energy and natural resources challenges of society and undertake interdisciplinary academic research and outreach programmes in engineering, science, economics and environmental policy. To achieve our objectives, we currently do carbon flux tower monitoring project between atmosphere and tropical forest ([https://eoric.uenr.edu.gh/?bunch\\_projects=carbon-flux-tower-project](https://eoric.uenr.edu.gh/?bunch_projects=carbon-flux-tower-project)) in Bia-Tano Forest Reserve, Ghana, Non-Timber Forest Products cultivation and community development at Lake Bosomtwe, Ghana, Forest Phenology project (in selected forest reserves in Ghana) and Climate Forest Feedbacks Project, also at Bia-Tano Forest Reserve.

We see several aligned efforts and general aims between UENR and PANGEA, in earth observation research, climate change mitigation and adaptation, forest monitoring and conservation, carbon sequestration research, NTFP research and community development. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout

the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue forest monitoring and conservation, community capacity building for forest management initiatives with local communities, and national institutions and agencies such as Forestry Commission, Forestry Research Institute of Ghana (FoRIG), Environmental Protection Agency (EPA) and Local Government Authorities. These institutions have the legal, regulatory, scientific and technical mandate and capacity to support research, capacity building, data analysis and dissemination activities related to PANGEA. We conduct this initiative in Bia-Tano Forest Reserve, Tain II Forest Reserve, Tinte Bepo Forest Reserve, Bobri Forest Reserve within both moist and dry semi-deciduous forest ecosystems because it is special for habitation of indigenous forest species, biodiversity hotspot and buffers the forest zone from the harsh savannah ecosystems in Northern Ghana. This location may be of strategic importance to PANGEA because of their unique scientific and socioeconomic value. The UENR has been working in this location for twelve years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with research, stakeholder engagement, capacity building and community development.

Should PANGEA be funded, UENR can provide in-kind support in the form of research support services, office space, IT services, financial management services and vehicles for travel and 20% of staff time (FTE) estimated at US \$200,000.

While our institution excels at earth observation services (global navigation satellite systems, high performance computing, GIS and data analysis) multidisciplinary research, stakeholder engagement, collecting and analyzing ground-based data, strengthening capacity of local government authorities, we seek to engage in cutting-edge research, training and capacity building in emerging innovative methods and technologies within our area of expertise including leveraging satellite imagery to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact across the globe and is mutually beneficial to all partners involved. As Director of Research, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.

Name: Peter Sanful PhD

Title: Director of Research

Institution name: University of Energy and Natural Resources

Institution Address: P. O Box 214 Sunyani, Ghana

Signature:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Peter Sanful PhD".



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If funded, PANGEA will advance data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. The field campaign will contribute to understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are aligned with U.S. Forest Service International Programs work on sustainable forest management and biodiversity conservation internationally.

U.S. Forest Service International Programs has had long term technical cooperation in the Amazon and Central Africa that has been supported by USAID, Department of State and other donors. U.S. Forest Service International Programs activities include both specific cooperation with countries in the South America and Africa regions as well as pantropical programs such as SilvaCarbon to enhance capacity of tropical forested countries to monitor, measure, and report carbon in their landscapes.

PANGEA is an exciting mission and will advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regimes. As the Director of International Programs, I confirm my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign.

Sincerely,

**Valdis**

Digitally signed  
by Valdis Mezainis  
Date: 2024.11.22  
08:30:34 -05'00'

Val Mezainis, PhD



**INTERNATIONAL PROGRAMS | OFFICE OF THE CHIEF**

Director  
Forest Service  
International Programs  
Office of the Chief  
201 14th Street SW, Stop 1127  
Washington DC 20250-1127



01 BP 526, Cotonou, Bénin  
Tel : + 229 21 36 11 19  
[www.uac.bj](http://www.uac.bj)



Abomey-Calavi, 28 November 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles, USA

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This is to express my strong support for the proposed NASA PANGEA (**PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation**) Terrestrial Ecology Field Campaign. The idea developed is relevant to advance our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests, their dynamics and their feedbacks with climate, biodiversity, and human agricultural related activities. PANGEA will be also valuable in completing and reinforcing national and international collaborative research activities led currently by our research group. These are LMI REZOC a bilateral laboratory between INE (National Institute for Water) of University Abomey-Calavi (UAC) in Bénin and IGE (Institute of Geoscience and Environment, Grenoble, France); and AMMA-CATCH a regional hydro-meteorological observatory. This observatory has been monitoring since more than ten years water vapor, carbon dioxide fluxes as well weather data across ecosystems spanning from the South to the North of Bénin and Dr. Ossénatou Mamadou is the leader of the beninese flux sites.

Considering that Bénin has a large part of its territory covered by forest, culture and plantations, PANGEA will clearly help to elucidate how land use and land cover changes affect biogeochemical gas fluxes and forest dynamics using ground base data, drone, and remote

sensing products in one of the most understudied regions of West Africa. Bénin is also at the frontier between two large tropical forested ecosystems (the Dahomey Gap), between Guinean and the Central African equatorial forests which offers an unique opportunity for developing a comprehensive understanding of beninese ecosystems.

Our research group has a keen interest and is enthusiastic about PANGEA's vision to combine observation data and multidisciplinary tools, approaches to co-produce and co-create knowledge by engaging local communities. This corroborates with our objectives to promoting scientific collaboration, building capacity for research and monitoring, nurturing the next generation of scientists, developing innovative results applicable to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, ecosystem water-related services, and sustainable land-use practices.

We guarantee that if the PANGEA is funded, our research group, the LMI REZOC and AMMA-CATCH Benin team can offer logistical support across our three sites to validate and improve satellite-derived measurements. LMI REZOC will also directly support these activities through triggering funds and sharing of expertise with the AMMA-CATCH technical staff, permanent in Benin, to survey and collect data of the three sites. We will also provide our long term existing data to collaborate on PANGEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding. Finally, we aim to expand opportunities for young beninese scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize flux towers data.

As a local principal investigator of beninese flux sites, I express my undeniable support for this campaign. Finally, we look forward to the possibility of contributing to PANGEA and are persuaded that this collaboration will generate impactful societal results for our country.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ossénatou MAMADOU".

Ossénatou MAMADOU, PhD  
Associate Professor, IMSP/UAC  
Leader of the WAF-Net (West Africa Flux Network)



**WCS**

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly contribute to the aims of the Wildlife Conservation Society's (WCS) Forests & Climate Change Program.

Established in 1895, WCS is a global 501 non-governmental organization committed to saving wildlife and wild places around the world. WCS leads active projects in more than 50 countries and more than 500 project locations around the world. WCS' Forests and Climate Change Program works to safeguard the long-term integrity of the tropical forest carbon sink, and leads the development of the HIFOR nature finance initiative to scale investments in these climate-critical ecosystems ([www.hifor.org](http://www.hifor.org)).

Several of PANGEA's goals align closely with WCS' priorities, particularly in the development of a broader understanding of risks to the tropical land sink, how these risks vary over space and time, and the determinants of sink dynamics. PANGEA's planned activities will illuminate crucial relationships between tropical forest integrity, biodiversity, anthropogenic pressures, and resistance and resilience to climate variability that will inform WCS' efforts to implement effective, durable, and equitable forest conservation solutions. We are therefore eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches to fill these knowledge gaps.

WCS currently collaborates with community, civil society, and government partners on the development, piloting, and scaling of HIFOR nature finance in more than 50 countries. Our partnerships and the unique qualities of these ecosystems may be of strategic importance to PANGEA's objectives, as our shared expertise and WCS's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation.

If PANGEA is selected, WCS can provide in-kind support, including data -sharing and assistance with local logistics. Our team is also prepared to explore collaborative funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As the Executive Director of the Forests and Climate Change Program at WCS, I offer my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate and biodiversity conservation goals.

Sincerely,

Signed by:  
  
 3407CE162A204FE

Daniel J. Zarin, Ph.D.  
 Executive Director, Forests and Climate Change

November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

I am writing to convey my strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will address essential gaps in data, methodology, and training, advancing our ability to measure, understand, and scale carbon cycle dynamics in tropical forests and their interactions with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change, disturbance events, and human activities. PANGEA will also strengthen and enhance tropical forest conservation initiatives in the Democratic Republic of Congo and Brazil led by the Woodwell Climate Research Center (Woodwell Climate).

Woodwell Climate Research Center conducts science for solutions at the nexus of climate, people and nature. We partner with leaders and communities for just, meaningful impact to address the climate crisis. For nearly 40 years, we have combined hands-on experience and policy impact to identify and support societal-scale solutions that can be put into immediate action. Woodwell Climate was established in 1985 as the Woods hole Research Center. To achieve our objectives, Woodwell Climate conducts basic and applied research on the biophysical, economic, and social systems affecting tropical forest and land use dynamics in the Amazon (since 1985) and Congo (since 2008) Basins.

The Tropics team at Woodwell Climate see several aligned efforts and goals between Woodwell and PANGEA, in particular tropical forest and carbon cycle resilience and the role of biodiversity in maintaining healthy forests. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Woodwell Climate conducts its research with local partners/institutions such as the Amazon Environmental Research Institute in Brazil (IPAM), the Congo Regional Post-Graduate Training School on Integrated Management of Tropical Forests and Lands ([ERAIFT](#)), and Congo Basin Water Resources Research Center ([CRREBaC](#)). We carry out this work in mixed use landscapes consisting of native forest, large scale industrial agriculture, traditional uses, and cattle pasture. The remaining forests in these regions contain the bulk of the world's terrestrial biodiversity and play a crucial but still not well understood role in regulating our climate. These partnerships and locations may be of strategic



**Woodwell  
Climate  
Research  
Center**

149 Woods Hole Road  
Falmouth, MA 02540-1644

woodwellclimate.org  
508 540 9900

info@woodwellclimate.org

importance to PANGEA because of long term research programs and well-established connections to local research, community organisations, and policy management institutions. Woodwell Climate's deep experience in these landscapes and on these topics can facilitate PANGEA's implementation by supporting research, training, and capacity building.

If PANGEA is selected to move forward, Woodwell Climate can provide in-kind support in the form of internal grants and grants to our institution from private foundations and individuals to support participation in PANGEA-related research activities.

While Woodwell Climate excels at collecting and analyzing ground-based and satellite data, strengthening capacity of local students, researchers, and land managers, we seek to engage in leveraging satellite imagery to improve our understanding of the processes of forest degradation and the overall importance of forests for climate and agricultural productivity.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact. As Director of the Tropics Program, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common interest.

Michael T. Coe

A handwritten signature in black ink that reads "Michael T. Coe".

Director of the Tropics Program  
Woodwell Climate Research Center  
149 Woods Hole Rd, Falmouth, MA, 02540

**Subject:**

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly benefit our Global Forest Watch and Land & Carbon Lab's initiatives, as led by the World Resources Institute (WRI).

WRI is a non-profit environmental think tank, incorporated under the laws of Delaware, USA, that goes beyond research to create practical ways to protect the earth and improve people's lives. WRI is committed to move human society to live in ways that protect Earth's environment and its capacity to provide for the needs and aspirations of current and future generations.

Our team pursues the development of high-quality information about land and its associated values (e.g. carbon, biodiversity) and make these universally accessible and useful for people worldwide, so as to empower them to manage landscapes sustainably and improve the livelihoods of local people through active projects in Food Land & Water Department especially Global Forest Watch and Land & Carbon Lab.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at WRI, particularly the Land & Carbon Lab and Global Forest Watch of improved land cover data, land cover changes and the impacts of these changes on biodiversity, carbon and people. We are eager to work with PANGEA to share our data, work in cooperation to develop new data, scale PANGEA data on our platforms, help get data used in our wide network and cooperate on advances in Earth observation capabilities and collaborative multidisciplinary approaches to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change.

WRI currently collaborates on Global Forest Watch and the Land & Carbon Lab with many local and international partners as the University of Maryland, University of Minnesota, Purdue University, Cornell university, Wageningen University, German Research Centre for Geosciences, NASA,



WORLD  
RESOURCES  
INSTITUTE

---

10 G Street, NE Suite 800 Washington, DC 20002 USA (PH) +1 (202) 729-7600 (FAX) +1 (202) 729-7610  
Www.WRI.org

Google, Meta and international partners including ESA, IFPRI, World Bank and UN FAO. WRI's deep experience developing breakthroughs in geospatial mapping that power local-to-global solutions by making those capabilities accessible will provide critical support for PANGEA's translation of science to action.

If PANGEA is selected, WRI can provide in-kind support through expertise, data sharing, partnership engagement and user testing. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as enhance crop-type/yield mapping, biodiversity assessments, carbon flux mapping and supporting supply chain traceability.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director of Partnership and Innovation for Land & Carbon Lab at WRI, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared land, climate and biodiversity conservation goals.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Fred Stolle", is placed here.

Dr. Fred Stolle  
Director Innovation & Partnership GFW/LCL  
World Resources Institute  
10 G street, NE, Suite 800, Washington DC, 20002,

## B. Partenaires PANGEA et activités d'engagement

**Tableau B-1.** Aperçu des stratégies d'engagement et exemples de partenaires pour chaque groupe cible

COMMUNAUTÉ	DESCRIPTION	PERTINENCE POUR PANGEA	STRATÉGIE ET OBJECTIFS D'ENGAGEMENT	EXEMPLES DE PARTENAIRES
NASA	Programmes de recherche et d'analyse de la NASA et d'action pour la Terre, programme de renforcement des capacités de la NASA et initiatives de la NASA.	La NASA est le moteur de PANGEA	Faire progresser la compréhension, l'étalonnage et la validation scientifiques, le développement d'algorithmes et de produits, les partenariats et le renforcement des capacités dans l'ensemble de l'entreprise NASA grâce à une approche intégrative.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Écologie terrestre, diversité biologique et conservation écologique, NASA Land-Cover and Land-Use Change (LCLUC), hydrologie</li> <li>• Système de surveillance du carbone, Climat et résilience, Catastrophes, Incendies de forêt, Récolte de la NASA, Ressources en eau</li> <li>• SERVIR, ARSET, DEVELOP, GLOBE, Initiative des peuples autochtones</li> </ul>
AUTRES AGENCES GOUVERNEMENTALES AMÉRICAINES	Agences fédérales de recherche et de développement américaines autres que la NASA	De nombreuses agences gouvernementales américaines soutiennent des efforts de recherche et de formation qui s'inscrivent directement dans le cadre de PANGEA.	Coordonner avec les gestionnaires de programmes l'identification des possibilités d'appels d'offres interagences lorsque les activités de recherche et d'application sont mutuellement bénéfiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE NGEE-Tropiques*</li> <li>• NSF BIO, GEO, SBE, GOLD-EN, RISE</li> <li>• USAID CARPE, USAID-PEER**</li> <li>• Programme international de l'USFS</li> <li>• USGS SilvaCarbon</li> </ul>
AGENCES SPATIALES INTERNATIONALES ET INSTALLATIONS DE SOUTIEN	Agences spatiales et instituts fédéraux non membres de la NASA qui soutiennent la surveillance des satellites et les capacités techniques.	Ces partenaires collaborent activement avec la NASA dans le cadre de nombreuses missions satellitaires et campagnes aériennes. PANGEA est l'occasion de renforcer et d'étendre ces partenariats.	Soutenir la collaboration internationale dans le cadre des missions conjointes et des campagnes aéroportées existantes ; renforcer les capacités pour favoriser un plus grand engagement entre la NASA et les agences spatiales dans les tropiques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale (OSFAC)</li> <li>• Agence spatiale gabonaise (AGEOS)</li> <li>• Agence spatiale européenne (ESA)</li> <li>• Agence spatiale française (CNES)</li> <li>• Le Centre aérospatial allemand (DLR)</li> <li>• Organisation indienne de recherche spatiale (ISRO)</li> <li>• Institut national de recherche spatiale du Brésil (INPE)</li> <li>• Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA)</li> </ul>

COMMUNAUTÉ	DESCRIPTION	PERTINENCE POUR PANGEA	STRATÉGIE ET OBJECTIFS D'ENGAGEMENT	EXEMPLES DE PARTENAIRES
<b>AGENCES GOUVERNEMENTALES ÉTRANGÈRES ET INSTITUTS DE RECHERCHE NATIONAUX</b>	Ministères sectoriels nationaux et locaux ; institutions spécialisées dans le domaine géospatial ; plateformes multipartites dirigées par le gouvernement	Ces partenaires prennent des mesures à grande échelle (planification et modélisation économiques et environnementales, application de la loi, investissement dans la recherche, etc.) et soutiennent les données et les analyses à long terme (par exemple, la météorologie).	Informier les questions et les activités scientifiques du PANGEA par l'intermédiaire des institutions de recherche ; mettre en place des conditions favorables (institutionnelles, financières et programmatiques) pour l'appropriation des résultats de la recherche du PANGEA ; renforcer les capacités du personnel aux niveaux national et local.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brésil Institut national de recherche amazonienne (INPA)</li> <li>Observatoire national du changement climatique du Cameroun (ONACC)</li> <li>Partenariat pour les forêts du bassin du Congo (PFBC)</li> <li>Centre national de la recherche scientifique et technologique du Gabon (CENAREST)</li> <li>Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts (GCF-TF)</li> <li>Ministères de l'environnement, des forêts, de la faune, de l'agriculture et de la recherche scientifique</li> <li>Mancomunidad Regional Amazónica (Pérou)</li> <li>Fondation de recherche de São Paulo (FAPESP)</li> </ul>
<b>INSTITUTIONS SCIENTIFIQUES</b>	Universités et collèges ; laboratoires nationaux ; instituts de recherche	Ces partenaires facilitent le transfert de connaissances et de technologies afin de renforcer les capacités des institutions locales et régionales à former la prochaine génération de scientifiques.	Elle renforcera les capacités de recherche locales en soutenant la gestion des données, le développement des infrastructures et la formation des chercheurs en début de carrière dans les institutions locales et régionales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Institut de recherche sur les ressources biologiques Alexander von Humboldt</li> <li>Alliance Bioversity International &amp; CIAT</li> <li>Institut de technologie d'Amazon (AmIT)</li> <li>Institut du Bassin du Congo (IBC)</li> <li>Institut national français de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)</li> <li>Institut international d'agriculture tropicale (IITA)</li> <li>K. Lisa Yang Centre de bioacoustique pour la conservation</li> <li>LBA</li> <li>Université catholique pontificale du Pérou (PUCP)</li> <li>Centre de recherche climatique Woodwell</li> </ul>

COMMUNAUTÉ	DESCRIPTION	PERTINENCE POUR PANGEA	STRATÉGIE ET OBJECTIFS D'ENGAGEMENT	EXEMPLES DE PARTENAIRES
<b>INITIATIVES INTERNATIONALES COORDONNÉES EN MATIÈRE DE RECHERCHE</b>	Consortiums de recherche ; réseaux ; réseaux de réseaux	Ces partenaires travaillent à des échelles importantes qui correspondent aux objectifs transdisciplinaires et pantropicaux de PANGEA.	Aligner les efforts avec ces partenaires pour s'assurer que les activités de PANGEA combinent stratégiquement les lacunes nécessaires plutôt que de faire double emploi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alliance pour la science des forêts tropicales (ATFS)</li> <li>• AndesFlux</li> <li>• ASCEND</li> <li>• Initiative scientifique pour le bassin du Congo (CBSI)</li> <li>• CongoFlux</li> <li>• Réseaux régionaux FLUXNET (par exemple, AmeriFlux, ICOS, AsiaFlux)</li> <li>• GEO-TREES</li> <li>• Guyafor</li> <li>• Guyaflux</li> <li>• Initiative "One Forest Vision" (OFVi)</li> <li>• Réseau Flux Afrique de l'Ouest</li> </ul>
<b>ORGANISATIONS DE LA SOCIÉTÉ CIVILE</b>	Organisations non gouvernementales (ONG) nationales et internationales et initiatives de recherche non gouvernementales présentes dans les pays cibles.	Ces partenaires facilitent la consolidation des connaissances sur le carbone, la biodiversité et les systèmes socio-écologiques ; ils traduisent les résultats de la recherche en campagnes et actions menées par les OSC.	Coproduire des applications qui tirent parti des avancées scientifiques et techniques de PANGEA.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservation International</li> <li>• Arbres de la forêt</li> <li>• World Resources Institute (y compris Global Forest Watch et Land and Carbon Lab)</li> <li>• MapBiomass</li> <li>• Organisation pour la conservation des petits mammifères</li> </ul>

COMMUNAUTÉ	DESCRIPTION	PERTINENCE POUR PANGEA	STRATÉGIE ET OBJECTIFS D'ENGAGEMENT	EXEMPLES DE PARTENAIRES
ALLIANCES ET ORGANISATIONS DES PEUPLES AUTOCHTONES ET DES COMMUNAUTÉS LOCALES	Organisations et alliances dirigées par les populations autochtones, les communautés locales et les femmes, actives dans les pays cibles	Ces partenaires sont en contact avec les communautés, les dirigeants et les partenaires concernés dans les pays ciblés.	Concevoir conjointement des questions et des applications scientifiques qui touchent directement les populations autochtones, les femmes et d'autres groupes ; concevoir conjointement des activités de campagne au sol et aéroportées dans les territoires et les communautés locales ; fournir une formation pour permettre aux populations autochtones de collecter des données, de mener des recherches et de communiquer.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alliance mondiale des collectivités territoriales</li> <li>• Initiative sur les droits et les ressources</li> <li>• CBI School for Indigenous and Local Knowledge (SILK) (École des savoirs indigènes et locaux)</li> <li>• Dynamique des Groupes des Peuples Autochtones (DGPA-RDC)</li> </ul>
COMMUNAUTÉ DES DONATEURS	Donateurs classiques (bilatéraux, fondations familiales, organisations philanthropiques) Agences spécialisées (géospatiales) des pays donateurs	Ces partenaires collectent des fonds complémentaires qui offrent un soutien ciblé pour étendre PANGEA au-delà du soutien financier de la NASA.	Cibler les investissements dans les applications PANGEA et le développement de produits, le soutien aux collaborateurs internationaux, les ateliers conjoints et le développement d'outils de collecte et de gestion des données IPLC.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonds Bezos pour la Terre</li> <li>• Fondation Ford</li> <li>• Donateurs individuels</li> <li>• Fondation Mellon</li> <li>• Fondation Moore</li> <li>• Agence norvégienne de coopération au développement (Norad)</li> <li>• Initiative internationale de la Norvège sur le climat et les forêts (NICFI)</li> </ul>
SECTEUR PRIVÉ	Agro-industries, industries extractives, entreprises énergétiques, entreprises de big data, institutions d'investissement et entreprises d'écotourisme.	Ces partenaires sont des acteurs et des décideurs importants dont l'impact est considérable.	Travailler en étroite collaboration avec la NASA et les partenaires en matière d'applications afin de déterminer les stratégies les plus appropriées pour s'engager avec le secteur privé sur divers résultats d'applications.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Table ronde sur l'huile de palme, le cacao, le soja et les biomatériaux durables</li> <li>• Unilever</li> <li>• Olam</li> <li>• Ressources vertes</li> <li>• CNaught</li> <li>• Équité carbone</li> <li>• Capital de crédits carbone</li> </ul>

COMMUNAUTÉ	DESCRIPTION	PERTINENCE POUR PANGEA	STRATÉGIE ET OBJECTIFS D'ENGAGEMENT	EXEMPLES DE PARTENAIRES
<b>AGENCES INTERGOUVERNEMENTALES</b>	Organisations composées de plusieurs gouvernements souverains qui collaborent pour traiter des questions communes, élaborer des politiques et coordonner des actions à l'échelle régionale ou mondiale.	Ces partenaires fournissent des évaluations scientifiques faisant autorité, qui éclairent les décisions politiques mondiales et orientent les efforts internationaux de lutte contre le changement climatique et de promotion du développement durable et d'une planète résiliente.	Se tenir au courant des rapports d'évaluation et des activités pour s'assurer que les résultats scientifiques et les applications de PANGEA peuvent être utilisés de manière efficace.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comité sur les satellites d'observation de la Terre (CEOS)</li> <li>• Groupe sur l'observation de la Terre (GEO)</li> <li>• Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)</li> <li>• Plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES)</li> <li>• Union internationale pour la conservation de la nature (UICN)</li> <li>• Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)</li> </ul>

\* Le projet DOE NGEETropics entre dans sa phase 3 et s'achèvera au moment où PANGEA débutera, ce qui permettra d'assurer une continuité importante dans les efforts de limitation de l'incertitude des modèles et d'intégration des données et des modèles.

\*\* Le programme PEER de l'USAID va être remplacé par un nouveau programme appelé SPARK.

## C. Engagement pendant l'étude exploratoire

La campagne de délimitation du champ d'application de la PANGEA a été un effort de collaboration auquel ont participé plus de 800 personnes issues de 396 institutions réparties dans plus de 60 pays sur 5 continents (**tableau C-1**) par le biais (1) de groupes de travail internationaux, (2) de brefs événements de partage d'informations, (3) d'ateliers consultatifs de plusieurs jours et (4) de réunions bilatérales avec des partenaires potentiels. L'effort de cadrage de PANGEA a commencé en novembre 2023, avec un webinaire de lancement. Les activités qui ont suivi en 2024 sont décrites ci-dessous.

### Groupes de travail internationaux

Plus de 200 personnes ont participé à au moins une des 60 réunions du groupe de travail PANGEA organisées virtuellement par les coresponsables des groupes de travail. Au début de la campagne de définition du champ d'application, sept groupes de travail différents ont sollicité la contribution de la communauté scientifique et de la communauté au sens large :

- Rétroactions et interactions climatiques : 158 engagements
- Cycles biogéochimiques et dynamique du carbone : 155 engagements
- Structure, fonction et biodiversité des écosystèmes : 101 engagements
- Systèmes socio-écologiques : 91 engagements
- Modélisation et synthèse de données : 141 engagements
- Engagement communautaire et applications de recherche : 110 engagements
- Faisabilité : 79 engagements

Les engagements sont définis pour enregistrer la présence unique d'un participant à une réunion unique du groupe de travail. Par exemple, trois participants uniques à la même réunion ou un participant unique à trois réunions consécutives comptent tous deux pour 3 engagements. Cette définition permet donc de saisir un large éventail d'interactions avec les participants du groupe de travail, ce qui représente mieux la combinaison des contributions en ligne et hors ligne au développement des thèmes et des objectifs du groupe de travail.

Le groupe de travail Community Engagement and Research Applications (CERA) était principalement composé d'étudiants, de chercheurs et de professeurs d'établissements universitaires, de praticiens d'organisations non gouvernementales et intergouvernementales, et de quelques représentants du secteur privé. Comme pour les autres groupes de travail PANGEA, l'adhésion au groupe CERA était ouverte et annoncée en ligne, lors des événements PANGEA et par le "bouche à oreille". Une centaine de personnes se sont inscrites au groupe de travail CERA et ont participé à une ou plusieurs des 12 réunions du CERA organisées en ligne et/ou ont contribué aux documents de collaboration de l'équipe. De nombreux membres ont également participé à des sessions relatives au CERA lors des ateliers de plusieurs jours organisés par PANGEA au Cameroun, aux États-Unis, au Brésil et au Pérou.

### Manifestations d'échange d'informations

L'équipe dirigeante de PANGEA a rencontré des centaines de personnes à l'occasion de douze événements de partage d'informations organisés sur les cinq continents. Ces événements comprenaient des présentations et des sessions de discussion d'une -à deux heures (-) lors de conférences universitaires internationales, de webinaires, d'événements régionaux et de réunions spéciales organisées par la communauté PANGEA.

L'implication des communautés autochtones dans le processus de cadrage pour discuter de la science coproduite, de la souveraineté des données, des intérêts en matière de formation et des aspects importants du processus a constitué une partie importante du processus de cadrage de PANGEA. Étant donné que les pays spécifiques sur lesquels portera PANGEA ne seront pas déterminés avant l'élaboration du plan d'expérience concis, la participation initiale s'est concentrée sur les organisations limitrophes, les alliances et les chefs de file des communautés. L'Alliance mondiale des collectivités territoriales a été l'une des principales organisations impliquées dans la définition du champ d'application de PANGEA. Des réunions régulières ont été organisées avec les dirigeants de la GATC, y compris les dirigeants des mouvements de femmes et de jeunes au sein de la GATC. Ces réunions ont toujours bénéficié d'un service d'interprétation et les documents et courriels ont été échangés en anglais, en français, en espagnol, en portugais et en brésilien. Une réunion en personne a été organisée lors de la COP16 avec plusieurs membres du GATC afin de discuter plus en détail de PANGEA et d'identifier les prochaines étapes appropriées si PANGEA est sélectionné. Une réunion de suivi aura lieu en janvier pour faire le point sur l'année de cadrage avec les dirigeants du GATC. Des réunions ont également été organisées avec l'initiative Rights and Resources (RRI), dont le travail se concentre sur l'autonomisation et l'engagement des populations autochtones, des populations d'origine africaine, des communautés locales et des femmes de ces communautés. En outre, PANGEA a organisé un atelier avec les communautés autochtones au Panama, qui a réuni 12 participants et représentants des territoires Embera, Wounaan et Guna au Smithsonian Tropical Research Institute le 26 avril 2024. La réunion hybride en personne et en ligne a été virtuellement co-organisée par l'équipe de direction de PANGEA et a été suivie par 10 participants supplémentaires de Zoom provenant de 7 pays. Si PANGEA est sélectionné, il y aura sans aucun doute d'autres communautés avec lesquelles s'engager dans les paysages de PANGEA. Cependant, ce travail jette les bases à partir desquelles ces partenariats pourront s'épanouir.

Liste des événements de partage d'informations :

- **Des réunions publiques en personne, des présentations et des symposiums lors de conférences :**
  - American Geophysical Union (AGU) 2023 & 2024 (à venir) - San Francisco, CA, et Washington DC
  - Association pour la biologie tropicale et la conservation (ATBC) - Kigali, Rwanda, juillet 2024
  - Présentation de la 20e réunion des parties du Partenariat pour les forêts du bassin du Congo (PFBC) - Kinshasa, République démocratique du Congo (juin 2024)
  - Société écologique d'Amérique (ESA) - Long Beach, CA
  - Union européenne de géophysique (EGU) - Vienne, Autriche (avril 2024)
  - Global Land Programme (GLP) (à venir le 5 novembre 2024) - Oaxaca, Mexique
  - Union internationale des instituts de recherches forestières (IUFRO) - Stockholm, Suède
  - Réunion de la NASA sur la diversité biologique et la conservation écologique dans le Maryland, mai 2024
  - Smithsonian Tropical Research Institute, Symposium du 100e anniversaire de l'île de Barro Colorado (BCI 100) - Gamboa, Panama (juin 2024)
- **Mairies virtuelles :**
  - PANGEA - des mairies ouvertes à tous
  - PANGEA - groupes de travail spécifiques
  - Assemblée générale en ligne de l'ASE (mars 2024)
- **Ateliers plus petits :**

- La session virtuelle des femmes africaines mettra en lumière les recherches menées par des femmes en Afrique centrale (avril 2024)
- Réunion avec les communautés autochtones au Panama (avril 2024)
- Réunion SBG Collab avec les partenaires autochtones et communautaires (juin 2024)
- Semaine des mammologues noirs avec des scientifiques noirs (septembre 2024)
- Réunions régulières avec les dirigeants de l'Alliance mondiale des collectivités territoriales (GATC) (juillet-novembre 2024).
- **Réunions de l'équipe scientifique de la NASA :**
  - ECOSTRESS
  - EMIT
  - IEDG
  - OCO
  - SBG
  - SMAP

## Ateliers consultatifs de plusieurs jours

L'équipe de direction de PANGEA a organisé quatre ateliers régionaux de cadrage de plusieurs jours qui comprenaient des sessions axées sur les meilleures pratiques en matière d'engagement communautaire et sur la demande et les préférences régionales en matière d'applications de recherche. Les ateliers de cadrage PANGEA comprennent un événement de 3 jours à Yaoundé, au Cameroun, en février 2024 ; un événement de 3 jours à Washington, DC, en avril 2024 ; un atelier de 3 jours à Manaus, au Brésil, en mai 2024 ; et un atelier de 2 jours à Lima, au Pérou. Tous les événements ont été organisés en étroite collaboration avec les partenaires locaux de PANGEA représentant la communauté universitaire, les agences gouvernementales et les organisations non gouvernementales. Les activités de l'atelier ont été bien suivies par 263 participants en personne de 30 pays lors des consultations régionales organisées au Cameroun (90), à Washington DC (103), au Panama (10) et à Lima (60). Lorsque l'équipement et l'ordre du jour le permettaient, ces événements interactifs ont été étendus à un public virtuel plus large, avec l'engagement de 362 participants virtuels supplémentaires de 33 pays lors des consultations régionales au Cameroun (54), à Washington DC (298) et au Panama (10). Tous les événements, à l'exception de l'atelier de Manaus, au Brésil, ont bénéficié de services d'interprétation pour les non-anglophones.

L'atelier du Cameroun, qui s'est tenu les 21 et 22 février 2024 à l'hôtel Mont Fébé, a attiré 90 participants de 16 pays qui ont assisté à l'événement organisé conjointement par le CIFOR, l'IITA et l'université locale de Yaoundé. Les sessions hybrides ont été rejoints par 54 participants supplémentaires de Zoom. L'atelier DC, qui s'est tenu du 9 au 11 avril 2024 au siège de l'AGU, a réuni 103 participants de 16 pays. L'atelier entièrement hybride a permis le dialogue et la participation de 297 participants Zoom pendant les trois jours de l'événement. L'atelier de Lima, qui s'est tenu les 3 et 4 juin 2024 au centre culturel de la PUCP, a réuni 60 participants de 8 pays. L'atelier de Lima a été organisé en partenariat avec le groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts (GCF-TF) et a été une occasion importante d'avoir une participation à peu près égale des scientifiques et des décideurs politiques à l'atelier. Des gouverneurs du Pérou, de Colombie, de Bolivie, du Brésil et de l'Équateur étaient présents à la réunion, ce qui a permis d'obtenir des informations précieuses sur le potentiel des résultats de PANGEA en Amazonie en matière de mise en pratique des sciences de la terre.

Liste des ateliers consultatifs de plusieurs jours de PANGEA :

- Consultation régionale pour l'Afrique Atelier de 3 jours, Yaoundé, Cameroun, février 2024

- Atelier de 3 jours sur le cadrage de PANGEA, Washington, DC, avril 2024
- Atelier de 4 jours sur le climat en Amazonie, Manaus, Brésil, mai 2024
- PANGEA/Governors' Climate & Forests Task Force (GCFTF) Américains atelier régional de 2 jours à Lima, Pérou, juin 2024
- Consultation régionale pour l'Asie par la participation à l'atelier SERVIR de 3 jours, Bangkok, Thaïlande, juillet 2024

## Réunions bilatérales avec des partenaires potentiels de PANGEA

L'équipe dirigeante de PANGEA et les membres du groupe de travail CERA ont organisé des réunions bilatérales avec des centaines de partenaires potentiels de PANGEA, notamment des agences fédérales américaines, l'Agence spatiale européenne, SERVIR, des entreprises privées, des instituts de recherche américains et internationaux, des organisations de protection de la nature, des ministères, etc. Les organisations et institutions sont listées dans le **tableau C-1**. De nombreux partenaires (n=58) ont envoyé des lettres de soutien pour confirmer leur intérêt à collaborer au programme PANGEA (s'il est financé).

**Tableau C-1.** Toutes les organisations et institutions impliquées dans le processus de délimitation du champ d'application de PANGEA.

OSC : Organisation de la société civile

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
1	Université d'Aarhus (Danemark)	Université
2	ACCA : Conservation de l'Amazonie (Pérou)	OSC
3	ADC : Association Action for Community Development (Cameroun)	OSC
4	ADPC : Centre asiatique de préparation aux catastrophes	OSC
5	Réseau africain de l'environnement	OSC
6	AGEOS : Agence d'études et d'observations spatiales (Gabon)	Gouvernement
7	AGU : Union géophysique américaine	Société
8	Université d'Akamai	Université
9	Université d'Akdeniz (Turquie)	Université
10	Alliance Biodiversité - CIAT : Alliance de Bioversity International et du Centre international d'agriculture tropicale (Italie)	OSC
11	AmIT : Institut technologique de l'Amazonie (Brésil)	OSC
12	Anawakalmekak	École de la maternelle à la 12e année
13	ANI : Africa Nature Investor Foundation (Nigeria)	Donateur
14	Connexion Arbimon/Rainforest	OSC
15	ARES : Installation de recherche aéroportée pour le système terrestre	Université
16	ASU : Université d'État de l'Arizona	Université
17	ATBC : Association pour la biologie tropicale et la conservation	Société
18	BAERI : Institut de recherche environnementale de la région de la Baie	OSC
19	Fonds Bezos pour la Terre	Donateur
20	BHI : Biodiversity Hub International (Centre international pour la biodiversité)	OSC
21	Mammalogistes noirs	OSC
22	Université de Boston	Université
23	Caltech : Institut de technologie de Californie	Université
24	Université Calvin	Université
25	Ministère de l'environnement du Cameroun	Gouvernement

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
26	CAPC-AC : Centre d'application et de prévision climatique d'Afrique centrale (Union africaine)	Multilatéral
27	Carboneers (Pays-Bas)	Recherche
28	Institution Carnegie pour la science	OSC
29	Institut d'études des écosystèmes de Cary	OSC
30	CBCS : Société de conservation du bassin du Congo (RÉP. DÉM. DU CONGO)	OSC
31	CDB : Convention sur la diversité biologique	Multilatéral
32	PFBC : Partenariat pour les forêts du bassin du Congo	Multilatéral
33	CBI : Institut du Bassin du Congo	Multilatéral
34	CBSI : Initiative scientifique pour le bassin du Congo	Multilatéral
35	CEAS : Centre d'études sur l'Amazonie durable	OSC
36	CEEAC : Communauté économique des États de l'Afrique centrale (Union africaine)	Multilatéral
37	CENAREST : Centre national de la recherche scientifique et de la technologie (Gabon)	Gouvernement
38	CEW : Cameroon Environmental Watch (Cameroun)	OSC
39	CGIAR : Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale	OSC
40	Université de Chapman	Université
41	CI : Conservation International	OSC
42	CICERO : Centre for International Climate and Environmental Research Oslo (Norvège)	OSC
43	CIFOR-ICRAF : Centre pour la recherche forestière internationale et l'agroforesterie mondiale	OSC
44	CIRAD : Centre de recherche agronomique pour le développement international (France)	OSC
45	CIRES : Institut coopératif de recherche en sciences de l'environnement	OSC
46	CIRMF : Centre International de Recherches Médicales de Franceville	OSC
47	Horloge climatique RDC (République démocratique du Congo)	OSC
48	Focus sur le climat	Industrie privée
49	CMEC : Coordinated Model Evaluation Capabilities (capacités coordonnées d'évaluation des modèles)	OSC
50	CNPq : Conseil national pour le développement scientifique et technologique (Brésil)	Gouvernement
51	CoEB : Centre d'excellence en biodiversité et gestion des ressources naturelles (Rwanda)	OSC
52	Collège de William & Mary	Université
53	Université de Columbia	Université
54	COMIFAC : Commission des forêts d'Afrique centrale	Multilatéral
55	Congolese Action For Nature (République démocratique du Congo)	OSC
56	Cordon Grande Forest Ejido (Mexique)	OSC
57	Université de Cornell	Université
58	CRDPI : Centre de recherche sur la productivité et la durabilité des plantations industrielles (République du Congo)	OSC
59	CSU : Université d'État du Colorado	Université
60	Arbres de la tomodensitométrie (CTrees)	OSC
61	CUNY : City University of New York (Université de la ville de New York)	Université
62	Université Denis Sassou Nguesso (République du Congo)	Université
63	DOE : Département de l'énergie des États-Unis	Gouvernement
64	Université de Duke	Université
65	Université de Caroline du Sud	Université
66	Eco-Consult	Industrie privée
67	EcoAgriculture	OSC
68	Marque Ecobed Biotech	Industrie privée
69	EDA : Activer l'action de désactivation	OSC

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
70	EEZA : Station expérimentale des zones arides (Espagne)	OSC
71	EGU : Union géophysique européenne	Société
72	Embrapa : Société brésilienne de recherche agricole (Brésil)	Gouvernement
73	Université Emory	Université
74	ENEF-Gabon : Ecole Nationale des Eaux et Forêts du Gabon (Gabon)	Gouvernement
75	ERAIFT : École régionale de formation post-graduée sur la gestion intégrée des forêts et des terres tropicales (République démocratique du Congo)	Université
76	ESA : Société écologique d'Amérique	Société
77	ESA : Agence spatiale européenne	Gouvernement
78	ESRI : Environmental Systems Research Institute, Inc.	Industrie privée
79	ETH Zurich : Institut fédéral de technologie de Zurich (Suisse)	Université
80	FAP : Armée de l'air péruvienne (Pérou)	Gouvernement
81	FAPEAM : Fondation pour la recherche en Amazonie (Brésil)	Gouvernement
82	FAPESP : Fondation de recherche de São Paulo (Brésil)	Gouvernement
83	FAPESPA : Fondation de recherche du Pará (Brésil)	Gouvernement
84	First Technical University, Ibadan (Nigeria)	Université
85	Université de l'Atlantique de Floride	Université
86	Université de l'État de Floride	Université
87	Fondation Eboko	OSC
88	ForêtGEO	OSC
89	ForestPlots.net	OSC
90	FRMi : Forest Resources Management, Inc.	Industrie privée
91	FSC : Forest Stewardship Council (Conseil de bonne gestion forestière)	OSC
92	FUPRO : Organisation nationale des producteurs de noix de cajou (Bénin)	OSC
93	GADD : Groupe d'appui au développement durable (Cameroun)	OSC
94	GATC : Alliance mondiale des collectivités territoriales	Multilatéral
95	GCF-TF : Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts	Multilatéral
96	GEO-TREES	Multilatéral
97	GEOGLAM : Groupe sur l'observation de la Terre Initiative de surveillance mondiale de l'agriculture	OSC
98	Geoidindigena	OSC
99	Université George Mason	Université
100	Institut de technologie de Géorgie	Université
101	GFZ-Potsdam : Centre de recherche allemand pour les géosciences	Université
102	Université de Gand (Belgique)	Université
103	GLP : Global Land Programme (Programme terrestre mondial)	Société
104	Google	Industrie privée
105	Guna	OSC
106	Université de Harvard	Université
107	HMEI : Princeton High Meadows Environmental Institute (Institut de l'environnement des hautes prairies de Princeton)	Université
108	Université de Howard	Université
109	IBAY-SUP : Institut supérieur des sciences de l'environnement	Université
110	ICOS : Système intégré d'observation du carbone	Multilatéral
111	IFA-Yangambi : L'Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi	OSC
112	IIAP : Institut de recherche de l'Amazonie péruvienne (Pérou)	OSC

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
113	IITA : Institut international d'agriculture tropicale	OSC
114	ILAMB : International Land Model Benchmarking (étalonnage international des modèles terrestres)	OSC
115	INDEFOR-AP : Instituto Nacional de Desarrollo Forestal y Manejo del Sistema de Áreas Protegidas, Guinée équatoriale	Gouvernement
116	Inde Centre national des sciences biologiques	Gouvernement
117	INPA : Institut national de recherche amazonienne (Brésil)	Gouvernement
118	INPE : Institut national de recherche spatiale (Brésil)	Gouvernement
119	INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (France)	Gouvernement
120	INRS : Institut national de la recherche scientifique (Canada)	Université
121	Instituto Araguaia	OSC
122	Instituto Humboldt : Institut de recherche sur les ressources biologiques Alexander von Humboldt	OSC
123	IPAM : Institut de recherche environnementale de l'Amazonie (Brésil)	OSC
124	IPBES : Plate-forme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques	Multilatéral
125	GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat	Multilatéral
126	IRAD : Institut de recherche agricole pour le développement (Cameroun)	Gouvernement
127	IRCCB : Centre international de référence Chantal Biya (Cameroun)	OSC
128	IRD : Institut de recherche pour le développement (France)	Gouvernement
129	IRIC : Institut des Relations Internationales du Cameroun	OSC
130	ISDR : Institut supérieur de développement rural de M'Baïki (République centrafricaine)	OSC
131	ISEA-Bengamisa : Institut supérieur d'études agronomiques de Bengamisa (Rép. dém. du Congo)	OSC
132	ISP-Gemena : Institut supérieur d'éducation de Gemena (République démocratique du Congo)	OSC
133	ISTA : Institut supérieur des techniques appliquées (République démocratique du Congo)	OSC
134	UICN : Union internationale pour la conservation de la nature	Multilatéral
135	Université James Cook (Australie)	Université
136	Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne)	Université
137	KU Leuven : Université catholique de Louvain (Belgique)	Université
138	Université de l'État de Kwara (Nigeria)	Université
139	Labosystem s.r.l. (Italie)	Industrie privée
140	LANL : Laboratoire national de Los Alamos	Gouvernement
141	LBNL : Laboratoire national Lawrence Berkeley	Gouvernement
142	LCRP : Liberia Chimpanzee Rescue and Protection (Libéria)	OSC
143	Université de Leiden (Pays-Bas)	Université
144	Université de Leipzig (Allemagne)	Université
145	Université de Lund (Suède)	Université
146	Université de Makererere (Ouganda)	Université
147	Mancomunidad Regional Amazonica	gouvernement
148	MapBiomas (Brésil)	OSC
149	Université Marien Ngouabi (République du Congo)	Université
150	Université de Marymount	Université
151	Institut Max Planck (Allemagne)	OSC
152	Université McGill (Canada)	Université
153	Université Mendel	Université

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
154	Université de l'État du Michigan	Université
155	MINRESI : Ministère camerounais de la recherche scientifique et de l'innovation	Gouvernement
156	MIT : Institut de technologie du Massachusetts	Université
157	Institut Mora (Mexique)	OSC
158	Université de l'État de Morgan	Université
159	MoveBank	Multilatéral
160	Université de l'État de Murray	Université
161	Université royale de Muteesa I (Ouganda)	Université
162	Centre de recherche Ames de la NASA	Gouvernement
163	Action Terre de la NASA	Gouvernement
164	Équipe scientifique ECOSTRESS de la NASA	Multilatéral
165	NASA GISS : Institut Goddard d'études spatiales	Gouvernement
166	Équipe scientifique de la NASA chargée de l'étude de la dynamique des écosystèmes mondiaux (GEDI)	Multilatéral
167	NASA GSFC : Centre de vol spatial Goddard	Gouvernement
168	Récolte de la NASA	Multilatéral
169	Initiative de la NASA en faveur des populations autochtones	Gouvernement
170	NASA JPL : Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Université
171	NASA LRC : Langley Research Center	Gouvernement
172	NASA MSFC : Centre de vol spatial Marshall	Gouvernement
173	Équipe scientifique de l'Observatoire orbital du carbone (OCO) de la NASA	Multilatéral
174	Équipe scientifique SMAP (Soil Moisture Active Passive) de la NASA	Multilatéral
175	Équipe scientifique de la NASA chargée de la biologie et de la géologie de surface (SBG)	Multilatéral
176	Agence nationale des parcs nationaux (Gabon)	Gouvernement
177	Université nationale agraire (Pérou)	Université
178	Fondation nationale des peuples autochtones (FUNAI)	OSC
179	École nationale des forêts (Cameroun)	Gouvernement
180	National Geographic Society	OSC
181	Université nationale de Taïwan (Taïwan)	Université
182	Université nationale de Guinée équatoriale (Guinée équatoriale)	Université
183	Université nationale de Saint Antoine l'Abbé à Cuzco (Pérou)	Université
184	Université nationale de Singapour (Singapour)	Université
185	Université nationale d'Ucayali (Pérou)	Université
186	Collectif Nature Tech	OSC
187	NAU : Université de l'Arizona du Nord	Université
188	NCBS : National Centre for Biological Sciences (Inde)	Gouvernement
189	NCSU : Université d'État de Caroline du Nord	Université
190	NEON : Réseau national d'observatoires écologiques des États-Unis	Gouvernement
191	Musée du Nouveau-Brunswick (Canada)	Gouvernement
192	Université de New York	Université
193	NICFI : Initiative internationale de la Norvège sur le climat et les forêts	Gouvernement
194	NIOO-KNAW : Institut néerlandais d'écologie (Pays-Bas)	OSC
195	Laboratoire de surveillance mondiale de la NOAA	Gouvernement
196	NSF : National Science Foundation (Fondation nationale pour la science)	Gouvernement
197	OceanExpert	OSC

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
198	Université officielle de Bukavu (République du Congo)	Université
199	Université de l'État de l'Ohio	Université
200	Réserve de faune à okapis (Rép. dém. du Congo)	Gouvernement
201	Université d'État de l'Oklahoma	Université
202	Université Omar Bongo (Gabon)	Université
203	ONACC : Observatoire national du changement climatique (Cameroun)	Gouvernement
204	Université de l'État de l'Oregon	Université
205	ORNL : Laboratoire national d'Oak Ridge	Gouvernement
206	OSFAC : Observatoire satellitaire des forêts d'Afrique centrale	OSC
207	Gouvernement local du district de Pakwach (Ouganda)	Gouvernement
208	PAUWES : Institut universitaire panafricain des sciences de l'eau et de l'énergie	Université
209	Université de l'État de Pennsylvanie	Université
210	Piriati Emberá	OSC
211	Planète	Industrie privée
212	Planet One-Mboa Hub	OSC
213	PNNL : Laboratoire national du Pacifique Nord-Ouest	Gouvernement
214	Proforest (Royaume-Uni)	OSC
215	PUCP : Université catholique pontificale du Pérou (Pérou)	Université
216	Pueblo de Jemez	OSC
217	R2FAC : Réseau de Recherche sur les Forêts d'Afrique Centrale	Multilatéral
218	Connexion à la forêt tropicale	OSC
219	Rainbow Environment Consult (Cameroun)	Industrie privée
220	Rainforest Foundation Norvège	OSC
221	RAPEE : Réseau africain pour la promotion de l'éducation à l'environnement (Cameroun)	Gouvernement
222	Gouvernement régional d'Amazonas (Pérou)	Gouvernement
223	Gouvernement régional de Caqueta (Pérou)	Gouvernement
224	Gouvernement régional de Huanuco (Pérou)	Gouvernement
225	Gouvernement régional de Loreto (Pérou)	Gouvernement
226	Gouvernement régional de Madre de Dios (Pérou)	Gouvernement
227	Gouvernement régional de Piura (Pérou)	Gouvernement
228	Gouvernement régional de San Martin (Pérou)	Gouvernement
229	Gouvernement régional d'Ucayali (Pérou)	Gouvernement
230	REPALEAC : Réseau des populations autochtones et locales pour la gestion durable des écosystèmes forestiers en Afrique centrale	OSC
231	RIFFEAC : Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale de l'Afrique Centrale	Gouvernement
232	RIOFAC : Projet Renforcement et Institutionnalisation de l'OFAC	OSC
233	RRI : Initiative sur les droits et les ressources	Multilatéral
234	Université Rutgers	Université
235	Université d'État de San Diego	Université
236	Université d'État de San Francisco	Université
237	Satelligence	Industrie privée
238	Schmidt Sciences	Donateur
239	Science Systems and Applications Inc.	Industrie privée
240	SERFOR : Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre, Pérou	Gouvernement
241	SERNANP : Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, Pérou	Gouvernement

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
242	SERVIR	Multilatéral
243	SGN : Senckenberg - Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research (Institut Leibniz pour la biodiversité et la recherche sur le système terrestre)	OSC
244	SIG : Groupe d'informatique spatiale	Industrie privée
245	SMACON : Small Mammal Conservation Organization (Organisation pour la conservation des petits mammifères)	OSC
246	Institution Smithsonian	Gouvernement
247	Université d'État du Dakota du Sud	Université
248	Institut de recherche du Sud-Ouest	OSC
249	Spark Climate Solutions	Industrie privée
250	SPCB : Science Panel for the Congo Basin (Groupe scientifique pour le bassin du Congo)	OSC
251	SPUN : Société pour la protection des réseaux souterrains	OSC
252	STA : Actions tropicales durables	OSC
253	Université de Stanford	Université
254	STRI : Institut de recherche tropicale Smithsonian	Gouvernement
255	Centre de recherche sur l'eau de Stroud	OSC
256	SURUDEV : Course au développement durable des Nations unies	Multilatéral
257	Université suédoise des sciences agricoles, Uppsala	Université
258	Sylvera	Industrie privée
259	TERRA : Centre d'enseignement et de recherche (Belgique)	OSC
260	Université A&M du Texas	Université
261	La Fondation David et Lucile Packard	Donateur
262	La Fondation Gordon & Betty Moore	Donateur
263	Université nationale de Colombie (Colombie)	Université
264	TINTA : Le ThreAd INvisible	OSC
265	TotalEnergies (Ouganda)	Industrie privée
266	Université de Tulane	Université
267	UAB : Université autonome de Barcelone (Espagne)	Université
268	UAC : Université d'Abomey-Calavi (Bénin)	Université
269	UB : Université du Burundi (Burundi)	Université
270	UCC : Université catholique du Congo	Université
271	UCL : University College London	Université
272	UCLouvain : Université catholique de Louvain (Belgique)	Université
273	UEA : Université d'État de l'Amazonas (Brésil)	Université
274	UFC : Université fédérale de Ceará (Brésil)	Université
275	UFRJ : Université fédérale de Rio de Janeiro (Brésil)	Université
276	UFSC : Université fédérale de Santa Catarina (Brésil)	Université
277	UFSM : Université fédérale de Santa Maria (Brésil)	Université
278	UFVJM : Université fédérale de Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Brésil)	Université
279	UK Center of Ecology & Hydrology (Royaume-Uni)	OSC
280	UK FCDO : Foreign, Commonwealth & Development Office (Bureau des affaires étrangères, du Commonwealth et du développement)	Gouvernement
281	UK NERC : Natural Environment Research Council (Conseil de recherche sur l'environnement naturel)	Gouvernement
282	UL : Université de Lorraine (France)	Université
283	ULB : Université libre de Bruxelles (Belgique)	Université

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
284	ULiège : Université de Liège (Belgique)	Université
285	UMR EcoFoG : Écologie des forêts de Guyane (France)	Multilatéral
286	FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture	Multilatéral
287	UN SDSN : Réseau des Nations unies pour les solutions en matière de développement durable	Multilatéral
288	UN-SDSN : Réseau des Nations unies pour les solutions en matière de développement durable	Multilatéral
289	UNA : Université nationale d'agriculture (Bénin)	Université
290	UNAM : Université nationale autonome du Mexique (Mexique)	Université
291	UNAMAD : Université nationale amazonienne de Madre de Dios (Pérou)	Université
292	UNAP : Université nationale de l'Amazonie péruvienne (Pérou)	Université
293	UnB : Université de Brasília (Brésil)	Université
294	PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement	Multilatéral
295	UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture	Multilatéral
296	UNGE : Université nationale de Guinée équatoriale (Guinée équatoriale)	Université
297	UNIKIN : Université de Kinshasa (République démocratique du Congo)	Université
298	UNIKIS : Université de Kisangani (République démocratique du Congo)	Université
299	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement	Université
300	Université de Buffalo	Université
301	Université d'Aberdeen (Royaume-Uni)	Université
302	Université d'Alabama Huntsville	Université
303	Université de l'Alberta	Université
304	Université de l'Arizona	Université
305	Université de l'Arkansas	Université
306	Université de Bamenda, Cameroun	Université
307	Université de Bangui	Université
308	Université de Berne	Université
309	Université de Bordeaux	Université
310	Université de Buea, Cameroun	Université
311	Université de Californie, Berkeley	Université
312	Université de Californie, Davis	Université
313	Université de Californie, Irvine	Université
314	Université de Californie, Los Angeles	Université
315	Université de Californie, Merced	Université
316	Université de Californie, Santa Barbara	Université
317	Université de Californie, Santa Cruz	Université
318	Université de Campinas	Université
319	Université du Cap	Université
320	Université de Charleston	Université
321	Université du Colorado Boulder	Université
322	Université de Copenhague	Université
323	Université du Delaware	Université
324	Université de Delhi (Inde)	Université
325	Université de Douala (Cameroun)	Université
326	Université de Dschang (Cameroun)	Université
327	Université d'Édimbourg (Royaume-Uni)	Université

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
328	Université de l'énergie et des ressources naturelles (Ghana)	Université
329	Université d'Exeter (Royaume-Uni)	Université
330	Université de Floride	Université
331	Université de Géorgie	Université
332	Université de Hong Kong (Chine)	Université
333	Université d'Ibadan (Nigeria)	Université
334	Université de l'Idaho	Université
335	Université de l'Illinois Urbana-Champaign	Université
336	Université de Jambi (Indonésie)	Université
337	Université de Kindu (République du Congo)	Université
338	Université de Leeds (Royaume-Uni)	Université
339	Université de Maroua (Cameroun)	Université
340	Université du Maryland	Université
341	Université de Miami	Université
342	Université du Michigan	Université
343	Université du Minnesota	Université
344	Université du Montana	Université
345	Université du New Hampshire	Université
346	Université de la Nouvelle-Orléans	Université
347	Université de Ngaoundéré (Cameroun)	Université
348	Université de Caroline du Nord à Chapel Hill	Université
349	Université de Notre Dame	Université
350	Université de l'Oklahoma	Université
351	Université d' Oxford	Université
352	Université de Pretoria (Afrique du Sud)	Université
353	Université de Porto Rico - Rio Piedras	Université
354	Université du Rwanda (Rwanda)	Université
355	Université des sciences et technologies de Masuku (Gabon)	Université
356	Université de Californie du Sud	Université
357	Université du Rosaire (Colombie)	Université
358	Université de Tokyo (Japon)	Université
359	Université de Tolima (Colombie)	Université
360	Université de l'Utah	Université
361	Université du Vermont	Université
362	Université de Victoria (Canada)	Université
363	Université de Virginie	Université
364	Université de Washington	Université
365	Université du Wisconsin	Université
366	Université de Yaoundé I (Cameroun)	Université
367	UNP : Université nationale de Piura (Pérou)	Université
368	UNTRM : Université nationale Toribio Rodríguez de Mendoza (Pérou)	Université
369	Ambassade des États-Unis au Cameroun	Gouvernement
370	Centre américain des gaz à effet de serre (GES)	Gouvernement
371	Laboratoire de recherche navale des États-Unis	Gouvernement
372	Département d'État américain	Gouvernement

#	ORGANISATION/INSTITUTION	TYPE
<b>373</b>	USAID : Agence américaine pour le développement international	Gouvernement
<b>374</b>	USDA : Département de l'agriculture des États-Unis	Gouvernement
<b>375</b>	USFS-IP : Programme international de l'US Forest Service	Gouvernement
<b>376</b>	USGS : US Geological Survey (Service géologique des États-Unis)	Gouvernement
<b>377</b>	USP : Université de São Paulo (Brésil)	Université
<b>378</b>	USTM : Institut National Supérieur d'Agronomie et de Biotechnologie	OSC
<b>379</b>	UTEC : Université d'ingénierie et de technologie (Pérou)	Université
<b>380</b>	Université d'Utrecht (Pays-Bas)	Université
<b>381</b>	UTRGV : Université du Texas Rio Grande Valley	Université
<b>382</b>	UZH : Université de Zurich (Suisse)	Université
<b>383</b>	Université de Wageningen (Pays-Bas)	Université
<b>384</b>	Université de Wake Forest	Université
<b>385</b>	Université de Washington	Université
<b>386</b>	WCS : Wildlife Conservation Society (Société pour la conservation de la vie sauvage)	OSC
<b>387</b>	Université de Virginie occidentale	Université
<b>388</b>	Université de Wilkes	Université
<b>389</b>	Wits : Université de Witwatersrand, Johannesburg (Afrique du Sud)	Université
<b>390</b>	Centre de recherche climatique Woodwell	OSC
<b>391</b>	Banque mondiale	Multilatéral
<b>392</b>	Wounaan	OSC
<b>393</b>	WRI : Institut des ressources mondiales	OSC
<b>394</b>	WWF : Fonds mondial pour la nature	OSC
<b>395</b>	Académie Wyss pour la nature	Université
<b>396</b>	Université de Yale	Université

## D. Activités de recherche et de surveillance prévues et en cours

**Tableau D-1.** Projets et programmes de recherche et de surveillance prévus et en cours sous les tropiques qui pourraient contribuer à PANGEA.

NOTE : Cette liste n'est pas exhaustive. A : Projet ou programme d'évaluation. E : Éducation. L : Programme ou projet à long terme, continu, susceptible de se poursuivre pendant le PANGEA. M : Projet ou programme de surveillance. R : Projet ou programme de recherche. T : Tentative, non encore confirmée.

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
1000 PAYSAGES POUR 1 MILLIARD DE PERSONNES	Philanthropie	Colombie, Équateur, Fidji, Guyane, Kenya, Indonésie, Mexique, Namibie, Nicaragua, Pérou, Afrique du Sud	Mondial	L	2019-en cours
2eFOR	Varié	25 pays	Pantropical	M,L	1990-en cours
AFR100 : INITIATIVE DE RESTAURATION DES PAYSAGES FORESTIERS AFRICAINS	Agence de développement de l'Union africaine (AUDA) - NEPAD	Afrique	Afrique	L	2015-en cours
AFRISAR I	ESA, NASA	Gabon	Afrique	R	2016
AFRISAR II	ESA, NASA	Gabon, Ghana, Cameroun, RDC, République du Congo, Sao Tomé et Principe	Afrique	R	2023-2024
ALIVE (ADVANCED BASELINE IMAGER LIVE IMAGING OF VEGETATED ECOSYSTEMS)	NSF	Amérique latine	Amériques	R	2024-en cours
CAMPAGNE AMAZON ESA-INPE	ESA, INPE	Brésil	Amériques	R	2024-2026
AMAZONIE VS CONGO : COMPRENDRE LES DIFFÉRENCES INTERCONTINENTALES DES RÉPONSES DES FORêTS TROPICALES HUMIDES À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE	Département de l'énergie des États-Unis (DOE)	Amazonie, Congo	Afrique, Amériques	R	2024-2027
AMERIFLUX	DÉPARTEMENT DE L'ENVIRONNEMENT DES ÉTATS-UNIS (DOE)	Amérique du Nord et du Sud	Amériques	M,L	1996-en cours
AMIT (AMAZON INSTITUTE OF TECHNOLOGY)	Fondation Moore, GCF, USAID	Amazon	Amériques	L	2020-en cours
AMMI (AFRICAN MASTERS OF MACHINE INTELLIGENCE)	Facebook, Google	Cameroun, Ghana, Rwanda, Sénégal, Afrique du Sud	Afrique	L	2003-en cours

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>ANDESFLUX</b>	Administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA)	Amazon	Amériques	L	2022-en cours
<b>ANDEX</b>	Programme mondial de recherche sur le climat	Pérou	Amériques	R	2018-2025
<b>ASCEND (ADVANCING SPECTRAL BIOLOGY IN CHANGING ENVIRONMENTS TO UNDERSTAND DIVERSITY)</b>	NASA, NSF	Mondial	Mondial	R	2020-2025
<b>ASIA-AQ (ÉTUDE AÉROPORTÉE ET SATELLITAIRE DE LA QUALITÉ DE L'AIR EN ASIE)</b>	NASA	Philippines, Corée du Sud, Taïwan, Thaïlande	Asie	R	2024
<b>ASIAFLUX</b>	Varié	Asie	Asie	L	1999-en cours
<b>ATFS (ALLIANCE FOR TROPICAL FOREST SCIENCE)</b>	NSF	Pantropical	Pantropical	R, L	2021-2025
<b>ATTO (AMAZON TALL TOWER OBSERVATORY)</b>	Max Planck, gouvernement allemand, etc.	Amazon	Amériques	L	2009-en cours
<b>AVUELO (AIRBORNE VALIDATION UNIFIED EXPERIMENT-LAND TO OCEAN)</b>	NASA	Panama	Amériques	R	2025
<b>AU-DELÀ DU COMPTAGE DES ARBRES</b>	WRI, Planet		Pantropical	R	2024-en cours
<b>BIODIVERSITÉ - UNE NOUVELLE MISSION SPATIALE POUR SURVEILLER LES ÉCOSYSTÈMES À UNE ÉCHELLE FINE</b>	ESA	Mondial	Mondial	T, L	TBD
<b>BIOSCAPE (ÉTUDE DE LA BIODIVERSITÉ DU CAP)</b>	NASA, gouvernement sud-africain, UNESCO, etc.	Afrique du Sud	Afrique	R	2023-en cours
<b>DIVERSITÉ DU CACAO</b>	Pérou : Ministère de l'agriculture et de la pêche, USDA, Cacao Seguro, USAID	Pérou, Équateur, Nicaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala	Amériques	L	2021-en cours
<b>CALEDNA : PROGRAMME D'ADN ENVIRONNEMENTAL DU CONSORTIUM DE GÉNOMIQUE DE CONSERVATION DE L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE</b>	Institut de génomique de l'UCSC, Bureau du président de l'UC, HHMI, Réseau mondial de biodiversité génomique	Californie	Amériques	R	2017-en cours

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>CARBONE-I</b>	NASA	Mondial	Mondial	T	TBD
<b>CARPE (PROGRAMME RÉGIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT EN AFRIQUE CENTRALE)</b>	USAID		Afrique	L	1995-en cours
<b>RÉSEAU DE PARCELLES EN AFRIQUE CENTRALE</b>	IRD	Cameroun, Gabon et RDC	Afrique	R, L	2010-en cours
<b>CLIMA (ALLIANCE POUR LA MODÉLISATION DU CLIMAT)</b>	Schmidt Sciences	ÉTATS-UNIS	Mondial	R	2018-en cours
<b>CoForFunc (COMPOSITION FONCTIONNELLE DE LA FORÊT DU BASSIN DU CONGO)</b>	BiodivERsA, la Commission européenne	Cameroun, République du Congo, République démocratique du Congo	Afrique	R	2023-en cours
<b>COLOMBIE BON (RÉSEAU D'OBSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ)</b>	GIZ	Colombie	Amériques	M,L	2015-en cours
<b>INSTITUT DU BASSIN DU CONGO</b>	NASA, NSF, Philanthropie	Cameroun, République démocratique du Congo, Gabon	Afrique	R, L	2015-en cours
<b>INSTITUT DU BASSIN DU CONGO POUR LA NOUVELLE ÉCONOMIE CLIMATIQUE</b>	États-Unis, France, Allemagne, Bezos Earth Fund, etc.	Cameroun	Afrique	L	2023-en cours
<b>INITIATIVE SCIENTIFIQUE POUR LE BASSIN DU CONGO</b>	Philanthropie	République démocratique du Congo, Gabon, Cameroun et République du Congo	Afrique	L	2024-en cours
<b>CONGOFLUX</b>	Union européenne	République démocratique du Congo	Afrique	L	2021-en cours
<b>CONGOPEAT</b>	UKRI NERC	République démocratique du Congo, République du Congo	Afrique	R	2018-en cours
<b>ÉCHANTILLONNAGE LIDAR NATIONAL EN RDC</b>	WWF	République démocratique du Congo, Gabon, Cameroun et République du Congo	Afrique	R	2012
<b>JUMELAGE NUMÉRIQUE DU SYSTÈME TERRESTRE POUR LES CORRIDORS DE CARBONE ET DE BIODIVERSITÉ EN AFRIQUE CENTRALE</b>	NASA	Afrique centrale	Afrique	R	2025-2027
<b>ED2 : COMMUNAUTÉ DE MODÉLISATION DE LA DÉMOGRAPHIE DES ÉCOSYSTÈMES</b>	Varié	Mondial	Mondial	R	2001-en cours
<b>EDGE</b>	NASA	Mondial	Mondial	T	TBD

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
PROJET D'ÉCOUTE DES ÉLÉPHANTS	Cornell	Afrique centrale et orientale	Afrique	L	1999-en cours
FINANCEMENT HORIZON DE L'UE (PAR EX. CONCERTO)	L'UE	Mondial	Mondial	R	2021-2027
FLUXNET	NASA, DOE, NSF	Mondial	Pantropical	R, L	1997-en cours
FORêtGEO	Smithsonian, Varié	Mondial	Pantropical	R, L	1980-en cours
FORESTPLOTS.NET	ERC, NERC, Philanthropie	Pantropical	Pantropical	R, L	2009-en cours
GCF-TF (GROUPE DE TRAVAIL DES GOUVERNEURS SUR LE CLIMAT ET LES FORêTS)	Philanthropie	Bolivie, Brésil, Colombie, Côte d'Ivoire, Équateur, Espagne, États-Unis, Indonésie, Mexique, Nigeria, Pérou.	Pantropical	L	2008-en cours
GATC : ALLIANCE MONDIALE DES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES MOUVEMENT DES FEMMES FORMATION ET SURVEILLANCE DES DRONES	Philanthropie	Pantropical	Pantropical	R, L	2014-en cours
CAMPAGNE AÉROPORTÉE DE L'INITIATIVE GEDI - ASIE DU SUD-EST	NASA	Asie du Sud-Est	Asie	R	2025
GEM	OTB	Pantropical	Pantropical	R, L	2013-en cours
GEO-TREES	Philanthropie	Mondial	Pantropical	R, L	2024
GEONEX	NASA, NOAA	Mondial	Mondial	M, R	2019-en cours
GFW : GLOBAL FOREST WATCH (OBSERVATOIRE MONDIAL DES FORêTS)	Institut des ressources mondiales	Pantropical	Pantropical	L	2014-en cours
ÉTUDE SUR LA MORTALITÉ DES GRANDS ARBRES DANS LA RÉGION DE GIGANTE-PANTROPICAL	NSF	Brésil, Cameroun, Malaisie, Panama	Pantropical	R	2023-en cours
GLAD : ANALYSE ET DÉCOUVERTE DU TERRITOIRE MONDIAL	NASA, Google, USDA, USGS	Mondial	Mondial	R, L	2013-en cours
ATLAS MONDIAL DES ÉCOSYSTÈMES	Groupe sur l'observation de la Terre (GEO)	Mondial	Mondial	L	2024-en cours

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>GLOBE : APPRENTISSAGE ET OBSERVATIONS À L'ÉCHELLE MONDIALE AU PROFIT DE L'ENVIRONNEMENT</b>	NASA, NSF, NOAA, Département d'État américain	Mondial	Mondial	L	1994-en cours
<b>GOFC-GOLD (GLOBAL OBSERVATIONS OF FOREST COVER AND LAND-USE DYNAMICS - OBSERVATIONS MONDIALES DE LA COUVERTURE FORESTIÈRE ET DE LA DYNAMIQUE DE L'UTILISATION DES SOLS)</b>	NASA, ESA	Mondial	Mondial	L	1997-en cours
<b>GRUAN</b>	Programme mondial de recherche sur le climat (RCRP), CCNUCC	Afrique, Amériques	Afrique, Amériques	L	2008-en cours
<b>GUYAFLUX</b>	INRAE	France (Guyane française)	Amériques	L	2003-en cours
<b>GUYAFOR</b>	CIRAD, ONF, CNRS	France (Guyane française)	Amériques	L	2000-en cours
<b>KADI</b>	Union européenne	Afrique	Afrique	R	2023-en cours
<b>LABORATOIRE TERRE ET CARBONE</b>	Institut des ressources mondiales, Philanthropie	Pantropical	Pantropical	M	2021-en cours
<b>INITIATIVE LATINO-AMÉRICAINE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE / PERU HUB</b>	USAID	Pérou	Amériques	L	2019-en cours
<b>LBA (PHASES 1, 2, 3)</b>	MCTI Brésil, NASA	Amazon	Amériques	L	1998-en cours
<b>MAPBIOMAS</b>	Philanthropie	Amazonie, Indonésie	Amériques, Asie, expansion prévue en Afrique	R, L	2017-en cours
<b>RÉCOLTE DE LA NASA</b>	NASA	Mondial	Mondial	L	2017-en cours
<b>NGEE-TROPIQUES</b>	DOE	ÉTATS-UNIS	Pantropical	R	2015-2028
<b>MOSAÏQUES DE LA PLANÈTE NICFI</b>	NICFI	Pantropical	Pantropical	R	2020-2025

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>OFVI (ONE FOREST VISION INITIATIVE)</b>	Ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche (MESR), Ministère français de l'Europe et des affaires étrangères (MEAE)	République démocratique du Congo, Gabon, République du Congo	Afrique	R, L	2023-en cours
<b>PECAN</b>	NSF, NASA, DOE	Mondial	Mondial	R, L	2011-en cours
<b>PLANÈTE TANNER</b>	Planète	Mondial	Mondial	R, L	2024-en cours
<b>PROGRAMME PPG-CLIAMB</b>	UEA, INPA	Brésil	Amériques	R, L	2009-en cours
<b>PROJET CENTINELA</b>	Planète	Bolivie, Brésil, Costa Rica, République démocratique du Congo, Indonésie	Pantropical	R	2024-en cours
<b>R2FAC (RÉSEAU DE RECHERCHE FORESTIÈRE D'AFRIQUE CENTRALE)</b>	Multi-institutionnel	Cameroun, République centrafricaine, Gabon, République du Congo, République démocratique du Congo, Belgique, France	Afrique	L	2012-en cours
<b>RECCAP2</b>	Agence spatiale européenne, projet international de coordination sur le carbone, projet de l'UE	Mondial	Mondial	R, M	2017-2023
<b>RESSAC</b>	Union européenne	Angola, Burundi, Cameroun, République centrafricaine, Tchad, Guinée équatoriale, République démocratique du Congo, Gabon, République du Congo, Rwanda, Sao Tomé & Principe	Afrique	L	2024-en cours
<b>RUBISCO DOMAIN D'INTÉRÊT SCIENTIFIQUE</b>	DOE	Mondial	Pantropical	L	2011-en cours
<b>ARBRE DU RWANDA</b>	Conseil suédois de la recherche	Rwanda	Afrique	R, L	2021-en cours
<b>SARI (INITIATIVE DE RECHERCHE SUR L'ASIE DU SUD/SUD-EST)</b>	NASA LCLUC	Asie du Sud et du Sud-Est	Asie	R, L	2013-en cours

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>GROUPE SCIENTIFIQUE POUR L'AMAZONIE</b>	UN SDSN	Colombie, Bolivie, Équateur, Pérou, Suriname, Guyane, Guyane française, Brésil et Venezuela.	Amériques	L	2020-en cours
<b>GROUPE SCIENTIFIQUE POUR LE CONGO</b>	UN SDSN	Cameroun, République centrafricaine, Gabon, République démocratique du Congo, République du Congo, Guinée équatoriale	Afrique	L	2023-en cours
<b>SE.PLAN</b>	FAO (ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE)	Pantropical	Pantropical	M, L	2016-en cours
<b>SELPER : SOCIÉTÉ LATINO-AMÉRICAINE DE TÉLÉDÉTECTION ET DE SYSTÈMES D'INFORMATION SPATIALE</b>	Varié	Amérique latine	Amériques	L	1980-en cours
<b>ACTIVITÉS DU HUB SERVIR</b>	NASA, USAID	Amazonie, Amérique centrale, Afrique orientale et australe, Himalaya Hindu Kush, Asie du Sud-Est, Afrique de l'Ouest	Afrique, Amériques, Asie	L	2004-en cours
<b>SILK (SCHOOL FOR INDIGENOUS AND LOCAL KNOWLEDGE)</b>	Institut du Bassin du Congo	Cameroun	Afrique	R, L	2018-en cours
<b>SILVACARBON</b>	USGS	Pantropical	Pantropical	L	2011-en cours
<b>SMAP CAL/VAL EN ASIE DU SUD-EST</b>	NASA	Malaisie	Asie	R	2024-en cours
<b>PAYSAGES DURABLES BRÉSIL</b>	USFS, USAID, DOS, Embrapa	Brésil, Pérou	Amériques	R	2008-2023
<b>SWAMP (PROGRAMME D'ADAPTATION ET D'ATTÉNUATION DES ZONES HUMIDES DURABLES)</b>	USAID, NICFI, Norad, IKI, Philanthropie	Asie-Pacifique, Afrique, Amérique latine et Caraïbes	Pantropical	R, L	2008-en cours
<b>TALLO (BASE DE DONNÉES MONDIALE SUR L'ALLOMÉTRIE DES ARBRES ET L'ARCHITECTURE DES COURONNES)</b>	UKRI NERC	Mondial	Mondial	L	2022-en cours
<b>TERN (RÉSEAU AUSTRALIEN DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES)</b>	Gouvernement australien	Australie	Australie	R, L	2009-en cours

PROJET/PROGRAMME	SPONSOR(S) PRINCIPAL(AUX)	PAYS/RÉGION	CHAMP D'APPLICATION GÉOGRAPHIQUE/CONTINENT	TYPE DE PROJET/PROGRAMME	ANNÉES
<b>TERRABIO</b>	USAID, Alliance of Biodiversity International/CIAT, secteur privé	Amazon	Amériques	M	2023-2034
<b>TERRA-I</b>	Aliance Biodiversity & CIAT, the Nature Conservancy	Amérique latine	Amériques	M	2023-en cours
<b>TMFO</b>	Cirad, CGIAR, FTA, ESA, gouvernement français	Pantropical	Pantropical	L	2017-en cours
<b>TROPICAL FLUXNET-CH<sub>4</sub></b>	Fondation Moore, NSF	Amazonie, Asie du Sud-Est, Botswana	Afrique, Amériques, Asie	R	2021-en cours
<b>RÉSEAU FLUX AFRIQUE DE L'OUEST</b>	AMMA-CATCH Bénin, FairCarboN	Bénin	Afrique	R, L	1997-en cours

## E. Tableau détaillé des mesures PANGEA

**Tableau E-1.** Description des variables écologiques et géophysiques pertinentes pour cette campagne, avec les besoins d'observation correspondants et les moyens d'observation de la Terre existants ou à venir. ET : évapotranspiration ; LST : température de la surface terrestre ; SIF : fluorescence induite par le soleil. **Le texte en violet** indique les satellites d'agences fédérales non américaines. \*Indique les missions qui n'ont pas encore été lancées et/ou qui peuvent encore faire l'objet d'un appel d'offres. \*\* Indique les missions récemment terminées.

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
GPP	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Tours de flux, spectres au niveau des feuilles	Spectroscopie infrarouge	OCO-2/3, <b>TROPOMI</b> , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, <b>Sentinel 5P/5*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CO2M*</b> , GOSAT-2, GOSAT-GW*.	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
ET	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q24-Q26	Tours à flux	Thermique	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , <b>Commercial*</b> , satellites météorologiques GEO	NASA HyTES, MAÎTRE
RESPIRATION DE L'ÉCOSYSTÈME	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q13, Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Tours à flux	Spectroscopie infrarouge	GOES-R ABI, AHI, MTG-I	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
FLUX DE CO <sub>2</sub> ET DE CH <sub>4</sub>	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Tours à flux, mesures en chambre	Hyperspectrale	EMIT, <b>MethaneSat</b> , SBG*, Carbon- i*, CarbonMapper*.	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, NEON AOP, GAO
			Covariance de Foucault aéroportée (AEC)		NASA CARAFE
COLONNE CO /CH /CO <sub>24</sub>	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Spectromètres TCCON, COCCON, EM27/SUN	Spectroscopie infrarouge	OCO-2/3, NASA GHG ESE*, <b>Sentinel-5P/5*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CO2M*</b> , GOSAT-2, GOSAT-GW*.	NASA CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH ) <sub>24</sub>
BIOMASSE AÉRIENNE	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q15,	Données sur les parcelles d'inventaire forestier, balayage laser terrestre	Lidar	GEDI, ICESat-2, <b>MOLI*</b> , EDGE*	NASA LVIS, lidar à faible encombrement (drone et avion)

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
	Q18, Q20, Q22		Radar	Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*	NASA UAVSAR
<b>MORTALITÉ DES ARBRES</b>	Q9, Q11-Q13, Q15, Q17-Q22, Q25, Q27	Répétition des données de l'inventaire forestier	Lidar, Radar, Multispectral	Landsat, Sentinel-1/2, Planet, GEDI, NISAR*, BIOMASS*, EDGE*	Répéter le drone RGB ou lidar
<b>HAUTEUR DE L'AUVENT</b>	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q17-Q22, Q27	Balayage laser terrestre	Lidar	GEDI, ICESat-2, MOLI*, EDGE*	NASA LVIS, lidar à faible encombrement (drone et avion)
<b>HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LA HAUTEUR VERTICALE</b>					
<b>DYNAMIQUE DE LA TROUÉE DE LA CANOPÉE</b>			Radar	NISAR*, Sentinel-1, BIOMASS*	NASA UAVSAR
<b>DIVERSITÉ SPECTRALE</b>	Q5, Q10-Q12, Q15, Q18, Q21, Q27	Spectres au niveau des feuilles	Hyperspectrale	EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, FLEX*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO
<b>DIVERSITÉ FONCTIONNELLE</b>	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q27	Diversité taxonomique des plantes ; caractères des plantes ; IEK, TEK, LEK			
<b>CARACTÉRISTIQUES FOLIAIRES DU COUVERT VÉGÉTAL : LMA, N, P, CA, K, PIGMENTS</b>	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22	Diversité taxonomique des plantes ; traits fonctionnels des plantes			
<b>DIVERSITÉ DE LA FAUNE : PRÉSENCE/ABSENCE, ABONDANCE, MOUVEMENT, INTERACTIONS ENTRE LES ESPÈCES</b>	Q5, Q10-Q12, Q18, Q27	Pièges photographiques ; capteurs bioacoustiques ; suivi des déplacements des animaux ; ADN électronique ; IEK, TEK, LEK ; inventaires des espèces végétales	Hyperspectrale, Lidar, Radar	EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, NISAR*, BIOMASS*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar à faible encombrement
<b>PHÉNOLOGIE</b>	Q2, Q4, Q11-Q15, Q18, Q22, Q27	Phenocams, observations phénologiques à long terme au sol ; IEK, TEK, LEK	Radiomètres optiques (RO) et hyperspectraux	Landsat, Sentinel-2, Planet, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SBG*, CHIME*, FLEX*	Répéter le drone RGB
<b>STRESS HYDRIQUE : HUMIDITÉ DU SOL</b>	Q1-Q4, Q6-Q9, Q13-Q19, Q22, Q24, Q25	Sondes d'humidité du sol	Radar/radiométrie à micro-ondes	SMAP, SMOS, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, LSTM*	NASA UAVSAR, AirMOSS
<b>STRESS HYDRIQUE : TENEUR EN EAU DES FEUILLES, CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DES FEUILLES/PLANTES</b>	Q2-Q4, Q6-Q9, Q12-Q19, Q22	Teneur en eau des feuilles, potentiel hydrique et conductance des feuilles/des tiges, VOD sur tour (GNSS en bande L)	GNSS-R/Signaux d'opportunité, Spectroscopie d'imagerie	AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
<b>STRESS THERMIQUE : T50, TEMPÉRATURE DE LA SURFACE TERRESTRE, ÉMISSIVITÉ</b>	Q2-Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q15, Q19	Caméras FLIR	Thermique	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>FLEX*</b> , <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , Commercial*.	NASA HyTES, MAÎTRE
<b>FEU ACTIF</b>	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q23, Q27	Humidité du combustible vivant, humidité du sol, zone de brûlage, gravité du brûlage, IEK, TEK, LEK	Thermique	Landsat, VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , SBG*, <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , Commercial*.	NASA HyTES, MAÎTRE
<b>AÉROSOLS ISSUS DE LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE</b>	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q27	Type de carburant, densité du carburant, mesures d'aérosols	UV/Infrarouge, Photomètres, Lidar	OMPS, VIIRS, EMIT, PACE, <b>OLCI</b> , NISAR*, <b>BIOMASS*</b> , CALIPSO-CALIOP**, AOS*	
<b>UTILISATION ET COUVERTURE DES SOLS</b>	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19-Q20, Q25, Q27	Activité agricole (type de culture, rendement, rotation), sévérité de l'exploitation forestière, pratiques d'incendie, IEK, TEK, LEK, pratiques de gestion de la conservation	Radiomètres optiques (RO), Hyperspectraux, Lidar, Radar	Landsat, <b>Sentinel-2</b> , <b>Planet</b> , VIIRS, <b>OLCI</b> , EMIT, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CarbonMapper*</b> , PACE*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar à faible encombrement
<b>SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES D'APPROVISIONNEMENT ET CULTURELS : ALIMENTATION, EAU DOUCE, MÉDECINE, PRATIQUES SPIRITUELLES ET CÉRÉMONIELLES</b>	Q27	Zones de récolte et rendement des cultures et des PFNL, identification des types de forêts importantes sur le plan culturel et spirituel, quantité et qualité de l'eau.	Radiomètres optiques (RO), Hyperspectraux, Lidar, Radar	Landsat, <b>Sentinel-1/2</b> , <b>Planet</b> , VIIRS, <b>OLCI</b> , EMIT, PACE, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , SWOT, SMAP, <b>SMOS</b> , GRACE-FO, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CarbonMapper*</b> .	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar à faible encombrement
<b>EAUX DE SURFACE : QUANTITÉ, DÉBIT (DÉCHARGE), INONDATION</b>	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Hauteur de la surface de l'eau, étendue de l'inondation, caractérisation du débit	Altimètre, Radar, Radiomètre	SWOT, <b>Sentinel-1</b> , NISAR*, BIOMASS*	NASA UAVSAR
<b>STOCKAGE DES EAUX SOUTERRAINES ET TERRESTRES</b>	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Mesures du puits	Gravimétrique	GRACE-FO, MC*	
<b>HUMIDITÉ ATMOSPHÉRIQUE, VPD</b>	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25, Q27	Station météo	Sondeurs et imageurs à micro-ondes et à infrarouge	ATMS, GeoXO*, AOS*	

VARIABLE(S)	QUESTIONS SCIENTIFIQUES	MESURES AU SOL	TECHNOLOGIES D'OBSERVATION	ACTIFS D'OBSERVATION DE LA TERRE	
				SATELLITE (PRÉVU/PROPOSÉ)	AIRBORNE (DRONE/AVION)
LE VENT	Q1-Q4, Q6, Q7, Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25	Station météo	Lidar à vent Doppler	Aeolus	Mesures par radiosondage
ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET TEXTURE DU SOL	Q21, Q22, Q24, Q25, Q27	Échantillons de sol	Hyperspectrale	ÉMETTRE, RYTHME, SBG*, CARILLON*	NASA AVIRIS-NG/3
				Remarque : PANGEA explorera les relations corrélatives avec des variables télédéTECTées, et non des mesures directes.	
TOPOGRAPHIE/ GÉOMORPHOLOGIE	Q1, Q8, Q19, Q21, Q22, Q24, Q25, Q27		Lidar, Radar	SRTM, <i>Copernicus GLO-30</i>	NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar à faible encombrement

## F. Réponses au retour d'information

Nous sommes reconnaissants pour les commentaires reçus dans les réponses à l'enquête NASA CCE. Nous souhaitons en particulier remercier Alejandro Cueva (El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa), Bruno Ubiali (Université de Géorgie), Christiane Nimpa (Université de Bamenda), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Ing Forestal y del Medio Ambiente), Cyrille Bienvenu Bediang (Université de Bamenda), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Ing Forestal y del Medio Ambiente), Cyrille Bienvenu Bediang (Ministère de l'enseignement secondaire), Gerson Lopes (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), David Carchipulla-Morales (Wake Forest University), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Gobierno Regional Piura, Pérou), Diana Rocio Carvajal-Contreras (Universidad Externado), Jeff Atkins (USDA Forest Service, Southern Research Station), Joe Berry (Carnegie Institution for Science), Joost van Haren (Université de l'Arizona, Biosphère 2), Kyle Dexter (Université de Turin), Lorena Santamaria Rojas (Université de Stanford), Louis Defo (Université de Yaoundé I, Proforest), Luciana Pires (World Environmental Conservancy), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar M Aguilos (North Carolina State University), Ossenatou Mamadou (Université d'Abomey-Calavi), Paul Stoy (University of Wisconsin), Peke Koukou Leon Cest la Vie (Groupement Agropastoral pour le Développement de Yongoro), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), et deux répondants anonymes.

### Processus

Le bureau du cycle du carbone et des écosystèmes de la NASA a demandé des commentaires sur le projet de livre blanc PANGEA par le biais d'une enquête en ligne de 13 questions élaborée par le programme d'écologie terrestre de la NASA. Les commentaires étaient basés sur un projet de livre blanc publié pour examen public en septembre 2024. Les réponses à l'enquête ont été envoyées régulièrement aux responsables de PANGEA tout au long du mois de novembre. Les commentaires de l'enquête ont été largement utilisés pour améliorer le livre blanc final.

Nous répondons d'abord aux commentaires en résumant les points forts et les domaines à améliorer mis en évidence par les répondants à l'enquête, sélectionnés par les auteurs du livre blanc. Nous répondons également point par point aux commentaires de l'enquête. Nous n'enregistrons pas les commentaires pour lesquels la réponse est simplement "oui" ou "non". Dans un nombre limité de cas, un répondant à l'enquête a donné la même réponse à plus d'une question. Nous n'avons répondu qu'une seule fois aux commentaires identiques.

Note sur la traduction : Un nombre limité de personnes ayant répondu à l'enquête ont utilisé le français et l'espagnol. Nous enregistrons leurs commentaires originaux et fournissons [entre crochets] notre traduction.

### Principaux points forts de PANGEA soulignés par les répondants à l'enquête

Citations directes des répondants à l'enquête :

- "PANGEA est un programme de recherche remarquablement ambitieux, mais réalisable, qui permettra de relever l'un des plus grands défis auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui : comprendre les modèles, les processus et l'hétérogénéité qui régissent les forêts tropicales à l'échelle mondiale".
- "Les thèmes scientifiques sont complets et touchent aux aspects les plus importants de la dynamique des écosystèmes tropicaux et de leurs implications climatiques et socio-écologiques. Les lacunes en matière de connaissances et les questions sont clairement identifiées avec l'aide de la communauté.

- "L'effort de collaboration de PANGEA", qui "est une initiative de premier plan qui peut soutenir les stratégies de conservation pour la planète et qui intégrera également des scientifiques du monde entier dans un effort commun pour protéger la biodiversité".
- "L'étude est bien organisée et pluridisciplinaire et présente les études nécessaires pour combler les lacunes dans ces écosystèmes les plus vulnérables au niveau mondial".
- "La structure et le contenu du rapport de l'étude PANGEA sont très clairs. Par exemple, nous comprenons clairement que PANGEA élucidera les modèles de changements récents (5-30 ans) et en cours dans les forêts tropicales, les paysages, la dynamique et les rétroactions, ainsi que leurs variations géographiques, avec une approche environnementale. L'accent est mis sur les comparaisons entre les Amériques et l'Afrique".
- "C'est vraiment adapté aux réalités du terrain.
- "Il s'agit d'une intégration de différents domaines, d'une étude multidisciplinaire.
- "Cette approche est nécessaire pour mieux comprendre et prévoir - simuler - l'impact du changement climatique et de l'utilisation des sols sur le climat et la vie.
- "Ce rapport est complet et bien organisé. L'introduction explique clairement pourquoi cette campagne est nécessaire et opportune. Les lacunes et les questions en matière de connaissances sont bien formulées et serviront de feuille de route pour les recherches futures. Le rapport identifie également les missions satellitaires et les produits de données qui sont essentiels pour répondre aux questions de recherche de la campagne PANGEA".
- "J'ai trouvé que l'accent mis sur les forêts africaines était remarquable ; PANGEA abordera les incertitudes absolument critiques concernant le rôle du continent africain dans le système terrestre, sans exclure le rôle central que joue la forêt tropicale amazonienne.
- "L'accent mis sur les systèmes tropicaux en Afrique est un atout majeur.
- "Le processus PANGEA semble avoir été très délibéré et intentionnel pour inclure les communautés locales, les parties prenantes et les gouvernements lorsque cela était nécessaire. L'inclusion de nombreuses communautés des zones cibles (Amérique du Sud et Afrique centrale) et le processus délibéré d'engagement le démontrent. Il est également clair que les dirigeants de PANGEA engageront également d'autres communautés - qui n'ont pas encore été identifiées - lorsque leur inclusion sera suggérée ou nécessaire à la réussite du projet."
- "L'approche de la diversité et de l'inclusion est très forte.

La plupart des répondants ont attribué une note élevée à la pertinence de PANGEA, notamment en utilisant les termes "excellent", "très bon" et "très pertinent".

Presque toutes les personnes interrogées ont estimé que PANGEA était réalisable, l'une d'entre elles résumant l'essence de ces réponses : "Je trouve que c'est tout à fait réalisable car cela prolonge la recherche LBA fructueuse et des décennies de collaboration avec des chercheurs tropicaux et se concentre sur des forêts tropicales africaines essentielles mais mal comprises, avec un plan d'observation complet." En revanche, une autre personne interrogée a déclaré "La mise en œuvre nécessitera beaucoup de travail, mais sans un plan plus détaillé des sites à utiliser et sur lesquels se concentrer, il est difficile d'évaluer pleinement la faisabilité."

Nous apprécions et approuvons les commentaires qui soulignent l'importance du travail à accomplir si PANGEA est sélectionné. Par exemple, "Il s'agit d'un travail de grande envergure qui nécessitera l'aide et l'exécution de plusieurs groupes de travail ainsi que des natifs des régions à étudier. Après une lecture

attentive, le projet semble bien ficelé. Au fur et à mesure que la recherche se développe, des améliorations spécifiques peuvent être nécessaires, mais dans l'ensemble, la proposition est très bien structurée".

Outre les commentaires positifs, plusieurs faiblesses ont été signalées, que les auteurs du livre blanc PANGEA se sont efforcés de corriger dans le document final. Nos réponses aux réponses à l'enquête demandant de la clarté et identifiant des domaines d'amélioration sont organisées par thème ci-dessous.

## Domaines de l'étude PANGEA nécessitant des améliorations

Les extraits des commentaires originaux sont indiqués en caractères simples. [Les réponses de PANGEA sont en bleu](#).

### Biodiversité :

- "Biodiversidad" [Biodiversité]

*La section 2.2 du livre blanc révisé en profondeur accorde une attention particulière aux thèmes de la biodiversité pertinents pour PANGEA. De nombreuses questions scientifiques spécifiques (par exemple, Q5, Q6 et Q7) se concentrent également sur les questions de biodiversité.*

### Courte fenêtre temporelle :

- "Bien que les effets du changement climatique et de l'action humaine soient pris en compte, le projet a une durée de vie très courte. On ne voit pas la collaboration d'autres scientifiques comme les archéologues. Le fait de ne pas prendre en compte la référence temporelle que l'archéologie de l'Afrique et de l'Amérique latine peut fournir en ce qui concerne les écosystèmes terrestres constitue une limite.
- "Les données paléoécologiques et les informations provenant de l'archéologie africaine et latino-américaine en rapport avec les forêts tropicales nous permettent d'avoir une vision à long terme".

*Le projet s'étend du passé proche (l'ère historique des satellites d'environ 50 ans) à la fin du siècle actuel. Des études archéologiques et paléontologiques amélioreraient sans aucun doute notre perspective, mais les ressources sont limitées dans le cadre du projet et nous avons dû prendre des décisions pratiques pour répondre aux critères de nos sponsors de la NASA.*

### Le processus de collaboration et d'échange n'est pas clair :

- "Il s'agit d'un projet de collaboration entre scientifiques. Il inclut également les connaissances des populations locales et indigènes sur les écosystèmes. Je doute que les populations locales fassent partie de l'équipe de collaboration ou qu'elles soient de simples destinataires des résultats".
- "Donner aux populations locales les moyens d'être plus actives et impliquées, plutôt que de se contenter d'aider et d'embaucher des ouvriers.
- "Le processus de collecte des données et la relation entre les scientifiques aux États-Unis et les communautés en Amérique latine et en Afrique ne sont pas clairs pour moi.

*PANGEA s'est efforcé dès le départ d'impliquer les communautés locales et autochtones, les scientifiques, le personnel gouvernemental et de nombreux autres membres des communautés des tropiques. Le processus de coproduction des connaissances a débuté lors de la définition du champ d'application de PANGEA et de la rédaction du livre blanc, qui a été réalisée en collaboration avec les dirigeants autochtones de l'Alliance mondiale des communautés territoriales (GATC). Si PANGEA est sélectionné, la coproduction avec les peuples autochtones et les*

communautés locales commencera immédiatement et sera maintenue tout au long du processus. L'approche de PANGEA en matière de science équitable, de renforcement des capacités et de formation sera directement confrontée à la question des campagnes de survol et de la science des parachutistes. Sur la base des succès de l'ACL, nous pensons que PANGEA peut publier 100 articles en premier auteur provenant de scientifiques africains, contribuant ainsi à combler le fossé de l'indice de parachutage en Afrique centrale (Culotta et al., 2024). Ces scientifiques africains poursuivront l'héritage de PANGEA, en collaboration avec des pairs internationaux à travers les tropiques, bien après la fin du projet. La section 8 du livre blanc explique notre approche de l'engagement communautaire. La section 10.1.5 explique la composition de l'équipe scientifique. La section 10.2 traite des possibilités de cofinancement, car la NASA ne peut financer que des institutions américaines. La section 10.3 aborde l'approche PANGEA de la science ouverte qui facilitera la transparence et la coopération.

La plupart des répondants à l'enquête ont déclaré avec enthousiasme que PANGEA favorisera des partenariats significatifs avec les parties prenantes (par exemple, les communautés locales et les gouvernements). L'une des personnes interrogées a souligné : "Oui, car PANGEA fournira aux communautés locales des informations qui les aideront à prendre des décisions [sic]."

#### **Séparation des écosystèmes terrestres et aquatiques :**

- "Le fait de séparer les écosystèmes terrestres des écosystèmes aquatiques peut donner une vision biaisée de phénomènes tels que le changement climatique et l'impact de l'homme sur les forêts tropicales en raison de leur interconnexion.

Les systèmes terrestres et aquatiques ne sont pas séparés dans la conception de PANGEA. La façon la plus simple de le montrer est peut-être l'absence de sections spécifiques consacrées aux questions scientifiques terrestres et aquatiques. Ces deux types de questions sont étroitement liés. Les paysages de PANGEA contiendront à la fois des environnements terrestres et aquatiques. En outre, dans nos questions scientifiques 1 et 3, nous établissons implicitement un lien entre les environnements terrestres et aquatiques par le biais des flux latéraux. Dans un autre exemple, la question 21 établit un lien entre les perturbations et la croissance des forêts et les ressources en eau douce.

#### **Engagement de scientifiques internationaux :**

- "D'après ce que j'ai lu, c'est clair et compréhensible. Ce qui n'est pas clair pour moi, c'est comment nous (les non-Américains) pouvons soumettre des projets à la NASA".

La NASA ne peut soutenir que la recherche dans les institutions américaines. Cependant, comme pour le LBA, nous chercherons à associer les études de la NASA à des partenaires locaux qui peuvent accéder à des financements locaux. En outre, nous rechercherons activement des cofinancements auprès d'organisations privées qui sont désormais très actives dans le financement de la recherche environnementale (section 10.2).

#### **Engagement des gouvernements étrangers :**

- "La mise en œuvre des campagnes de recherche sur le terrain ne présente pas de difficultés, à l'exception des relations entre les gouvernements.

Il s'agit d'un défi pour l'ensemble de la recherche internationale. La NASA dispose d'une grande expérience grâce à ses nombreuses campagnes scientifiques sur le terrain et aéroportées. Voir la section 6.2.4 et l'encadré 2.

### **Nécessité d'améliorer la clarté des éléments scientifiques :**

- "Objectif 1 : Caractériser et quantifier les réponses hétérogènes des forêts tropicales aux changements anthropiques. Qu'en est-il de la réponse des forêts tropicales aux perturbations naturelles et climatiques (typhons/ouragans, sécheresses, inondations, glissements de terrain, etc.

*La section 2.5 sur la dynamique des perturbations a été considérablement révisée. Nous traitons maintenant non seulement les perturbations anthropogéniques, mais aussi les perturbations naturelles par le biais des mécanismes énumérés dans le commentaire. En outre, les sections 2.3 et 3.3.2 traitent des inondations.*

- "L'étude PANGEA doit améliorer l'intégration des interactions entre la nature et la société. Les sciences sociales et humaines doivent être davantage prises en considération.

*Le livre blanc révisé comprend des sections substantiellement révisées décrivant les questions clés pour l'étude des systèmes socio-écologiques (SES) (section 2.4). Ce thème scientifique de PANGEA étudiera les interactions et les rétroactions entre les systèmes sociaux et écologiques liés à la production et à la sécurité alimentaires, aux pratiques culturelles, aux moyens de subsistance, aux stratégies de gestion et à la résilience des systèmes tropicaux.*

- "Nous sommes au siècle de l'intelligence artificielle, qui a un impact sur tous les domaines de la vie et même sur la manière dont nous abordons les questions de recherche actuelles et futures. Je pense que cet aspect doit être clairement défini dans le rapport".

*Dans le livre blanc révisé, section 6.3.1, nous abordons directement cette question. Par exemple, PANGEA exploitera les modèles d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique (AI/ML) pour la synthèse des données en raison de leur robustesse dans le traitement des non-linéarités et des interactions entre les processus multifactoriels et les prédicteurs. L'IA/ML peut également être utilisée pour émuler des modèles basés sur des processus et explorer plus efficacement l'espace paramétrique des modèles ou effectuer des prévisions à court/long terme.*

### **Absence d'éléments expérimentaux dans le champ d'application de PANGEA :**

- "La section 3 ne comprend pas d'expériences sur le détournement des précipitations, la fertilisation au CO<sub>2</sub> ou la température, alors que les questions Q8, Q9, Q19 et Q23 dépendent toutes de l'expérimentation pour répondre à ces questions.

*La réponse de PANGEA au programme d'écologie terrestre de la NASA ne prend pas explicitement en compte les expériences sur les grands écosystèmes. Celles-ci sont précieuses et peuvent être cofinancées par d'autres agences ou des donateurs privés, comme ce fut le cas pour l'expérience de sécheresse Seca-Floresta menée dans la forêt nationale de Tapajos, au Brésil, soutenue par des fonds de la NSF dans le cadre du LBA.*

### **Exclusions du champ d'application de PANGEA :**

- "Il nous semble que les forêts tropicales d'Asie du Sud-Est semblent exclues de l'étude PANGEA, alors qu'il s'agit d'écosystèmes forestiers tropicaux et d'une meilleure compréhension de leur fonctionnement. Peut-être que des questions budgétaires, stratégiques ou géopolitiques semblent entrer en jeu ici, mais nous pensons que la prise en compte de toutes les régions forestières tropicales permettrait d'obtenir des résultats plus holistiques et de réaliser des modélisations qui touchent l'ensemble des écosystèmes forestiers tropicaux."

- "Les tropiques secs sont laissés de côté, alors qu'ils sont potentiellement aussi importants pour l'avenir du cycle du carbone terrestre que les tropiques humides, tout en étant moins étudiés et moins bien compris".

Les ressources limitées ne nous permettraient pas de mener des campagnes sur le terrain dans toutes les régions tropicales. Voir la section 1.4 sur le domaine PANGEA. Nous incluons un domaine étendu de forêts humides pantropicales, la zone la plus large d'intérêt scientifique, où des projets supplémentaires peuvent être mis en place par le biais de partenariats, et où des analyses satellitaires et de modélisation seront menées.

Nous ne prétendons pas que les tropiques secs sont sans importance, mais nous avons démontré l'importance des forêts humides dans les cycles mondiaux du carbone et de l'eau. Il est peu probable qu'un autre biome tropical puisse avoir autant d'importance pour le carbone que les forêts humides. Les forêts humides ont un plus grand stockage de carbone et des flux de carbone plus importants que les autres biomes tropicaux.

Dans la section suivante, nous répondons à tous les commentaires des répondants à l'enquête, classés selon les questions de l'enquête (Q1-Q13). Les réponses à l'enquête sont indiquées en caractères simples. Les réponses de PANGEA sont indiquées en bleu. Nous n'avons pas répondu aux questions de l'enquête pour lesquelles la réponse était simplement "oui" ou "non". Les réponses sont généralement organisées en fonction de l'ordre dans lequel elles ont été reçues. Cet ordre ne correspond pas à l'ordre des répondants indiqué au début du présent document. Dans certains cas, les réponses ont été réorganisées afin de pouvoir fournir une réponse unique à des commentaires similaires.

## Q1. Quels sont les principaux points forts de l'étude exploratoire PANGEA ?

1. Je pense que l'effort de collaboration de PANGEA est une initiative de premier plan qui peut soutenir les stratégies de conservation de la planète et intégrer les scientifiques du monde entier dans un effort commun de protection de la biodiversité.
2. *Ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámica de las perturbaciones.* [Cycles biogéochimiques, biodiversité, interactions et rétroactions climatiques, systèmes socio-écologiques et dynamique des perturbations].
3. L'étude est bien organisée et pluridisciplinaire et présente les études nécessaires pour combler les lacunes dans ces écosystèmes les plus vulnérables au niveau mondial.
4. PANGEA utilisera de nouveaux outils pour étudier les forêts tropicales.
5. *C'est sur la collecte des données digitalisées.*
6. Il s'agit d'une intégration de différents domaines, d'une étude multidisciplinaire.
7. Le principal atout de l'étude PANGEA est que l'initiative se concentre sur un domaine où les connaissances sont très lacunaires et où les gouvernements africains n'ont pas les moyens financiers et techniques de travailler.
8. J'ai trouvé que l'accent mis sur les forêts africaines était remarquable ; PANGEA abordera les incertitudes absolument critiques concernant le rôle du continent africain dans le système terrestre, sans exclure le rôle central que joue la forêt tropicale amazonienne.
9. L'un des principaux atouts de l'étude PANGEA réside dans son approche approfondie des lacunes dans notre compréhension des forêts tropicales. L'étude met en évidence le problème de la représentation inadéquate dans les campagnes de terrain, qui conduit à une mauvaise représentation des propriétés

physiques dans la dynamique de l'environnement. PANGEA vise à relever ce défi en mettant en œuvre une campagne multi-échelle pour décrire les processus biogéochimiques dans les forêts tropicales, ce qui constitue un autre point fort important. Les auteurs ont soigneusement étudié les sources de données existantes et ont conçu un plan pour établir des priorités et optimiser la collecte de données, en faisant un usage efficace du temps et des ressources. En outre, PANGEA s'appuie sur l'expérience de la précédente campagne d'écologie terrestre de la NASA, la Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA), et offre la possibilité d'améliorer les modèles mondiaux de la NASA en recueillant des données spatio-temporelles plus complètes sur la dynamique mondiale.

10. La clarté des questions de recherche. L'état actuel des connaissances sur les thèmes à explorer. Les partenaires impliqués dans les différentes régions d'étude. Les perspectives de formation et d'éducation de la prochaine génération de scientifiques.
11. Les thèmes scientifiques sont complets et touchent aux aspects les plus importants de la dynamique des écosystèmes tropicaux et de leurs implications climatiques et socio-écologiques. Les lacunes et les questions en matière de connaissances sont clairement identifiées avec l'aide de la communauté.
12. PANGEA a fait preuve de perspicacité en choisissant de combler les lacunes des campagnes précédentes et en incluant des données presque inexistantes pour certaines forêts tropicales. L'utilisation des satellites devient essentielle pour la plupart des études scientifiques et des prises de décision en matière d'environnement, et leur précision dans ces applications de recherche est donc devenue primordiale. On sait que même la représentation des modèles sur les forêts, en raison de la différence des processus convectifs, présente de grandes difficultés dans les paramétrages, générant des réponses avec des écarts types très importants. Des campagnes mal exécutées et le manque de données spécifiques compliquent encore plus les études existantes. L'analyse et la comparaison des forêts qui présentent des comportements différents seront très utiles à la communauté scientifique pour faire avancer les études sur l'avenir de notre planète. La proposition semble réussir à offrir une opportunité à la nouvelle génération de scientifiques et à proposer la création d'une base de données ouverte. J'ai été très heureuse d'apprendre que cette proposition ouvrirait potentiellement des portes au-delà du monde universitaire et des institutions spatiales, aux décideurs, aux communautés et à toute personne désireuse d'apporter son aide.
13. Les fondements scientifiques, le large champ d'application avec des domaines d'intervention clairs, le plan d'utilisation des satellites bien conçu, le plan de modélisation bien conçu, l'inclusion de nombreuses communautés locales et le plan d'engagement bien conçu, le plan de mise en œuvre et le plan de renforcement des capacités et d'éducation.
14. L'accent est mis sur l'amélioration de l'observation et de la compréhension de certains des écosystèmes les plus méconnus et les plus vulnérables. PANGEA s'attaque à une lacune et à un défi bien connus de la recherche en sciences de la terre : le manque de données et de connaissances sur les tropiques.
15. L'accent mis sur les systèmes tropicaux en Afrique est un atout majeur. L'équipe diversifiée associée au projet est impressionnante, en particulier les compétences diverses et complémentaires des membres de l'équipe. Il y a une forte compréhension des avantages/inconvénients à plusieurs échelles des différentes approches de télédétection présentées. Connaissant bien le travail de nombreux membres de l'équipe, je ne suis pas du tout surpris par cela, mais plutôt enthousiasmé par la façon dont ces questions sont exposées et traitées. L'intégration de multiples sources de données de télédétection peut être compliquée et ce document détaille la manière d'aborder cette question dans le contexte des questions scientifiques d'une manière approfondie et réfléchie qui montre un grand potentiel pour le succès de cette composante du projet. J'aime beaucoup le cadre optimal, de référence et de seuil qui est utilisé tout au long du document. Les tableaux 1 et 4 sont les plus complets de ce type (et les plus

faciles à lire) que j'aie jamais vus. D'après ce que je peux voir, il s'agit d'une prise en compte solide de la collaboration avec les partenaires locaux, ce qui est indispensable pour ce type de science.

16. PANGEA est un programme de recherche remarquablement ambitieux, mais réalisable, qui permettra de relever l'un des plus grands défis auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui : comprendre les modèles, les processus et l'hétérogénéité qui régissent les forêts tropicales à l'échelle mondiale.
17. J'ai pu constater les points forts de l'étude à deux niveaux :
  - a. La première est d'avoir réussi à rassembler une vaste communauté scientifique de plusieurs horizons, voire de tous les horizons de la terre. Tous les scientifiques des pays tropicaux et des autres régions du monde semblent être représentés, ce qui assure la prise en compte de la majorité des points de vue pour aborder les grandes questions qui posent des défis à la bonne compréhension du fonctionnement des écosystèmes tropicaux.
  - b. Le deuxième point fort de l'étude est qu'elle prend en compte les grands enjeux de l'humanité qui sont directement liés au fonctionnement des écosystèmes forestiers tropicaux : c'est un point fort de l'étude exploratoire PANGEA. En effet, le changement climatique (qui englobe de nombreuses autres questions prises en compte dans l'étude, telles que la déforestation, le changement d'affectation des terres, les sécheresses, le cycle du carbone, etc.) et la biodiversité font partie des problèmes majeurs qui posent des défis importants à l'humanité et à la vie sur la planète Terre.
18. PANGEA a fait preuve de perspicacité en choisissant de combler les lacunes des campagnes précédentes et en incluant des données presque inexistantes pour certaines forêts tropicales. L'utilisation des satellites devient essentielle pour la plupart des études scientifiques et des prises de décision en matière d'environnement, et leur précision dans ces applications de recherche est donc devenue primordiale. On sait que même la représentation des modèles sur les forêts, en raison de la différence des processus convectifs, présente de grandes difficultés dans les paramétrages, générant des réponses avec des écarts types très importants. Les campagnes mal exécutées et le manque de données spécifiques compliquent encore plus les études existantes. L'analyse et la comparaison des forêts qui présentent des comportements différents seront très utiles à la communauté scientifique pour faire avancer les études sur l'avenir de notre planète. La proposition semble réussir à offrir une opportunité à la nouvelle génération de scientifiques et à proposer la création d'une base de données ouverte. J'ai été très heureuse d'apprendre que cette proposition ouvrirait potentiellement des portes au-delà du monde universitaire et des institutions spatiales, aux décideurs, aux communautés et à toute personne désireuse d'apporter son aide.
19. Il s'agit du concept développé autour des mesures essentielles optimales, de référence et de seuil nécessaires pour atteindre les objectifs définis, de l'approche inclusive et enfin de l'implication des scientifiques locaux qui garantira la durabilité de l'étude après une telle campagne.
20. Je pense que le projet possède de nombreux atouts, parmi lesquels je pourrais citer des objectifs bien définis qui visent à la fois à faire progresser les connaissances et à améliorer les méthodes de compréhension des forêts tropicales, une équipe nombreuse et compétente, ainsi qu'un éventail d'organisations partenaires qui contribueront à rendre ces idées opérationnelles.
21. Engagement communautaire, perspective transcontinentale et accent mis sur le rôle des flores arborescentes divergentes dans la variabilité intercontinentale de la fonction des écosystèmes.
22. Il s'agit d'un travail d'envergure qui comptera sur l'aide et l'exécution de plusieurs groupes de travail ainsi que sur la participation de personnes originaires des régions concernées par les recherches. Après l'avoir lu attentivement, le projet semble bien ficelé. Au fur et à mesure que la recherche se développe,

des améliorations spécifiques peuvent être nécessaires, mais dans l'ensemble, la proposition est très bien structurée.

Nous apprécions les commentaires ci-dessus mais n'avons pas de réponse directe à y apporter.

## Q2. Quels sont les domaines de l'étude PANGEA qui doivent être améliorés ?

- Il s'agit d'un projet de collaboration entre scientifiques. Il inclut également les connaissances des populations locales et indigènes sur les écosystèmes. Je doute que les populations locales fassent partie de l'équipe de collaboration ou qu'elles soient de simples destinataires des résultats.

PANGEA s'est efforcé dès le départ d'impliquer les communautés locales et autochtones. Le processus de coproduction des connaissances a débuté lors du cadrage de PANGEA et de la rédaction du livre blanc, qui a été réalisé en collaboration avec les dirigeants autochtones de l'Alliance mondiale des collectivités territoriales (GATC). Si PANGEA est sélectionné, la coproduction avec les peuples autochtones et les communautés locales commencera immédiatement et sera maintenue tout au long du processus.

- L'implication des femmes dans les activités de séquestration du carbone.

PANGEA s'est efforcée d'inclure les femmes dans toutes les activités de cadrage. Nous n'abordons pas spécifiquement les activités des femmes dans le domaine de la séquestration du carbone dans notre rapport de cadrage. Il s'agit d'une des nombreuses préoccupations spécifiques qui pourraient émerger des projets de recherche. Notre livre blanc, bien que complet, est encore limité en termes d'espace.

- Sur le plan local national régional international et mondial* [On the local, national, regional, international and global plan].
- Être plus cohérent et plus spécifique en ce qui concerne l'alignement du renforcement des capacités sur le plan d'action du gouvernement africain, page 15 / 61.
- En République démocratique du Congo, par exemple

PANGEA s'est largement engagée en Afrique, en Amérique du Sud et en Asie, comme indiqué à l'annexe C du livre blanc.

- Comment pouvons-nous promouvoir l'intégration interdisciplinaire et comment la population locale sera-t-elle intégrée au projet pour y participer activement ? Comment l'idée d'améliorer la formation, l'éducation et la science se concrétise-t-elle ?

Le livre blanc a été rédigé par une équipe très diversifiée, comme le montre l'annexe C. Nous reconnaissons en particulier l'importance de la diversité de l'équipe pour l'amélioration de la formation et de l'éducation. L'approche de PANGEA en matière de science équitable, de renforcement des capacités et de formation sera directement confrontée à la question des campagnes de survol et de la science des parachutes. Sur la base des succès du LBA, nous pensons que PANGEA peut publier 100 articles en premier auteur provenant de scientifiques africains, contribuant ainsi à combler le fossé de l'indice de parachutage en Afrique centrale (Culotta et al., 2024). Ces scientifiques africains poursuivront l'héritage de PANGEA, en collaboration avec des pairs internationaux à travers les tropiques, bien après la fin du projet.

- Plus d'intérêt pour les interactions entre la nature et les sociétés

Le livre blanc révisé comprend des sections substantiellement révisées décrivant les questions clés pour l'étude des systèmes socio-écologiques (SES) (section 2.4). Ce thème scientifique de PANGEA étudiera les interactions et les rétroactions entre les systèmes sociaux et écologiques liés à la production et à la sécurité alimentaires, aux pratiques culturelles, aux moyens de subsistance, aux stratégies de gestion et à la résilience des systèmes tropicaux.

- Section 3.1.1 Stocks et flux de carbone : Je pense que cette section ne représente pas une limitation sérieuse des approches actuelles de surveillance des écosystèmes terrestres dans les tropiques. Le cycle du carbone dans ces écosystèmes est à peu près équilibré, mais étant donné l'importance des stocks et des flux (GPP, respiration et combustion de la biomasse), de légères modifications de l'équilibre de ces processus pourraient avoir des conséquences importantes sur le bilan global du carbone. Même des mesures parfaites du CO<sub>2</sub> ont peu de chances de fournir des informations utiles sur les processus du cycle du carbone, alors que la capacité prédictive de nos modèles du système terrestre repose sur leur capacité à modéliser la PPG et la respiration. Ces modèles de processus sont peu contraints (voire pas du tout) dans les tropiques par les systèmes de surveillance actuels. Contrairement aux écosystèmes tempérés qui présentent d'importantes variations saisonnières dans l'échange net de CO<sub>2</sub>, les écosystèmes tropicaux présentent peu de variations saisonnières car la PPB et la respiration tendent à être presque égales tout au long de l'année. Par conséquent, le CO<sub>2</sub> atmosphérique est presque constant sous les tropiques, malgré la présence d'énormes flux bruts. En outre, il est difficile de séparer les tendances régionales du "bruit" du cycle du carbone dû aux différences journalières de la nébulosité ou à l'effet de redressement diurne (Denning et al., 1995) sur la concentration de CO<sub>2</sub>.
- Il existe une solution potentielle, le sulfure de carbonyle (OCS). Ce gaz à l'état de trace permet de suivre la PPB alors que le CO<sub>2</sub> permet de suivre l'ENE. Cela s'explique par le fait que l'OCS est absorbé par les feuilles, mais qu'il n'y a pas (ou très peu) de rejets d'OCS par les écosystèmes terrestres. Il y a plusieurs années, nous avons proposé que l'OCS puisse constituer une nouvelle fenêtre sur le cycle du carbone, en particulier sous les tropiques (Berry et al., 2013). Les mesures effectuées par les satellites MIPAS (Stinecipher et al., 2022) et TES (Wang et al., 2023) ont montré un appauvrissement significatif de la concentration d'OCS dans la haute troposphère. Au cours des deux dernières années, le groupe de Luciana Gatti à l'INPE a effectué plus de 800 mesures de l'OCS (ainsi que d'autres gaz à effet de serre) à partir de profils aériens réalisés au-dessus du bassin amazonien. Comme prévu, ces mesures montrent des gradients beaucoup plus importants (10 à 100 fois) dans la concentration relative de l'OCS que dans celle du CO<sub>2</sub>. L'OCS constitue donc une meilleure base pour la réalisation d'inversions atmosphériques et peut fournir des informations directes sur la PPB et la respiration. Les mesures par satellite, les profils d'aéronefs et éventuellement la spectrométrie FT-IR à visée solaire (Hannigan et al., 2021) sont des approches prometteuses pour la mise en place d'un programme de surveillance du cycle du carbone basé sur l'OCS dans les tropiques.

Références :

Berry J, Wolf A, Campbell JE, Baker I, Blake N, Blake D, Denning AS, Kawa SR, Montzka SA, Seibt U, Stimler K. A coupled model of the global cycles of carbonyl sulfide and CO<sub>2</sub> : Une nouvelle fenêtre possible sur le cycle du carbone. *Journal of Geophysical Research : Biogeosciences*. 2013 Jun ; 118(2):842-52. doi:10.1002/jgrg.20068

Denning AS, Fung IY, Randall D. Gradient latitudinal du CO atmosphérique<sub>2</sub> dû à l'échange saisonnier avec le biote terrestre. *Nature*. 1995 Jul 20;376(6537):240-3.

Hannigan JW, Ortega I, Shams SB, Blumenstock T, Campbell JE, Conway S, Flood V, Garcia O, Griffith D, Grutter M, Hase F. Global atmospheric OCS trend analysis from 22 NDACC stations. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*. 2022 Feb 27 ; 127(4). doi:10.1029/2021JD035764

Stinecipher JR, Cameron-Smith P, Kuai L, Glatthor N, Höpfner M, Baker I, Beer C, Bowman K, Lee M, Miller SM, Parazoo N. Remotely sensed carbonyl sulfide constrains model estimates of Amazon primary productivity. *Geophysical Research Letters*. 2022 May 16 ; 49(9). doi:0.1029/2021GL096802

Wang X, Jiang X, Li KF, Liang MC, Kuai L, Tan L, Yung YL. Variations of Carbonyl sulfide during the dry/wet seasons over the Amazon (Variations du sulfure de carbonyle pendant les saisons sèches et humides au-dessus de l'Amazonie). *Geophysical Research Letters*. 2023 Mar 16;50(5):e2022GL101717.

Ce commentaire soulève une question essentielle dans l'étude des forêts tropicales, que nous avons également abordée dans notre livre blanc. Afin de mieux répondre à la question spécifique de l'utilisation de la variation des rapports de mélange atmosphérique du sulfure de carbonyle (COS) pour contraindre la PPB, nous avons inclus l'importance potentielle de cette mesure dans la section 2.2.

- L'un des aspects de l'étude PANGEA qui pourrait être amélioré est l'absence d'une stratégie claire de mise à l'échelle des résultats dans l'espace. Bien que cela puisse dépasser la portée actuelle de l'étude ou être prématuré étant donné qu'il s'agit encore d'une proposition, il est néanmoins important de réfléchir à la manière dont les résultats seront communiqués au grand public. L'un des facteurs clés de la réussite des projets mondiaux tels que MODIS a été leur capacité à distiller la complexité du monde en quelques facteurs principaux. Par exemple, le produit MODIS LAI classe les canopées sur la base de six types de biome, offrant une vision globale simplifiée mais efficace pour les non-experts. Cependant, ces modèles classent ou représentent souvent mal les biomes en raison du manque de données, ce qui souligne l'importance des résultats de PANGEA pour combler ces lacunes.

Les leçons tirées de MODIS sont tout à fait pertinentes. PANGEA fournit un cadre pour la mise à l'échelle et l'intégration des mesures aéroportées et satellitaires avec des observations in situ sur le terrain, des mesures de tour de flux par covariance de Foucault et des modèles pour faire progresser la compréhension scientifique et les capacités de télédétection dans des domaines thématiques qui répondent directement aux objectifs du domaine d'intérêt du cycle du carbone et des écosystèmes de la NASA, en accord avec les domaines d'intérêt du cycle de l'eau et de l'énergie et de la variabilité et du changement climatiques. PANGEA établira un réseau de campagnes coordonnées sur le terrain et aéroportées réparties dans des écosystèmes forestiers tropicaux ciblés afin de combler les lacunes en matière de données et de permettre une mise à l'échelle entre les ensembles de données de terrain et de télédétection, ainsi qu'une modélisation à l'échelle régionale et pantropicale. Comme l'indique le commentaire, des approches spécifiques de mise à l'échelle seront développées dans le cadre du plan d'expérience concis et par le biais des propositions et des activités de l'équipe scientifique.

- En ce qui concerne la dynamique du carbone, je vois trois domaines clés qui doivent être améliorés :
  - Manque de mesures aériennes des gaz à l'état de traces pour établir le bilan carbone à l'échelle du bassin

- Absence de plan concret pour quantifier les composantes du flux de carbone à l'échelle du bassin, à savoir la photosynthèse, la respiration et les émissions dues aux incendies
  - Manque d'attention pendant la saison des pluies
- Ces domaines manquants sont essentiels pour l'objectif déclaré de PANGEA, qui est de "limiter l'incertitude des modèles pour les futures prévisions de flux de carbone tropical" (ligne 312, page 10).
- La composante scientifique aéroportée de PANGEA se concentre actuellement exclusivement sur les observations de télédétection aéroportées (Section 6.2.3, page 64) sans mentionner les observations de gaz à l'état de traces (par exemple, CO<sub>2</sub>, CO, et CH<sub>4</sub>) pour informer la quantification du flux de carbone à l'échelle continentale. Sans ces mesures, il est peu probable que nous réduisions la grande incertitude du bilan net de carbone à l'échelle du bassin et des composantes du flux de carbone ou que nous transformions la compréhension de la dynamique du carbone à l'échelle continentale au-dessus des tropiques. Il convient de noter que certaines inversions atmosphériques mondiales assimilent déjà les concentrations moyennes de CO<sub>2</sub> observées par satellite (par exemple, OCO-2 MIP). Ces inversions présentent des incertitudes plus importantes dans les tropiques qu'aux latitudes moyennes, en raison de la couverture nuageuse fréquente pendant la saison humide, de la saisonnalité plus faible et du signal plus faible des flux nets de carbone, ainsi que de l'absence de réseaux de tours in situ et d'observations aériennes. Si PANGEA se contente d'utiliser exclusivement les concentrations moyennes de CO<sub>2</sub> observées par satellite pour contraindre le bilan carbone de l'Amazonie et de l'Afrique tropicale, il n'y aura aucun progrès par rapport à l'état actuel du domaine, et il s'agit pour moi d'une occasion manquée.
- J'aimerais également souligner que les mesures aériennes de gaz à l'état de traces ont joué un rôle clé dans les campagnes de terrain précédentes de la NASA, telles que les mesures du profil vertical de Manaus pendant le LBA (<https://doi.org/10.3334/ORNLDAC/1175>) et les mesures aériennes de gaz à l'état de traces de CARVE et Arctic-CAP pendant ABoVE (Sweeney et al., 2022). Ces mesures de gaz à l'état de traces permettent d'identifier d'importantes émissions de méthane dans l'est de l'Amazonie (Miller et al., 2007) et dans la région boréale de l'Alaska (Chang et al., 2014) et révèlent des schémas de photosynthèse et de respiration à l'échelle du biomonde, qui diffèrent des simulations de modèles de la biosphère terrestre (Commane et al., 2017 ; Hu et al., 2021). Les problèmes posés par les observations satellitaires des gaz à effet de serre dans les tropiques (Frankenberg et al., 2024) devraient inciter à multiplier les observations aériennes des gaz à l'état de traces pour compléter la vision des satellites. Il est vrai que PANGEA ne répétera pas nécessairement ce que LBA et ABoVE ont fait, mais étant donné la pénurie de mesures in situ des gaz à l'état de traces en provenance d'Amazonie et d'Afrique tropicale, il serait négligent de ne pas prendre en compte les valeurs uniques des mesures aériennes des gaz à l'état de traces pour la recherche sur le cycle du carbone.
- PANGEA peut également aider à identifier les institutions locales qui collaborent à la collecte des mesures de gaz à l'état de traces dans l'air. Par exemple, une grande partie des progrès récents dans la compréhension du bilan carbone de l'Amazonie est basée sur des mesures aériennes de gaz à l'état de traces collectées par le groupe de Luciana Gatti à l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais du Brésil (Gatti et al., 2014, 2021, 2023). Cela signifie que PANGEA n'aura peut-être pas besoin de partir de zéro pour ces mesures ; il existe déjà des partenaires locaux sur lesquels s'appuyer. Il semble essentiel de tirer parti des partenariats locaux pour faciliter les mesures aériennes de gaz à l'état de traces à forte intensité de main-d'œuvre, qui sont essentielles à la compréhension de la dynamique du carbone à l'échelle du bassin.

L'un des obstacles à l'utilisation efficace des données satellitaires actuelles sur l'abondance totale de la colonne pour les gaz à l'état de traces est le manque de données d'étalonnage et de validation efficaces dans les tropiques (section 3.1.1). Le commentaire préconise des mesures aériennes supplémentaires des gaz à l'état de traces, ce que nous reconnaissons dans la section 3.1.1.

- Dans le même ordre d'idées, rien n'indique non plus comment les campagnes de télédétection aérienne et les observations par satellite prévues contribueront à résoudre le problème de la séparation de la photosynthèse et de la respiration du bilan net du carbone. Il est important de quantifier séparément la photosynthèse et la respiration parce qu'elles réagissent différemment au climat et que cette question a été au cœur de l'incertitude des modèles dans les projections futures du cycle du carbone sous les tropiques. Les mesures de la concentration et du flux de CO<sub>2</sub> ne peuvent pas contraindre de manière unique la photosynthèse et la respiration en même temps. Bien que le livre blanc de PANGEA cite la fluorescence de la chlorophylle induite par le soleil (SIF) comme un indicateur de la photosynthèse, la SIF ne peut pas contraindre l'ampleur de l'assimilation du carbone photosynthétique parce que les modèles actuels basés sur la SIF reposent tous sur des relations statistiques au niveau du site entre la SIF et la photosynthèse. Des observations simultanées d'une série de gaz traces du cycle du carbone, y compris les isotopes du carbone et de l'oxygène (13C- CO<sub>2</sub> et 18O- CO<sub>2</sub>), le sulfure de carbonyle et le monoxyde de carbone, sont nécessaires pour contraindre pleinement les principales composantes du flux de carbone et informer les processus du cycle du carbone dans les modèles. Il y a eu des exemples réussis d'utilisation des mesures de gaz à l'état de traces de CARVE pour contraindre séparément la photosynthèse et la respiration dans le domaine ABoVE (Hu et al., 2021 ; Kuai et al., 2022), ce qui n'est donc pas impossible.

Comme indiqué dans la réponse au point (9) ci-dessus, nous avons pris en compte le sulfure de carbonyle. En outre, nous avons cité le CO, le COS et les isotopes parmi les mesures potentielles permettant de résoudre les questions relatives à la répartition du carbone.

- Mon dernier point pour cette question concerne la saison des pluies. Je ne comprends pas que PANGEA limite les mesures au "début de la saison sèche" et à la "fin de la saison sèche" sans envisager des mesures continues tout au long des saisons sèches et humides (lignes 477-484, page 15). Tout d'abord, nous n'aurons pas une connaissance précise du bilan carbone d'une région tropicale si nous avons des lacunes dans les mesures la moitié du temps. Deuxièmement, la vision limitée de la dynamique du carbone pendant la saison humide à partir des satellites de mesure des gaz à effet de serre (Frankenberg et al., 2024) devrait nécessiter davantage de mesures pendant la saison humide, et non pas moins. Troisièmement, les perturbations de la saison humide, telles que le chablis des arbres, sont des voies majeures de perte de biomasse aérienne. Même s'il existe des problèmes logistiques liés à la saison des pluies, le fait de ne pas tenir compte de ce facteur est une fois de plus une occasion manquée.

La terminologie "début de la saison sèche" et "fin de la saison sèche" prêtait à confusion et nous l'avons donc modifiée. L'intérêt du calendrier de la campagne est de capturer la forêt lorsqu'elle est physiologiquement bien arrosée (fin de la saison des pluies) et au moment où elle subit le plus grand stress hydrique (fin de la saison sèche). Afin d'équilibrer les coûts et les bénéfices des missions aériennes pour les observations de télédétection de surface utilisant des capteurs optiques, nous pensons qu'il est prudent d'éviter le pic de la saison des pluies. Cependant, nous avons souligné l'importance des mesures continues sur les sites de terrain pour couvrir l'éventail

des conditions saisonnières. En outre, nous préconisons le potentiel des mesures par drone pour fournir également une couverture saisonnière sur des zones limitées.

## Références

- Chang, R. Y.-W., Miller, C. E., Dinardo, S. J., Karion, A., Sweeney, C., Daube, B. C., Henderson, J. M., Mountain, M. E., Eluszkiewicz, J., Miller, J. B., Bruhwiler, L. M. P., & Wofsy, S. C. (2014). Les émissions de méthane de l'Alaska en 2012 à partir des observations aéroportées CARVE. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(47), 16694-16699. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412953111>
- Commane, R., Lindaas, J., Benmergui, J., Luus, K. A., Chang, R. Y.-W., Daube, B. C., Euskirchen, E. S., Henderson, J. M., Karion, A., Miller, J. B., Miller, S. M., Parazoo, N. C., Randerson, J. T., Sweeney, C., Tans, P., Thoning, K., Veraverbeke, S., Miller, C. E., & Wofsy, S. C. (2017). Sources de dioxyde de carbone de l'Alaska entraînées par l'augmentation de la respiration au début de l'hiver de la toundra arctique. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(21), 5361-5366. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618567114>
- Frankenberg, C., Bar-On, Y. M., Yin, Y., Wennberg, P. O., Jacob, D. J. et Michalak, A. M. (2024). La sécheresse des données dans les tropiques humides : Comment surmonter la barrière des nuages dans la télédétection des gaz à effet de serre. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL108791. <https://doi.org/10.1029/2024GL108791>
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., & Lloyd, J. (2014). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements (Sensibilité à la sécheresse du bilan carbone de l'Amazonie révélée par des mesures atmosphériques). *Nature*, 506(7486), 76-80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change (L'Amazonie en tant que source de carbone liée à la déforestation et au changement climatique). *Nature*, 595(7867), 388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gatti, L. V., Cunha, C. L., Marani, L., Cassol, H. L. G., Messias, C. G., Arai, E., Denning, A. S., Soler, L. S., Almeida, C., Setzer, A., Domingues, L. G., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Correia, C. S. C., Tejada, G., Neves, R. A. L., Rajao, R., Nunes, F., ... Machado, G. B. M. (2023). L'augmentation des émissions de carbone en Amazonie est principalement due au déclin de l'application de la loi. *Nature*, 621(7978), 318-323. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06390-0>
- Hu, L., Montzka, S. A., Kaushik, A., Andrews, A. E., Sweeney, C., Miller, J., Baker, I. T., Denning, S., Campbell, E., Shiga, Y. P., Tans, P., Siso, M. C., Crotwell, M., McKain, K., Thoning, K., Hall, B., Vimont, I., Elkins, J. W., Whelan, M. E. et Suntharalingam, P. (2021). COS-derived GPP relationships with temperature and light help explain high-latitude atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal cycle amplification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(33), e2103423118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2103423118>

Kuai, L., Parazoo, N. C., Shi, M., Miller, C. E., Baker, I., Bloom, A. A., Bowman, K., Lee, M., Zeng, Z., Commane, R., Montzka, S. A., Berry, J., Sweeney, C., Miller, J. B., & Yung, Y. L. (2022). Quantifying Northern High Latitude Gross Primary Productivity (GPP) Using Carbonyl Sulfide (OCS). *Global Biogeochemical Cycles*, 36(9). <https://doi.org/10.1029/2021GB007216>

Miller, J. B., Gatti, L. V., d'Amelio, M. T. S., Crotwell, A. M., Dlugokencky, E. J., Bakwin, P., Artaxo, P. et Tans, P. P. (2007). Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 34(10), 2006GL029213. <https://doi.org/10.1029/2006GL029213>

Sweeney, C., Chatterjee, A., Wolter, S., McKain, K., Bogue, R., Conley, S., Newberger, T., Hu, L., Ott, L., Poulter, B., Schiferl, L., Weir, B., Zhang, Z. et Miller, C. E. (2022). Utilisation des profils verticaux des gaz traces atmosphériques pour évaluer les flux des modèles : A case study of Arctic-CAP observations and GEOS simulations for the ABoVE domain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(9), 6347-6364. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6347-2022>

- Je n'ai pas bien compris dans quelle mesure les zones de transition entre la forêt tropicale et la zone subtropicale seraient étudiées en tant que substituts des conditions futures ou des impacts des changements de la surface terrestre sur la fonction de la forêt tropicale. La délimitation de la forêt tropicale dans la figure 6 est claire, mais si PANGEA signifie "pan-tropical", et compte tenu du rôle prépondérant de la déforestation tropicale dans tous les systèmes étudiés, je n'ai pas compris comment les systèmes de savane/cerrado, de déforestation, d'agriculture ou de prairie pouvaient être intégrés pour améliorer notre compréhension du rôle unique des forêts tropicales elles-mêmes. Les forêts du continent maritime et de l'Asie du Sud-Est fournissent un contexte essentiel pour les autres systèmes de forêts tropicales humides, mais elles comprennent également la nécessité de maintenir le champ d'application dans des limites raisonnables, et ces systèmes tropicaux seront intégrés dans l'étude.

Comme l'indique le commentaire, le champ d'application potentiel des études PANGEA est vaste. Dans le projet de livre blanc, nous avons utilisé le terme "tropiques" de manière vague. Cependant, notre proposition d'étude se concentre sur les forêts tropicales humides. Ce point est maintenant clarifié dans la section 1.4.

- Il s'agit d'un travail d'envergure qui comptera sur l'aide et l'exécution de plusieurs groupes de travail ainsi que sur les natifs des régions à étudier. Après l'avoir lu attentivement, le projet semble bien ficelé. Au fur et à mesure que la recherche se développe, des améliorations spécifiques peuvent être nécessaires, mais dans l'ensemble, la proposition est très bien structurée.
- Une chose qui me vient à l'esprit est que le projet est très ambitieux en termes d'ampleur des questions scientifiques qu'il vise à aborder.

Nous reconnaissons que le champ d'application est vaste, c'est pourquoi nous comptons sur le partenariat depuis le début du travail de cadrage. Nous étudions également activement la possibilité d'un cofinancement (section 10.2).

- L'implication des universités locales et des centres de recherche/laboratoires nationaux. D'après les sites d'étude (équipés d'un système de covariance de Foucault) qui sont mentionnés, il semble que les tours de la CE soient celles dont les PI sont originaires des États-Unis, mais il pourrait y en avoir d'autres. Un autre point d'intérêt qui pourrait être amélioré est la prise en compte du Mexique. Il y a au moins deux sites CE dans la zone d'intérêt de PANGEA :

- El Palmar au Yucatán (réf. : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JG005629>) La Orduña à Veracruz (réf. : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JG004911>) Calakmul à Campeche (en construction, mais devrait être opérationnel en 2025),
- D'autres sites d'étude en activité dans les forêts tropicales sèches de Sonora, la limite supérieure de distribution, comprennent : Alamos à Sonora (<https://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo/MX-Aog>).
- Cela dit, je pense que l'implication des acteurs locaux (c'est-à-dire MexFlux) dans le livre blanc sera précieuse, puisqu'ils seront reconnus, et qu'elle pourrait améliorer les collaborations.

Ce sont des commentaires précieux qui seront pris en compte si nous sommes sélectionnés pour développer un plan opérationnel, en particulier en ce qui concerne les chercheurs actifs de MexFlux et les sites de forêts humides. Nous notons que les forêts sèches ne font pas partie du champ d'application de PANGEA.

- Faiblesse de l'approche des données ouvertes en temps quasi réel : Le partage de données ouvertes dans le contexte de la recherche en sciences du système terrestre n'est utile que s'il signifie un échange libre et sans restriction de données d'observation en temps réel. Tout autre type de partage de données qui reste limité aux seuls membres de PANGEA ou qui nécessite un long délai pour le partage des données ne sera pas en mesure de fournir les avantages revendiqués dans cette proposition. La NASA est bien consciente des avantages du partage de données ouvertes en temps réel à l'échelle mondiale, car c'est grâce à lui que nous avons pu révolutionner les prévisions météorologiques et tirer pleinement parti de la puissance de la télédétection pour les prévisions météorologiques. Les avancées en matière de prévisions météorologiques n'auraient pas pu être réalisées sans un engagement mondial en faveur du partage des données météorologiques en temps réel (voir la résolution de l'Organisation météorologique mondiale sur la politique unifiée en matière de données). Le même principe s'applique aux informations exploitables sur le climat et le cycle du carbone dans les tropiques (en temps utile et de manière routinière). PANGEA doit présenter une proposition plus explicite de changement de paradigme sur le partage "réel" des données et ne pas craindre cette discussion. Si le partage des données en temps réel, libre et sans restriction, n'est pas un principe fondamental de PANGEA, son potentiel de transformation de la recherche dans les tropiques par l'exploitation de la mission de la NASA restera illusoire.

Dans certaines applications, les données doivent être disponibles en temps réel ou presque, comme les prévisions météorologiques. Mais ce n'est pas le cas pour toutes les analyses. Il est difficile d'argumenter en faveur de données en temps quasi réel lorsque le sujet est la variabilité interannuelle ou interdécennale du flux de carbone dans l'écosystème. PANGEA s'engage à respecter les principes de la NASA Open Science et à fournir des données ouvertement aussi rapidement que possible, tout en respectant des contraintes de coût raisonnables. Les retards dans le partage des données seront minimisés, mais il n'est pas possible d'appliquer un critère de temps quasi-réel ou de temps réel pour toutes les données.

- Approche "naïve" des défis posés par le travail sous les tropiques : La proposition aborde les défis liés à l'observation des tropiques, mais elle n'explique que faiblement et naïvement comment PANGEA relèvera ces défis. Il y a une raison pour laquelle l'observation terrestre de la forêt tropicale est restée limitée. PANGEA semble comprendre ces raisons mais n'explique pas comment ces défis seront relevés. Déclarer dans la section 7.6 que PANGEA utilisera des "MOU" pour surmonter les difficultés des campagnes d'observation dans les tropiques semble être une

compréhension naïve de l'ampleur des défis dans ce domaine. La proposition nécessite une approche et une définition beaucoup plus solides des mesures essentielles que PANGEA mettra en œuvre pour surmonter les perturbations physiques, opérationnelles et socio-économiques, qui sont très probables dans les endroits où PANGEA opérera. L'implication d'institutions gouvernementales réelles (et pas seulement d'instituts de recherche) des principaux domaines de PANGEA semble assez faible. En l'absence d'engagements clairs de la part des pays et de leurs gouvernements, la mise en place de réseaux d'observation fonctionnels et continus dans des endroits comme le bassin du Congo ou l'Amazonie semble être un programme à haut risque que la NASA pourrait ne pas vouloir financer si des garanties adéquates ne sont pas mises en œuvre dès le début de la conception du programme.

La NASA a une grande expérience de la coopération scientifique internationale. La NASA a été l'un des principaux participants au LBA, qui a connu un énorme succès en termes de découvertes scientifiques, de renforcement de la science brésilienne grâce au développement des ressources humaines, et d'établissement d'une confiance et de relations à long terme entre les chercheurs, qui perdurent encore aujourd'hui. L'accent mis sur une phrase concernant les protocoles d'accord (nécessaires pour les campagnes aériennes) ne tient pas compte de l'histoire de la recherche de la NASA dans les forêts tropicales et du processus mis en œuvre par PANGEA pour établir un dialogue inclusif (voir la section 8 sur l'engagement de la communauté). Il est vrai que les opérations menées dans les pays tropicaux dont la capacité de gouvernance et l'infrastructure sont limitées représentent un défi. Nous ne nions pas ces défis, mais le commentateur n'est peut-être pas au courant des succès antérieurs de la NASA et de ses partenaires, qui rendent plausible la probabilité de succès de PANGEA.

- La voie de l'action : Il est clair que PANGEA est une proposition de recherche. Toutefois, la section "Earth Science to Action" et le troisième pilier de PANGEA sur la voie de l'action semblent faibles et déconnectés des processus multilatéraux actuels les plus pertinents pour l'action mondiale sur le changement climatique et l'observation de la Terre. La description des organisations concernées dans les sections 7 (tableau 5) et 8 semble quelque peu aléatoire. Elle ne semble pas refléter le résultat d'un exercice d'examen systématique visant à comprendre le paysage mondial des organisations travaillant à l'amélioration de l'observation de la terre dans les tropiques. Des organisations clés des Nations Unies comme l'Organisation météorologique mondiale (qui dirige actuellement le développement de la Veille mondiale des gaz à effet de serre) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (acteur clé pour les investissements dans la gestion et l'utilisation des terres sous les tropiques) sont absentes. La CCNUCC est à peine mentionnée (dans des sections peu pertinentes pour ce que fait cette organisation) alors qu'elle est l'organisation la plus cruciale qui a besoin des résultats scientifiques de PANGEA pour informer les engagements mondiaux sur l'atténuation du climat et notre budget carbone.

L'auteur de l'observation soulève un excellent point. Le projet de section sur la mise en pratique des sciences de la Terre était trop général. Cette section (section 9) a été considérablement modifiée. Elle aborde désormais une stratégie plus holistique de manière plus détaillée.

- D'emblée, il n'y a pas de problèmes flagrants ici, donc considérez ces points comme mineurs. Dans la section décrivant les cycles biogéochimiques, le seul cycle réellement pris en compte est celui du carbone, en mettant l'accent sur le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> principalement. Dans la section suivante, cependant, une image cartographiée tirée de l'un des articles de Dana Chadwick est présentée, montrant des concentrations cartographiées de Ca, etc. dans la canopée (tirées de l'imagerie hyperspectrale, je crois, qui a été corrélée avec la teneur en éléments nutritifs des feuilles). Il est

possible ici d'incorporer le cycle de l'azote et du phosphore, ce qui pourrait contribuer à ce projet, en particulier compte tenu du transfert qui se produit entre les mouvements atmosphériques de phosphore (poussière du Sahara, je crois) qui sont soufflés sur les Amériques. Cependant, je ne sais pas dans quelle mesure cela a un impact direct sur l'Amazonie, étant donné que cela concerne davantage la région du Yucatan et que le transfert depuis l'Afrique se fait bien au nord des régions forestières africaines. Il est toutefois possible d'envisager une biogéochimie supplémentaire au-delà du carbone, tout en reconnaissant que cela nécessiterait un échantillonnage terrestre beaucoup plus important et que les approches de télédétection permettant d'évaluer ces estimations sont limitées ou sujettes à de fortes erreurs.

Cette observation sur le projet de livre blanc est correcte. Nous avons pris des mesures pour inclure une discussion sur d'autres cycles biogéochimiques dans le document révisé, en accordant une attention particulière à l'azote et au phosphore.

- La section sur les perturbations présente une dichotomie entre les perturbations naturelles et celles induites par l'homme. Considérez le rôle de la sécheresse dans l'augmentation du potentiel des incendies d'origine humaine (par exemple, la sécheresse assèche les régions forestières, ce qui crée une plus grande probabilité que les gens brûlent ensuite cette zone pour la défricher, simplement parce que leurs chances de succès sont plus élevées). Cette section ne prend pas nécessairement en compte la dynamique des perturbations de manière aussi complète. Mais c'est peut-être parce que ces dynamiques sont moins bien comprises en Afrique, ce qui serait un avantage pour ce projet, comme nous pourrions le découvrir ! - Les données ICESat-2 pourraient être utilisées pour ajouter des données structurelles supplémentaires pour les forêts de la région - je les vois dans le tableau 2, donc je sais qu'elles sont sur le "radar" (ma petite touche personnelle !).

Les perturbations naturelles et les perturbations anthropiques directes sont séparées pour des raisons de clarté de l'exposé. Cependant, les interactions entre le climat et les incendies sont bien connues. Par exemple, les interactions entre les températures élevées, la sécheresse et les incendies sont un point important dans la discussion de la science PANGEA (par exemple, Q26).

- Cela dépasse la portée de l'étude PANGEA étant donné la portée de l'appel de la NASA, mais l'étude des processus souterrains - nutriments, dynamique du carbone, biomasse végétale et allocation de la PPN aux racines, enzymes, exsudats et symbiotes - est importante pour comprendre les processus qui régulent les forêts tropicales. Ce n'est pas une critique de PANGEA, mais un commentaire sur le champ d'application de l'appel de la NASA en général.

Nous apprécions que l'auteur de l'observation reconnaissse que la NASA a elle aussi des limites.

- Il nous semble que les forêts tropicales d'Asie du Sud-Est semblent exclues de l'étude PANGEA, alors qu'il s'agit d'écosystèmes forestiers tropicaux et d'une meilleure compréhension de leur fonctionnement. Peut-être que des questions budgétaires, stratégiques ou géopolitiques semblent entrer en ligne de compte, mais nous pensons que la prise en compte de toutes les régions forestières tropicales permettrait d'obtenir des résultats plus holistiques et de réaliser des modélisations qui touchent tous les écosystèmes forestiers tropicaux.
- Les tropiques secs sont laissés de côté, mais ils sont aussi potentiellement importants pour l'avenir du cycle du carbone terrestre que les tropiques humides, mais ils sont moins étudiés et moins bien compris.

Les ressources limitées ne nous ont pas permis de mener des campagnes sur le terrain dans toutes les régions tropicales. Voir la section 1.4 sur le domaine PANGEA. Nous incluons un domaine étendu de forêts humides pantropicales, la zone la plus large d'intérêt scientifique, où des projets supplémentaires peuvent avoir lieu par le biais de partenariats, et où les analyses satellitaires et de modélisation seront mises en avant. Nous ne savons pas avec certitude quelles zones l'auteur de l'observation inclut dans les tropiques secs, mais nous avons démontré l'importance des forêts humides. Il semble peu probable, par exemple, que d'autres biomes tropicaux puissent avoir autant d'importance pour le carbone que les forêts humides.

- Veuillez prendre en considération l'identification des moteurs à compléter pour combler les principales lacunes identifiées (voir lignes 426-427) page 55 / 61

Ni les numéros de page ni les numéros de ligne ne semblent correspondre au texte du commentaire. Nous n'avons pas pu répondre à ce commentaire.

**Q3. Dans quelle mesure la structure et le contenu du rapport de l'étude exploratoire PANGEA étaient-ils clairs et compréhensibles ? Veuillez fournir des exemples spécifiques de sections/concepts qui n'étaient pas clairs. Veuillez citer les numéros de page/ligne le cas échéant.**

- Le processus de collecte des données et la relation entre les scientifiques aux États-Unis et les communautés d'Amérique latine et d'Afrique ne sont pas clairs pour moi.
- D'après ce que j'ai lu, c'est clair et compréhensible. Ce qui n'est pas clair pour moi, c'est comment nous (les non-Américains) pouvons soumettre des projets à la NASA.

PANGEA est un projet collaboratif dans le cadre duquel des participants des États-Unis travailleront avec des participants des pays tropicaux en tant que partenaires égaux. La NASA ne peut soutenir la recherche que dans les institutions américaines. Cependant, comme pour le LBA, nous chercherons à associer les études de la NASA à des partenaires locaux qui peuvent avoir accès à des financements locaux. En outre, nous rechercherons activement un cofinancement auprès d'organisations privées qui sont désormais très actives dans le financement de la recherche environnementale (section 10.2).

- Objectif 1 : Caractériser et quantifier les réponses hétérogènes des forêts tropicales aux changements anthropiques. Qu'en est-il de la réponse des forêts tropicales aux perturbations naturelles et climatiques (typhons/ouragans, sécheresses, inondations, glissements de terrain, etc.)

La section 2.5 sur la dynamique des perturbations a été considérablement révisée. Nous traitons désormais non seulement les perturbations anthropogéniques, mais aussi les perturbations naturelles par le biais des mécanismes énumérés.

- La structure et le contenu du rapport de l'étude exploratoire PANGEA sont très clairs. Par exemple, à la page 96, ligne 1954-1956, nous comprenons clairement que PANGEA élucidera les modèles de changements récents (5-30 ans) et en cours dans les forêts tropicales, les paysages, la dynamique et les rétroactions, ainsi que leurs variations géographiques, avec une approche environnementale. L'accent est mis sur les comparaisons entre les Amériques et l'Afrique.
- C'est la prise en compte de la dynamique sociale des communautés locales à la base. [C'est la prise en compte de la dynamique sociale des communautés locales à la base.]

Pas de réponse à ces commentaires.

- Un aspect du rapport qui semble peu clair est le résultat attendu concernant la "cartographie et la quantification des prévisions de flux de méthane" de l'étude sur la stabilité de la séquestration du carbone et les flux de méthane (page 108). Alors que le reste du projet semble se concentrer sur les analyses actuelles, l'inclusion d'une analyse prévisionnelle semble hors de portée. Étant donné que PANGEA collectera des données jusqu'à la fin de la campagne, le temps disponible pour effectuer une telle analyse prévisionnelle semble limité.

Le livre blanc a été considérablement révisé et les projections futures ne sont pas exclues du champ d'application (section 3.3). Par exemple, la question de la stabilité de la séquestration du carbone est au cœur de l'une de nos questions scientifiques relatives aux projections (par exemple, Q25. Dans un climat changeant, quels types de forêts fonctionnellement distincts sont les plus vulnérables pour devenir des sources nettes de carbone dans l'atmosphère dans un climat changeant, quels types de forêts sont résistants, et pourquoi ?)

- À mon avis, il n'y a pas de malentendu particulier sur la structure générale et le contenu. J'ai suivi de nombreuses communications sur ce rapport d'étude exploratoire de PANGEA.
- Ce rapport est complet et bien organisé. L'introduction explique clairement pourquoi cette campagne est nécessaire et opportune. Les lacunes et les questions en matière de connaissances sont bien formulées et serviront de feuille de route pour les recherches futures. Le rapport identifie également les missions satellitaires et les produits de données qui sont essentiels pour répondre aux questions de recherche de la campagne PANGEA.
- Les calendriers m'ont paru clairs et l'instabilité politique (2425) a été bien abordée, et l'encadré 1 présente un plan avancé bien raisonnable pour faire démarrer PANGEA avec des partenaires internationaux. Je suis un peu moins familier avec les études de cadrage qui ne sont pas destinées à décrire des détails spécifiques au niveau du site et j'ai le sentiment que le plan tel qu'il est rédigé est bien raisonnable et flexible pour toutes les différentes opportunités qu'un projet financé présentera.

Pas de réponse à ces commentaires.

- Le projet est généralement présenté de manière assez claire, mais les définitions de certains acronymes doivent être vérifiées en fonction de leur première apparition dans le texte (par exemple, la définition de la productivité primaire brute GPP apparaît dans la figure 3, mais cet acronyme est déjà utilisé dans la figure 1). (par exemple, la définition de la productivité primaire brute (PPB) apparaît dans la figure 3, mais cet acronyme est déjà utilisé dans la figure 1). Je suggère que les définitions de tous les acronymes, même ceux qui sont simples pour les personnes travaillant dans le domaine, soient insérées dans le texte lorsqu'elles sont utilisées pour la première fois sur chaque page où elles sont mentionnées, afin de faciliter la lecture pour les personnes travaillant dans d'autres domaines.

Tous les acronymes sont désormais définis lorsqu'ils sont mentionnés pour la première fois, et nous avons inclus une liste de définitions d'acronymes (section 14).

- La structure générale est très bien conçue et le contenu est globalement clair. J'ai relevé quelques problèmes en lisant le document : 1) les observations et la justification du flux de méthane semblent avoir été ajoutées à la dernière heure. Il s'agit d'un ajout important, mais sans inclure

Pangala et al. 2017 à la ligne 119, la section sur les flux de méthane dans 1321-1335 devrait être incluse dans la section 2.1.

L'auteur de la remarque a raison et la section a depuis été réécrite et mieux intégrée (sections 2.1. et 3.1.1).

- La section 2.4 sur les systèmes socio-écologiques est très différente de toutes les autres sections 2.x. Elle contient plus de déclarations sur ce que PANGEA fera (1061-1069 ; 1090-1093 1161-1163), cette section bénéficierait également de l'étude de Levis et al. 2017 (Science 355, 925-931) sur l'influence des peuples précolombiens sur l'abondance et la distribution des arbres. Plus loin, le concept de "forêts culturelles" est évoqué, pour lequel Levis et al. seraient tout à fait appropriés. Au point 2.4, le paragraphe 1095-1115 contient de grands blocs de références qu'il vaudrait mieux séparer en fonction des différentes forces ou des différents impacts auxquels ils se réfèrent.

*La section 2.4 a été entièrement révisée pour être cohérente avec les autres sections 2.x. La perspective de Levis et de ses collègues est très importante et nous citons leur récente (2024) revue qui résume une grande partie de leurs travaux antérieurs, y compris les études des influences précolombiennes sur l'abondance et la distribution des arbres.*

- Dans la discussion sur l'impact des grands mammifères sur les distributions de nutriments (940), inclure Doughty et al. 2016 PNAS dans les refs.

*L'importance de la mégafaune est discutée dans les sections 2.2 et 3.2.1. Nous citons l'article précédent sur l'impact de la mégafaune de Doughty et al. (2013).*

- dans la dynamique des perturbations, ligne 1198, la compréhension plus approfondie des moteurs ne figure pas, à ma connaissance, dans la section 2.4. Ligne 1229, je ne suis pas sûr de l'origine de la déclaration entre parenthèses. Ligne 1261 les cyclones tropicaux ont le plus d'effet sur les systèmes forestiers exposés à l'océan et à la mer. Je suggère de fusionner ce paragraphe avec le paragraphe commençant à la ligne 1227.

*Les perturbations sont désormais abordées à la section 2.5, et cette section a été considérablement révisée. La compréhension des perturbations dépend, en partie, des systèmes socio-écologiques abordés à la section 2.4.*

- A la ligne 1315, inclure Saleska et al. 2003, Science comme référence pour le changement de force du puits de carbone. A la ligne 1402, qui parle de la covariance de Foucault, il serait bon d'avoir une carte des emplacements de l'EC et des emplacements de GeoTree. La section 3 n'inclut pas les expériences de détournement des précipitations, de fertilisation par le CO<sub>2</sub> ou de température, alors que les questions Q8, Q9, Q19 et !23 dépendent toutes de l'expérimentation pour répondre à ces questions. Un site au Pérou où la forêt borde une source d'eau chaude est potentiellement intéressant (Kullberg et al. 2023, New Phytologist) pour déterminer l'impact de l'augmentation de la température sur les espèces d'arbres et leur résilience thermique.

*Les sites et emplacements potentiels sont répertoriés dans le cadre des paysages PANGEA qui comprennent des études de covariance de Foucault et d'inventaire forestier, comme indiqué dans le tableau de la section 6.2.2.*

*La réponse de PANGEA au programme d'écologie terrestre de la NASA ne prend pas explicitement en compte les expériences sur les grands écosystèmes. Celles-ci sont précieuses et peuvent être cofinancées par d'autres agences ou des donateurs privés, comme ce fut le cas pour l'expérience*

de sécheresse Seca-Floresta menée dans la forêt nationale de Tapajos, au Brésil, soutenue par des fonds de la NSF dans le cadre du LBA.

- S'il vous plaît, lignes 1168-1169, dans la phrase "Les activités de PANGEA... doivent être régies... efficacement", voulez-vous dire "gérer" au lieu de "régir" ?

Nous utilisons le terme "gouverner" pour distinguer les activités des décideurs.

- Le projet est très bien écrit et structuré.
- Ma première suggestion, d'ordre général, est de souligner que le projet s'appuie sur les connaissances existantes pour les faire progresser. Ainsi, plutôt que de chercher à combler les lacunes en matière de connaissances, j'utiliserais quelque chose comme "faire progresser les connaissances (ou la compréhension scientifique)".

L'existence de certaines connaissances sur les forêts tropicales n'exclut pas l'existence de lacunes dans ces connaissances. Nous conservons la formulation actuelle.

- Les deux premières questions semblent descriptives. Je suggère de trouver un facteur relationnel (par exemple, analyser la relation entre X et Y), comme c'est le cas dans la question 3.

Les questions ont été élaborées dans le cadre d'un processus exhaustif impliquant d'importants groupes de travail. Bien que le commentaire soit valable, nous ne voulons pas modifier les questions à moins qu'elles ne soient pas claires ou qu'elles ne conduisent à des études inefficaces. Nous ne pensons pas qu'il soit nécessaire de modifier Q1 ou Q2.

- Le mot "Anthropocène" apparaît pour la première fois dans la question 2. Si vous considérez qu'il est pertinent de le conserver, je suggère d'introduire et d'expliquer le concept plus tôt (en notant qu'il y a un débat assez houleux sur ce qu'il signifie réellement).

Le débat scientifique relatif à l'Anthropocène est un sujet principalement réservé aux stratigraphes. Nous avons d'abord utilisé le mot dans son contexte familier, à savoir l'époque où le système terrestre est dominé par l'homme. Cette domination humaine ne fait guère l'objet de débats. Cependant, nous n'utilisons plus le terme "Anthropocène" dans le livre blanc.

- Les objectifs 1 à 3 ne semblent pas s'aligner directement sur les questions 1 à 3.

Il y a maintenant 5 objectifs, 3 questions transdisciplinaires qui analysent la question principale et de nombreuses sous-questions thématiques spécifiques. Nous ne nous attendons pas à ce qu'ils soient directement alignés, car certains des objectifs sont orientés vers la science et d'autres sont liés aux applications et à la formation.

- Q1) Serait-il utile de préciser les interactions socio-écologiques ? Par ailleurs, la question semble un peu large car elle aborde de nombreuses variables différentes.

Voir la section 2.4 pour une discussion sur les interactions socio-écologiques.

- Q3) Je ne vois pas clairement si nous parlons de variations entre différentes forêts ou de variations dans le temps au sein d'une même forêt. Peut-être s'agit-il des deux, mais je suggérerais de le préciser.

La question a été modifiée pour plus de clarté.

- Q6) Je suggère de diviser cette question en deux - bien qu'elle soit parfaitement logique, elle semble un peu longue et difficile à suivre.

Nous avons beaucoup de questions. Parce que cette question est "tout à fait logique", nous avons préféré ne pas la scinder.

- Q9) Je suggère i) de préciser les continents tropicaux dont vous parlez ; ii) de scinder la question en deux questions différentes mais interdépendantes.

Comme indiqué ci-dessus, nous avons beaucoup de questions et nous préférons ne pas les diviser davantage. Nous ne voyons aucun avantage à spécifier les continents dans cette question.

- Q17) La question semble descriptive. Je suggérerais quelque chose comme "Dans quelle mesure et comment les différentes activités humaines et pratiques de gestion soutiennent-elles la résilience du puits de carbone tropical ?"

Nous considérons que la reformulation proposée pour cette question est largement équivalente à la question élaborée par notre groupe de travail. Nous conservons la formulation initiale.

#### **Q4. Dans quelle mesure l'étude exploratoire PANGEA répond-elle aux questions ou objectifs scientifiques clés ?**

- *Se evidencia un buen planteamiento de preguntas y objetivos a alcanzar.* [Une bonne formulation des questions et des objectifs à atteindre est évidente].
- *C'est sur la collecte le traitement et l'analyse des données.* C'est sur la collecte le traitement et l'analyse des données. [Il s'agit de la collecte, du traitement et de l'analyse des données].
- L'étude de cadrage PANGEA a très bien abordé les questions scientifiques clés. Les questions scientifiques étaient présentes chaque fois que l'on pensait aux variables écologiques et géophysiques pertinentes pour la campagne (p. 60 à 62), aux suggestions de méthodes pour répondre aux questions de recherche (p. 76 à 77) et aux applications de la recherche (p. 107 à 115).
- Mise à jour et pour les prochaines générations de scientifiques et de non-scientifiques.
- La vision de la réponse aux questions scientifiques est impressionnante.
- De mon point de vue (physique du climat), PANGEA couvre la plupart des sujets principaux. Un sujet que je suggérerais d'aborder est le transport à longue distance de nutriments importants vers la forêt et la manière dont il évoluera avec le changement climatique. Un autre sujet important est le bioaérosol ; il est important pour la formation des nuages (glace), la biodiversité, le transport vertical et le transport à longue distance.

Le transport à longue distance des nutriments est surtout important à très long terme. Les bioaérosols sont fascinants et importants pour la formation des nuages. Ces deux sujets font partie des catégories de recherche liées à PANGEA mais ne font pas partie de nos études principales. Nous chercherons à collaborer avec des groupes qui ont des points forts dans ces domaines, comme le consortium INPA-Max Planck ATTO.

- Dans l'ensemble, l'étude exploratoire répond bien aux questions clés et aux objectifs, même si elle gagnerait à inclure des sites expérimentaux sous les tropiques afin de les relier aux observations par satellite.

La réponse de PANGEA au programme d'écologie terrestre de la NASA ne prend pas explicitement en compte les expériences sur les grands écosystèmes. Celles-ci sont précieuses et peuvent être cofinancées par d'autres agences ou des donateurs privés, comme ce fut le cas pour l'expérience de sécheresse Seca-Floresta menée dans la forêt nationale de Tapajos, au Brésil, soutenue par des fonds de la NSF dans le cadre du LBA.

- L'objectif général de l'étude exploratoire PANGEA est d'améliorer notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers tropicaux, en s'appuyant sur les études et expériences actuelles pour combler les lacunes en matière de données, en particulier dans les régions tropicales d'Afrique. Pour ce faire, PANGEA prévoit de collecter des mesures de terrain, notamment sur des sites candidats en Afrique, de financer des études de doctorat et de master sur des questions liées au fonctionnement des écosystèmes tropicaux afin de confirmer les hypothèses émises, de créer des partenariats significatifs avec les gouvernements des pays tropicaux et les communautés locales, et de bénéficier du soutien financier et logistique de la prestigieuse NASA, autant d'éléments qui, nous le pensons, permettront au projet PANGEA d'atteindre son objectif. Néanmoins, l'exclusion des régions tropicales de l'Asie du Sud-Est est un problème qui rendra impossible la réalisation de projections globales pour l'ensemble des régions forestières tropicales. C'est un obstacle au projet PANGEA.

Les ressources limitées ne nous ont pas permis de mener des campagnes sur le terrain dans toutes les régions tropicales. Voir la section 1.4 sur le domaine PANGEA. Nous incluons un domaine étendu de forêts humides pantropicales, la zone la plus large d'intérêt scientifique, où des projets supplémentaires peuvent être mis en place par le biais de partenariats, et où des analyses satellitaires et de modélisation seront menées.

## Q5. Les méthodologies et les outils proposés (par exemple, la télédétection, l'analyse des données) étaient-ils appropriés pour atteindre les objectifs de l'étude PANGEA ?

- *Si, muy adecuadas para el estudio PANGEA.* (Oui, très adéquates pour l'étude PANGEA).
- La collecte de données de routine sur les avions locaux et l'intégration dans un réseau mondial tel qu'ACTRIS favorisent les propositions d'ARM-DOE pour aider à résoudre les problèmes spécifiques de PANGEA...

Ces suggestions sont les bienvenues et semblent appropriées pour les propositions des chercheurs. ACTRIS est actif en Europe et peut ne pas être actif dans le domaine PANGEA. L'utilisation des installations ARM du DOE peut être appropriée pour certaines recherches. Des propositions séparées au DOE seraient nécessaires.

- Il y a un examen approfondi des méthodologies (tableaux 1 et 4) que les auteurs ont utilisées pour montrer la quantité de ressources dont nous disposons aujourd'hui et qui n'ont pas été appliquées dans les forêts tropicales. PANGEA souligne à juste titre que ces méthodologies ne sont pas absolues et que les chercheurs devraient repousser les limites de leur compréhension de la science.

*Pas de réponse à ce commentaire.*

- Le plan d'observation est complet, mais il y a quelques distinctions concernant les satellites géostationnaires qui méritent d'être décrites plus en détail. J'apprécie l'inclusion des observations

des satellites géostationnaires, qui sont bien placés pour observer les écosystèmes tropicaux car ils sont positionnés au-dessus de l'équateur en orbite géostationnaire et effectuent des observations infra-quotidiennes sur des échelles de temps de quelques minutes à quelques dizaines de minutes, ce qui nous aide à nous informer sur les processus infra-quotidiens tandis que des mesures fréquentes permettent de trouver plus facilement des périodes sans nuages. L'ABI de la série GOES-R, en particulier GOES-16 et GOES-19, se trouve au-dessus de l'Amérique du Sud et offre de superbes vues de l'Amazonie, tandis que l'imageur Himawari avancé (AHI) de la série Himawari 8/9 se trouve au-dessus du continent maritime et offre des vues principalement de l'Asie orientale, de l'Australasie et de ses environs. Les imageurs de la série Fengyun-4 et de la série GEO-KOMPSAT-2 observent également l'Asie orientale. Il y a une légère lacune dans la couverture géostationnaire de l'Afrique orientale, et MTG-I1 n'a pas encore été mis en service pour METEOSAT-12, bien qu'il vole depuis presque deux ans maintenant et qu'il soit absolument essentiel pour l'observation de l'Afrique. L'AHI a été noté comme observant l'Amazonie (ceci doit être corrigé). L'initiative GeoNEX de la NASA a joué un rôle essentiel dans la synthèse des observations terrestres effectuées par les satellites géostationnaires, et il n'a pas été précisé si leur expertise serait intégrée (ce que je recommanderais vivement ; je ne sais pas non plus si les équipes de la NASA peuvent être explicitement incluses dans les projets de cadrage de la NASA). Il est également important de noter que GOES-R peut être utilisé pour déduire la PPG et la respiration de l'écosystème par le biais de modèles, comme c'est le cas pour d'autres estimations de flux de carbone basées sur des satellites. En mettant davantage l'accent sur leur capacité à déduire quotidiennement le rayonnement de courte longueur d'onde descendant et la température de la surface terrestre, on pourrait vraiment expliquer comment ils créent une plate-forme d'observation unique en temps réel pour les processus critiques du système terrestre.

Nous apprécions le commentaire détaillé sur les observations géostationnaires, mais étant donné le large éventail de plates-formes satellitaires et de capteurs dont nous traitons dans le livre blanc, nous ne pouvons pas tirer parti de toutes les informations contenues dans le document. Nous apprécions l'identification de l'erreur concernant l'AHI et celle-ci est maintenant corrigée.

- Oui, dans l'ensemble, les méthodologies semblent appropriées, même si je pense que l'étude PANGEA ne tient pas compte des sites expérimentaux permettant d'étudier plus en détail les impacts des facteurs de changement climatique tels que la sécheresse et l'enrichissement en dioxyde de carbone, ni des sites de changement d'utilisation des terres tels que les sites TMFO (voir la section relative à la réponse des parties prenantes et des communautés). Le cadrage scientifique parle des impacts du changement climatique et je me demande s'ils peuvent être pleinement pris en compte avec des études d'observation.

La réponse de PANGEA au programme d'écologie terrestre de la NASA ne prend pas explicitement en compte les expériences sur les grands écosystèmes. Celles-ci sont précieuses et peuvent être cofinancées par d'autres agences ou des donateurs privés, comme ce fut le cas pour l'expérience de sécheresse Seca-Floresta menée dans la forêt nationale de Tapajos, au Brésil, soutenue par des fonds de la NSF dans le cadre du LBA.

- L'étude exploratoire semble suffisamment complète. Toutefois, les méthodes et les observations de mesures/variables semblent insuffisantes dans certains domaines liés à l'amélioration de la compréhension des sources et des puits naturels dans les tropiques. Par exemple, l'utilisation du fractionnement isotopique comme contrainte pour la modélisation ascendante et descendante est absente des besoins et méthodes d'observation proposés (seulement légèrement mentionnée dans le tableau 4). Il existe des preuves solides que la collecte systématique de données

isotopiques est une approche puissante pour la répartition des sources d'émissions. C'est pourquoi les mesures d'isotopes stables dans l'hémisphère nord sont devenues un élément clé des réseaux d'observation. Étant donné les contraintes et les coûts de la collecte et de l'analyse de ces données dans les tropiques, la proposition devrait mentionner explicitement ce domaine comme l'un des domaines d'observation que PANGEA s'efforcera de renforcer.

**Nous sommes d'accord sur le fait que les méthodes isotopiques peuvent fournir des contraintes fortes pour la répartition des processus des écosystèmes. Elles sont énumérées parmi les méthodes d'analyse intégrative à la section 6.3.**

- Je voudrais vous suggérer de considérer certaines périodes spécifiques de l'année (période de transition, de la sécheresse à l'humidité et vice versa) pour les activités décrites à la ligne 2112-2113. Ces périodes ont des caractéristiques atmosphériques particulières. Ces périodes en Afrique de l'Ouest, surtout dans le nord du Bénin, sont celles qui font l'objet de beaucoup de malentendus.

**Le livre blanc prévoit des campagnes intensives au début et à la fin des saisons sèches, qui peuvent inclure des transitions. Cela variera selon les régions et affectera donc le calendrier de la campagne.**

## **Q6. L'étude PANGEA a-t-elle permis d'identifier les principaux défis ou incertitudes liés à la campagne de terrain proposée ?**

- *Muy de acuerdo ya que las propuestas se han recogido de manera participativa en muchas reuniones* [Je suis tout à fait d'accord, car les propositions ont été recueillies de manière participative lors de nombreuses réunions].
- Oui, je pense que oui, mais les pays multiples, chaque pays ayant des procédures administratives spécifiques comme les licences pour les mesures, les avions, etc. pourraient constituer un défi.
- Oui, l'étude a bien identifié les principaux défis et incertitudes, en particulier dans la section 7, qui traite de la faisabilité technique et logistique. Les auteurs ont abordé plusieurs problèmes potentiels, tels que la complexité de la gestion d'une grande équipe, et ont présenté des solutions pour éviter les goulets d'étranglement en matière de communication en rationalisant la structure organisationnelle de la campagne. D'autres défis, tels que le désengagement potentiel de la communauté ou les problèmes de financement international, ont également été reconnus, et des stratégies telles que les plans d'engagement et l'exploitation des réseaux pour un financement alternatif ont été suggérées comme solutions.
- Comme indiqué ailleurs, j'ai trouvé que les notes concernant l'instabilité politique étaient bien raisonnées.
- La campagne de terrain proposée aborde pleinement les questions du changement climatique et de la biodiversité, qui comprennent toutes deux la déforestation, le changement d'affectation des terres, les incendies, les sécheresses, etc. Le changement climatique, dont les répercussions entraînent de nombreuses pertes en vies humaines et en infrastructures, est lié au flux de carbone contenu dans le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, entre autres.
- Le principal défi identifié par PANGEA est lié à l'incertitude de la qualité de la réponse des régions forestières tropicales au changement climatique, qui est lui-même largement lié aux flux de carbone dans l'atmosphère. La certitude est que la diversité des paysages forestiers tropicaux et les menaces anthropiques auxquelles ils sont confrontés conduisent inévitablement à une

hétérogénéité dans la réponse et la vulnérabilité de ces paysages aux menaces anthropiques. Ainsi, la compréhension du flux de carbone atmosphérique et de ses tendances actuelles et futures sera importante pour une meilleure compréhension du problème du changement climatique, qui est le plus grand défi auquel l'humanité est confrontée aujourd'hui. La campagne PANGEA contribue donc à identifier le plus grand défi contemporain auquel l'humanité est confrontée.

Grâce à nos consultations approfondies, nous avons acquis beaucoup de sagesse et de perspectives concernant les défis et les incertitudes.

## **Q7. Comment évaluez-vous la pertinence de la conception de l'étude proposée pour faire progresser notre compréhension des écosystèmes terrestres ?**

- *Le projet aborde des points spécifiques pour comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes.* [La conception aborde des points spécifiques pour comprendre le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes].
- PANGEA est nécessaire car les campagnes de terrain dans les forêts tropicales permettraient aux scientifiques d'étudier l'état naturel des biomes tropicaux et l'impact des activités humaines sur ceux-ci :
  - Comprendre l'état naturel, notamment la façon dont les particules d'aérosols se forment, croissent et se déplacent sous les tropiques (par exemple, la poussière de l'Afrique à l'Amérique du Sud) ;
  - La mesure de l'impact humain, tel que la pollution et la déforestation, s'est déplacée dans l'atmosphère des latitudes tempérées vers les tropiques ;
  - Identifier les zones critiques qui sont considérées comme des points de basculement pour les émissions terrestres ; et
  - Mesure et validation de variables terrestres telles que l'indice de surface foliaire (LAI) et la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé (FAPAR), qui sont des variables de forçage essentielles pour différents modèles.
- L'équipe a fait un travail remarquable en mettant l'accent sur le rôle majeur des écosystèmes tropicaux dans le système terrestre, en se concentrant sur les cycles biogéochimiques/hydrologiques couplés, sur les systèmes de détection de pointe et sur les questions critiques qui dépassent les frontières disciplinaires et géographiques.
- Je considère que la pertinence de cette proposition est élevée, compte tenu des approches utilisées et de l'importance des régions tropicales pour le cycle global du carbone (et bien sûr de la façon dont ces régions sont menacées par le changement climatique).

Pas de réponse à ces commentaires.

- La pertinence de la conception de l'étude est très importante pour notre compréhension des écosystèmes terrestres. Cependant, je pense que le champ de l'étude est trop observationnel et pourrait bénéficier de sites expérimentaux ou identifier des sites qui ont des conditions très spécifiques, comme l'expérience de "réchauffement naturel" des sources chaudes.

Nous avons déjà répondu à des commentaires similaires concernant les expériences, qu'elles soient artificielles ou "naturelles".

- L'objectif de PANGEA, qui est de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes terrestres, est bon et louable ; la réalisation de cet objectif permettra probablement de développer des politiques appropriées pour faire face à des problèmes tels que le changement climatique et la perte de biodiversité. PANGEA est stratégiquement conçu sur la base d'un ensemble d'hypothèses liées notamment à l'hétérogénéité de la réponse et de la vulnérabilité des régions tropicales aux menaces anthropiques. PANGEA prévoit de vérifier ces hypothèses en coordonnant les données de terrain, les données aéroportées et les données satellitaires. Nous pensons que cela est pertinent pour atteindre les objectifs de PANGEA. Ce qui est le plus intéressant dans PANGEA, c'est qu'il a porté une attention particulière aux forêts tropicales africaines, en donnant la priorité aux mesures terrestres et aériennes en raison des lacunes importantes en matière de données et de connaissances dans cette région tropicale. Bien qu'il s'agisse d'une bonne orientation pour le projet PANGEA, elle reste partielle en raison de l'exclusion des forêts tropicales d'Asie du Sud-Est, dont l'inclusion dans l'étude aurait permis d'obtenir des données globales et de faire des projections plus globales pour toutes les régions forestières tropicales. Dans quelle mesure la mise en œuvre technique et logistique de la campagne de terrain proposée vous semble-t-elle réalisable ? La mise en œuvre technique et logistique de la campagne de terrain proposée semble réalisable pour deux raisons :
  - La première est que des scientifiques issus des différentes sciences humaines et sociales, de tous horizons, et en particulier des paysages forestiers tropicaux, sont impliqués dans l'étude. Les scientifiques des régions tropicales ont l'avantage de maîtriser la réalité de ce qui se passe en termes de perturbations climatiques ou de conséquences de ces perturbations et de menaces sur les équilibres biogéochimiques et la biodiversité locale. C'est un avantage pour aborder les bonnes questions scientifiques et obtenir les bonnes informations à partir des données ou des mesures collectées sur le terrain.
  - Deuxièmement, le parrainage potentiel de la NASA est un atout majeur, à la fois financier et surtout logistique, car PANGEA n'aura aucune difficulté à obtenir des données fiables à partir des observations aériennes et satellitaires de la NASA. Ces données pourraient également provenir d'autres organisations ayant la capacité d'obtenir ce type d'informations. De plus, PANGEA dispose d'une zone d'étude empirique représentée par les zones de forêts tropicales, qui sont d'une importance capitale dans la lutte contre le changement climatique et la protection de la diversité. D'un point de vue empirique, le choix de cette zone d'étude est un facteur important de la pertinence du projet PANGEA.

Nous avons déjà commenté l'inclusion de l'Asie. L'Asie n'est pas exclue : Elle fait partie du domaine étendu. PANGEA ne recherche pas de ressources pour des campagnes en Asie. Un partenariat avec d'autres sponsors pourrait étendre le travail de PANGEA à l'Asie en suivant des thèmes et des approches scientifiques similaires.

- Les tropiques secs nous manquent !

[Voir la réponse à ce sujet ci-dessus.](#)

## Q8. Dans quelle mesure la mise en œuvre technique et logistique proposée pour la campagne de terrain vous semble-t-elle réalisable ?

- *La mise en œuvre permettra de valider l'information locale avec les méthodologies appropriées à chaque région. [La mise en œuvre permettra de valider les informations locales avec les méthodologies appropriées à chaque région].*

- Compte tenu du nombre de personnes impliquées dans cette campagne, la mise en œuvre est réalisable. Comme pour tout autre projet, cette campagne de terrain n'est pas exempte d'obstacles au développement, mais cela signifierait simplement que des études supplémentaires dans la proposition pourraient ne pas être prioritaires si elles ne répondent pas directement à une question de recherche. Par exemple, comme mentionné précédemment, l'analyse prévisionnelle des flux de gaz pourrait devenir secondaire car les auteurs pourraient donner la priorité à l'achèvement de tout projet de collecte de données avant la fin de la campagne.
- La réalisation de travaux sur le terrain dans des zones reculées présente un niveau de complexité élevé et (comme indiqué dans la proposition) des préoccupations encore plus grandes dans certaines parties de l'Afrique, compte tenu de l'instabilité politique et sociale de la région. Cela dit, je pense qu' étant donné les partenaires cités, l'expertise de l'équipe impliquée... cela serait tout à fait faisable avec des ressources suffisantes. Ce sera un défi logistique, mais je pense que les personnes impliquées et les partenariats décrits indiquent un grand potentiel de réussite.
- Je suis un expert en écologie de terrain, je ne peux donc pas me prononcer sur les aspects liés à la télédétection, mais tout cela semble réalisable.
- Le projet est assez ambitieux, à la fois en termes de portée et d'étendue géographique - il couvre de nombreuses zones forestières dans différents pays du Brésil et d'Amérique du Sud. Cependant, les approches techniques et logistiques sont bien fondées et ont un grand potentiel de réussite dans leur mise en œuvre sur le terrain.

**Je ne répondrai pas à ces commentaires, si ce n'est que j'apprécie les votes de confiance.**

- En tant qu'habitant des tropiques aux Philippines ayant travaillé dans la forêt amazonienne, je dirais que l'équipe de projet devrait tenir compte de l'aspect sécuritaire du déploiement de l'infrastructure et de l'équipement. Les événements extrêmes, le terrain et le soutien de la main-d'œuvre doivent également être pris en compte. Une tour de flux à covariance de Foucault avec laquelle j'ai travaillé, en Amazonie, est toujours confrontée à des pannes d'instruments dues à des interférences/intrusions de la faune. L'alimentation électrique (principalement les panneaux solaires) par temps nuageux est un problème important. La sécurité du personnel et des équipements est vitale.

**Il s'agit là de préoccupations importantes qui ne font pas l'objet principal de notre document conceptuel, mais qui seront à prendre en considération si nous sommes choisis pour élaborer un plan d'expérience opérationnel. Nous notons que le bureau de projet de la NASA a une grande expérience des forêts tropicales et a traité des problèmes similaires à ceux soulevés ci-dessus.**

- Je considère que la proposition est encore très ouverte à la discussion sur la mise en œuvre, mais cette première étape du banc d'essai est très importante pour donner une impulsion. J'espère que la proposition sera également ouverte aux non-Américains.

**La NASA a fait plus qu'un "banc d'essai" dans les forêts tropicales grâce à son expérience dans le cadre du LBA dirigé par le Brésil. Les non-Américains sont les bienvenus, bien que la NASA soit limitée dans le financement des institutions en dehors des États-Unis. Nous recherchons activement un cofinancement, comme indiqué à la section 10.2.**

**Q9. Existe-t-il des obstacles ou des défis potentiels que l'étude exploratoire PANGEA n'a pas suffisamment pris en compte ?**

- *Si hay barreras, son las culturales y de idioma, ya que en el ámbito de intervención de Pangea existe una gran diversidad cultural y de idiomas que debe abordarse con mucha importancia [S'il y a des barrières, ce sont des barrières culturelles et linguistiques, puisque dans la zone de Pangea il y a une grande diversité culturelle et linguistique qui doit être abordée avec beaucoup d'importance].*

Au cours du processus de définition du champ d'application, PANGEA s'est efforcée de briser les barrières. Par exemple, nous avons organisé des réunions régionales avec traduction simultanée. Nous avons rendu le projet de livre blanc disponible en plusieurs langues, dont l'espagnol. Nous avons répondu aux commentaires sur le document qui ont été fournis en espagnol et en français. Notre livre blanc (y compris ces réponses) sera traduit en espagnol, en français, en portugais et en bahasa indonesia. Nous avons l'intention de poursuivre ces pratiques afin de minimiser les obstacles.

- La question de la sécurité de certains terrains d'étude.

La sécurité des participants au projet est une priorité absolue. L'évaluation de la sécurité des sites de terrain relève de la responsabilité du bureau de projet. Il peut être nécessaire d'éviter les sites à haut risque. Voir la section 10.5 pour une discussion sur les risques et leur atténuation.

- Un défi potentiel que PANGEA n'a peut-être pas entièrement relevé est la sous-représentation de l'Asie dans les groupes de cadrage, malgré l'accent mis par l'étude sur les régions tropicales. Si cette omission n'entrave pas la réalisation des objectifs individuels du projet, elle peut devenir un obstacle lorsqu'il s'agit de présenter les résultats de la campagne à l'échelle mondiale.

En raison des ressources limitées, nous avons accordé plus d'attention à l'Afrique et aux Amériques qu'à l'Asie. Toutefois, nous avons mené des actions de sensibilisation en Asie et, si nous recevons un financement, nous continuerons à le faire afin d'éviter l'obstacle potentiel soulevé dans ce commentaire bien placé.

- L'une des principales lacunes en matière de connaissances qui n'a pas été abordée dans l'étude de cadrage est la manière dont la convection profonde tropicale influe sur notre vision du cycle du carbone. Les modèles actuels de transport atmosphérique mondial varient dans la paramétrisation de la convection, et nous n'avons pas une idée claire des erreurs d'attribution des flux de carbone causées par un transport vertical mal résolu dans les tropiques (Stephens et al., 2007). Les progrès récents des modèles de résolution des nuages sont prometteurs dans la représentation précise de la convection tropicale et de son impact sur la distribution des traceurs du cycle du carbone. Cela pourrait contribuer à améliorer les estimations descendantes des flux de carbone dans les tropiques. Un système de modélisation et d'assimilation des données intégrant les dernières avancées en matière de représentation du transport atmosphérique devrait nous aider à interpréter plus précisément les observations de gaz à l'état de traces à toutes les échelles, pour une meilleure compréhension de la dynamique du carbone dans les régions tropicales.
- Le rapport indique que "les flux de respiration, les émissions de méthane et les flux latéraux de carbone se sont avérés substantiels dans les forêts tropicales" (lignes 1319-1321, page 36), mais ne fournit aucun plan concret pour mesurer le transport latéral de carbone sur le terrain. Au lieu de cela, il est indiqué que "l'inondation provenant de NISAR et BIOMASS soutiendra la cartographie des zones humides des forêts tropicales et sera intégrée aux mesures des flux d'eau de surface

provenant de SWOT, permettant des mesures directes des flux latéraux de carbone des systèmes tropicaux" (ligne 1374-1376, page 38). Je suis perplexe quant à la manière dont cela est possible étant donné qu'aucun des satellites susmentionnés ne suit le carbone inorganique dissous ou le carbone organique dissous/particulaire. Peut-être que PACE serait utile ? Mais des mesures sur le terrain seraient encore nécessaires pour suivre le transport latéral du carbone et valider les produits et les modèles de données satellitaires.

#### Référence

Stephens, B. B., Gurney, K. R., Tans, P. P., Sweeney, C., Peters, W., Bruhwiler, L., Ciais, P., Ramonet, M., Bousquet, P., Nakazawa, T., Aoki, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N., Lloyd, J., Jordan, A., Heimann, M., Shibistova, O., Langenfelds, R. L., ... Denning, A. S. (2007). Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, 316(5832), 1732-1735. <https://doi.org/10.1126/science.1137004>

L'amélioration de la compréhension du transport atmosphérique n'entre pas dans le cadre de PANGEA. Les recherches proposées utilisant des inversions de modèles feront l'objet d'un examen par les pairs qui devrait permettre d'identifier les problèmes liés aux modèles de transport utilisés.

La quantification des flux latéraux est un problème de recherche que nous avons identifié, mais nous n'avons pas identifié la solution.

- Il y a probablement des questions granulaires qui pourraient toujours être examinées plus en détail, mais je pense que le document de cadrage répond suffisamment aux préoccupations à ce stade.  
*Pas de réponse à ce commentaire.*
- Il est nécessaire de maintenir l'engagement avec les partenaires d'Afrique et d'Amérique du Sud, ce qui constitue un défi.

Nous sommes tout à fait d'accord. Dans la section 10, où nous discutons de l'organisation du projet, nous mentionnons un certain nombre de mécanismes destinés à faciliter les interactions permanentes. Les projets précédents nous ont appris qu'il est nécessaire d'établir des relations interpersonnelles solides basées sur un travail d'égal à égal. C'est toujours un défi pour toutes les personnes impliquées, mais comme nous l'avons appris au cours de l'analyse du cycle de vie, ce n'est pas un obstacle.

#### Q10. Pensez-vous que l'étude PANGEA favorisera des partenariats significatifs avec les parties prenantes (par exemple, les communautés locales, les gouvernements) ?

- Cela n'est pas facile mais pourrait être amélioré au fil des ans si l'on comprend les parties prenantes et les communautés locales... Les fêtes de Noël, etc. ne permettront pas d'intégrer les populations locales.

Nous sommes certains que le commentateur est ironique. Nous n'avons fait aucune mention d'activités telles que les fêtes de Noël. Le livre blanc contient une section complète (section 8) sur l'engagement communautaire et nous reconnaissons le défi et présentons des stratégies pour le relever. Nous attirons également l'attention sur un autre commentaire cité ici concernant la confiance que nous inspire notre projet de livre blanc : "Le plan visant à impliquer les communautés locales et les gouvernements dès le début du plan est essentiel et j'ai le sentiment que le plan est

très conscient de toutes les dynamiques qui peuvent émerger une fois que le projet est financé ; il y a beaucoup plus d'entités en jeu que pour ABoVE". "

- Oui, PANGEA peut favoriser des partenariats significatifs avec les parties prenantes. Mais comme je l'ai déjà dit, il sera important d'obtenir très tôt l'engagement et la participation du gouvernement. Il en va de même pour le secteur privé travaillant dans le secteur forestier, par exemple.

**Nous sommes d'accord avec ce commentaire. Nous fournissons la preuve que nous avons entamé le processus d'engagement dans nos annexes, y compris les lettres de soutien (annexe A) et les annexes B et C, qui détaillent les contacts que nous avons eus avec les gouvernements et d'autres institutions.**

- Comme il s'agit d'une campagne internationale, PANGEA renforcera les relations avec les gouvernements locaux et les ONG en fonction des thèmes abordés.
- Oui. Nous travaillons beaucoup plus avec les communautés qu'avec les autorités nationales.
- Je crois que oui. Les régions tropicales ont besoin de tout le soutien que nous pouvons leur apporter, à condition que ce soutien soit durable et non de pure forme. Je pense que ce document de cadrage aborde suffisamment cet aspect. J'encourage l'équipe à continuer d'éviter la "science des hélicoptères" au premier plan de son travail (comme elle l'a fait dans le présent document).
- PANGEA est impressionnante par la manière dont elle formera des partenariats efficaces avec les parties prenantes.
- Oui, je crois que le projet a déjà réussi à rassembler un groupe d'entités très engagées. Je pense également qu'au fur et à mesure que le projet progresse, de nombreuses autres personnes s'y intéresseront. Le problème de la conservation des forêts devient une préoccupation universelle et la tendance est à l'augmentation des partenariats.
- Oui, parce que PANGEA, s'il est financé, apportera des solutions à certains défis auxquels les parties prenantes et les gouvernements sont confrontés. Par exemple, ici au Bénin, dans la réserve forestière de Lama (sud du Bénin), une mosaïque de forêts naturelles, dégradées et de plantations de Teck gérées à la fois par l'agence nationale des bois et forêts cherche à lutter efficacement contre les feux de brousse pendant la saison sèche. Ceux-ci consomment beaucoup d'arbres et affectent probablement la productivité de leurs plantations et donc leurs économies. Ainsi, l'étude PANGEA favorisera sans aucun doute un partenariat significatif avec les parties prenantes.

**Nous apprécions ces commentaires et n'avons pas de réponse directe.**

- Dans l'idéal, mais dans sa forme actuelle, la proposition est très vague lorsqu'il s'agit de démontrer comment fonctionneront des partenariats durables et à long terme pour l'exploitation et la maintenance des réseaux d'observation. Garantir un fonctionnement continu du réseau avec un partage des données en temps réel est une entreprise de grande envergure sous les tropiques, qui nécessite le soutien et l'engagement de tous les niveaux de gouvernance nationaux, et pas seulement des communautés de recherche. Le déploiement d'experts, de communications et de technologies dans les domaines PANGEA nécessite une coordination entre plusieurs acteurs sur le terrain, mais la proposition semble se concentrer intensément sur les institutions de recherche, qui ont un champ d'action limité pour relever les défis juridiques, politiques et socio-économiques auxquels les campagnes sur le terrain seront confrontées.

Le Livre blanc présente un plan conceptuel et non un plan opérationnel. Bon nombre des questions soulevées ici sont d'ordre opérationnel. C'est peut-être ce qui explique que le plan soit qualifié de "vague". Grâce à sa longue histoire de campagnes, notamment LBA et ABoVE, le bureau de projet de la NASA a démontré son succès dans les déploiements sur le terrain, la collecte et le partage des données.

- Tout dépend de ce que PANGEA fera pour atteindre cet objectif. La mise en place de ces partenariats nécessite un certain nombre de conditions préalables qui me semblent indispensables pour que le projet PANGEA atteigne ses objectifs. En effet, sans le soutien des communautés locales vivant dans les sites candidats identifiés et choisis par le projet PANGEA, et dont les espaces communautaires sont inclus dans l'étude à des fins expérimentales, PANGEA risque d'être rejeté par ces populations. Il est donc nécessaire et indispensable que le projet PANGEA mène des actions auprès de ces populations afin de garantir leur soutien et leur acceptation du projet PANGEA. De même, sans l'appui des gouvernements des pays tropicaux, notamment ceux du Bassin du Congo, le PANGEA ne pourra pas atteindre ses objectifs. Pour cette raison, le caractère formel et légal du respect de la législation sur l'accès aux territoires ou paysages candidats ne suffira pas. Il sera nécessaire d'intégrer des motivations et des incitations supplémentaires adressées directement à ces communautés locales et aux membres du gouvernement afin d'encourager l'établissement de partenariats significatifs avec ces deux entités. Cela garantira leur pleine coopération et leur soutien aux objectifs du projet PANGEA.

Il est toujours important d'établir des relations avec les partenaires gouvernementaux et locaux. Il s'agit là d'un commentaire précieux.

#### **Q11. Y a-t-il d'autres parties prenantes ou communautés qui auraient dû être impliquées dans l'étude PANGEA ?**

- *Las comunidades campesinas y nativas o cualquier otra que este posesionada en el territorio donde se desarrollara el proyecto, ya ellos cuentan con saberes ancestrales. [Les communautés paysannes et indigènes ou toute autre communauté située sur le territoire où le projet sera développé, possèdent déjà des connaissances ancestrales].*

PANGEA exprime son intérêt pour l'intégration des connaissances autochtones, locales et traditionnelles dans la télédétection. Voir, par exemple, la section 9.1 du livre blanc.

- Le projet a couvert la quasi-totalité des parties prenantes nécessaires au projet.
- Bien sûr, mais il ne sera possible de l'identifier clairement que sur le terrain. Le projet devrait donc être ouvert à un élargissement du champ d'application.
- Le secteur privé, en particulier celui de la sylviculture, de l'agriculture et de l'exploitation minière, devrait être fortement impliqué.
- Il serait bon d'impliquer directement les communautés locales (leur représentant), sans passer par les autorités. Pour éviter les fraudes.
- Il serait également judicieux d'inclure le réseau des parlementaires africains, qui sont souvent impliqués dans la conservation et la gestion durable des écosystèmes forestiers en Afrique centrale.

Nous n'avons pas de réponse spécifique à ces commentaires.

- Je ne sais pas s'il est possible d'inclure des initiatives de la NASA dans le champ d'application lui-même, mais l'équipe GeoNEX parrainée par la NASA (<https://www.nasa.gov/nasa-earth-exchange-nex/earth-observations-geonex/data-products/>) a joué un rôle déterminant dans la création et la diffusion de produits de données géostationnaires sur plusieurs satellites.

Nous avons reconnu l'importance des observations géostationnaires (par exemple, à la section 3.1), mais nous n'avons pas spécifiquement mentionné GeoNEX. Nous sommes conscients de ces activités et elles ont beaucoup à apporter à PANGEA.

- Toute étude de cette envergure doit garder l'esprit ouvert pour inclure d'autres parties prenantes qui pourraient être présentes, bien que du côté scientifique, je pense que la communauté des sciences expérimentales semble être laissée de côté. Je comprends que la NASA se concentre sur les observations (en particulier à partir de satellites), mais il me semble déplacé d'exclure l'enrichissement en CO<sub>2</sub> de l'AMAZON FACE, l'expérience de sécheresse EsecaFlor, le TmFO (Tropical managed Forest Observatory) pour les perturbations forestières, et la forêt expérimentale de Luquillo. Les observations satellitaires ciblées sur ces sites peuvent contribuer à éclairer les questions scientifiques auxquelles le programme tente de répondre.

Nous avons déjà répondu à la question des expériences sur les écosystèmes (voir ci-dessus).

- Je pense qu'il serait possible d'énumérer les partenaires universitaires dans les régions.

Les annexes B, C et D énumèrent un grand nombre de ces partenaires.

- Le World Environmental Conservancy (WEC), une fondation privée américaine à but non lucratif, serait heureux de participer à ce projet. Le WEC compte de nombreux Brésiliens impliqués dans ses projets, qui font partie d'universités, d'instituts et d'entités brésiliennes, et qui seraient probablement heureux de fournir le soutien nécessaire sur place.

C'est une excellente nouvelle. PANGEA prendra contact avec vous.

- Je suggère d'inclure les forêts de montagne (terra firme) conservées le long de la PA-370 (km 107) (2°53'7.95 "S ; 53°57'37.79 "W). Elles se trouvent sur des sols argileux et présentent une grande diversité de grands arbres tels que les noix du Brésil (*Bertholletia excelsa*). Cette zone constitue une nouvelle frontière agricole régionale. Il s'agit d'un paysage peu étudié qui fait partie de ma recherche de thèse. La région plus vaste de Curuá-Una à Santarém présente des caractéristiques des anciennes et nouvelles frontières, à savoir des champs monoculturaux de plusieurs décennies (ancienne frontière) et une déforestation continue pour l'expansion de la monoculture (nouvelle frontière) (Coelho et al., 2021 ; Schielein & Börner, 2018). La région se trouve sur le plateau de Santarém, une vaste zone de hautes terres adjacente au confluent des fleuves Tapajós et Amazone (Barros et al., 2020). En voyageant de Santarém vers Uruará sur l'autoroute PA-370, on constate des différences marquées dans l'utilisation des terres et la conservation des forêts entre les zones avant et après le barrage hydroélectrique de Curuá-Una. Avant le barrage, il y a une zone occupée depuis longtemps à des fins agricoles (à partir des années 1960), avec une prédominance actuelle de champs monoculturaux à grande échelle (soja/maïs). Après le barrage, l'occupation est beaucoup plus récente (à partir des années 2010) et la couverture forestière est beaucoup plus importante. La présence de zones avec des temps d'occupation différents permet une analyse temporelle de l'utilisation des terres, qui pourrait être une lentille utile pour comprendre l'hétérogénéité de la dynamique forestière. Je pense que l'inclusion de ce paysage fournirait i) des données convaincantes à comparer avec la forêt nationale de Tapajós (km 67 de la BR-163), qui a été bien étudiée, et ii) des informations utiles pour comprendre les paysages forestiers tropicaux. J'ai établi

des partenariats avec les communautés locales de cette région (Association des agriculteurs d'Aprocad), une coopérative de petits exploitants agricoles (COOPBOA - Coopérative des agriculteurs familiaux de la communauté de Boa Esperança) et des chercheurs locaux de l'Université fédérale du Pará (UFOPA), à Santarém - Dr. Tiago Vieira, Helionora Alves, Diego Amoedo- et à l'Université fédérale du Pará occidental (UFPA), à Belém - Dr Valério Gomes, Dr Raquel Santos, et Dr Katiane Silva.

Il s'agit d'une excellente suggestion pour l'extension du paysage potentiel près de Santarém. Elle constitue une zone riche en comparaisons avec la BR-163.

- En Colombie, je suggère d'inclure la communauté El Caraño (01°44'47.1" N, 075°41'35.9" W), située sur les pentes orientales de la crête des Andes orientales, entre les écosystèmes andins et amazoniens à Florencia, Caquetá. Les Andes tropicales comptent parmi les régions du monde les plus diversifiées sur le plan biologique en termes de richesse des espèces et d'endémisme. Les taux élevés de biodiversité sont souvent attribués aux caractéristiques et aux changements du paysage au fil du temps (Moritz et al. 2000 ; Trénel et al. 2008 ; Sarkinen et al. 2012). La forêt tropicale montagnarde des nuages (TMCF) est un écosystème tropical andin qui joue un rôle essentiel dans les cycles de l'eau locaux et régionaux (Aldrich et al. 1997 ; Fahey et al. 2016). Cependant, l'expansion de l'agriculture et de l'urbanisation est à l'origine d'une déforestation importante dans les zones de la TMCF (Etter & Wyngaarden 2000 ; Armenteras et al. 2003). Par conséquent, cet écosystème a été fortement fragmenté (Aldrich et al. 1997 ; Brummitt & Lughadha 2003 ; Gotsch et al. 2015). Les forêts nuageuses caractéristiques de la région sont remarquables pour leur forte présence de la famille des Arecaceae, avec 24 genres et 109 espèces de palmiers (Borchsenius & Moraes 2006). J'ai également des partenaires en Colombie qui pourraient grandement contribuer à ce projet : Oscar Perdomo (professeur titulaire à l'université de Boyacá) et Edwin Trujillo (professeur à l'université de l'Amazonie).

Les environnements montagnards sont sans aucun doute importants, mais nous avons décidé de les exclure de PANGEA parce qu'ils couvrent de très petites surfaces par rapport aux basses terres et qu'ils nécessitent un échantillonnage spécifique et détaillé pour tenir compte de l'hétérogénéité des caractéristiques topographiques et édaphiques, ce qui, en raison des ressources limitées, limiterait l'échantillonnage dans d'autres gradients à grande échelle.

## Q12. Y a-t-il des domaines dans lesquels l'approche de la diversité et de l'inclusion pourrait être améliorée ?

- *Si, en comunidades establecidas en el ámbito del bosque, ya que ellos son lo que hacen uso directo del bosque o ecosistema. [Oui, dans les communautés établies dans la zone forestière, car ce sont elles qui utilisent directement la forêt ou l'écosystème].*
- *Approche basée sur le dynamique social, la prise en compte du gémi local des communautés local à la base, l'implication des communautés local dans les prise des décision , la prise en compte des aspect de la protection transversale , l'inclusion social , lutte contre la violence basée sur le Genre,l'implication des ONG national dans la mise en œuvre des activités , le renforcement des capacités des communautés local a la base , la formation professionnelle et techniques , l'appui pour la résilience des communautés local a la base , appui pour le développement économique social et durable , la mobilisation communautaire. [Approche basée sur la dynamique sociale, la prise en compte des doléances locales des communautés locales à la base, l'implication des communautés locales dans la prise de décision, la prise en compte des aspects de protection transversale,*

l'inclusion sociale, la lutte contre les violences basées sur le genre, l'implication des ONG nationales dans la mise en œuvre des activités, le renforcement des capacités des communautés locales à la base, la formation professionnelle et technique, l'appui pour la résilience des communautés locales à la base, l'appui pour le développement économique social et durable, la mobilisation communautaire].

Travailler avec les communautés locales nécessitera des partenariats locaux solides. Voir la section 8 du livre blanc pour notre stratégie, qui a été considérablement révisée par rapport au premier projet.

- Le projet a établi des liens étroits avec les communautés autochtones et locales, et je sais que cela n'entre pas nécessairement dans le champ d'action de la NASA, mais le fait de relier les résultats aux communautés américaines mal desservies peut encore améliorer les résultats, contribuer à la formation de la prochaine génération de scientifiques américains et améliorer l'avenir de la collaboration internationale.

Le développement de la main-d'œuvre est l'un des domaines dans lesquels PANGEA peut se rapprocher des communautés américaines mal desservies. Cela peut être possible en participant aux programmes RISE (Research, Innovation, Synergies, and Education) et GOLD-EN (Geoscience Opportunities for Leadership in Diversity) de la NSF (section 7.1).

- Pas à ma connaissance. L'équipe a fait un travail remarquable et utilise des méthodologies éprouvées pour être inclusive.

Pas de réponse à ce commentaire, si ce n'est que nous l'aimons beaucoup.

### **Q13. Avez-vous d'autres suggestions ou commentaires concernant la campagne de terrain PANGEA proposée ?**

- *Es una brillante oportunidad para conservar y manejar sosteniblemente los ecosistemas tropicales.* [Il s'agit d'une excellente occasion de conserver et de gérer durablement les écosystèmes tropicaux].
- *Nous souhaitons signer une convention cadre de partenariat avec votre institution , travailler avec vous en partenariat consortium, bénéficier de l'assistance techniques , avoirs soutien financier, logistique équipement pour la mise en œuvre du projet.* [Nous souhaitons signer une convention cadre de partenariat avec votre institution, travailler avec vous en partenariat consortium, bénéficier de l'assistance technique, avoirs soutien financier, logistique équipement pour la mise en œuvre du projet.]
- Une meilleure communication autour de la campagne.
- Fournir beaucoup de temps et de ressources pour le travail sur le terrain, à mon avis, sera le plus grand défi, en particulier en Afrique.

Pas de réponse à ces commentaires.

- En cas de financement, créer un espace pour des collaborations externes afin d'aider à augmenter et à étendre le travail. Développer une infrastructure durable dans les régions étudiées. Sachez également que vous avez rédigé un excellent document de cadrage/proposition. C'est un plaisir de le lire !

Les collaborations extérieures joueront un rôle important dans la réussite de PANGEA (voir les sections 8 et 10.2). L'histoire montre que si le développement des infrastructures est important, il est bien plus important de développer les ressources humaines. Nous ferons tout ce qui est en notre pouvoir pour promouvoir ces deux aspects, comme le décrit le Livre blanc, mais les personnes seront notre priorité.

- J'aimerais que vous considériez deux paysages de forêt tropicale situés au Bénin comme candidats pour cette étude exploratoire. Ces deux paysages sont appropriés et répondent à tous les critères mentionnés dans le livre blanc (accessibilité, au moins 100 km<sup>2</sup> ; disponibilité d'une tour de mesure des flux ; etc.)
  - Le premier - Bellefoungou (9.79115 N ; 1.718 E) est établi au-dessus d'une forêt claire avec une covariance de tourbillon des flux d'énergie, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, des mesures au sol et météorologiques, des levés géophysiques. Bellefoungou fonctionne depuis 06/2008 jusqu'à aujourd'hui, ce qui permet de disposer de données de flux à long terme.
  - Le second - la réserve forestière de Lama (6.57360N ; 2.10480E). Le site de covariance de Foucault sera installé en 2025 au-dessus d'une mosaïque de forêts naturelles, dégradées et de plantations (*Tectona grandis* et *Senna siamea*). La réserve forestière de Lama est connue dans le monde entier et étudiée depuis longtemps. Sa superficie totale est estimée à 16 250 ha et elle est facile d'accès. Les perturbations anthropogéniques combinées au changement climatique influencent les conditions de croissance dans ce paysage et modifient les paramètres démographiques tels que la germination, la croissance des semis et des jeunes arbres et les taux de mortalité.

Ces sites du Bénin sont inclus dans les sites d'étude candidats au point 6.2.2.

## G. Sujets hors du champ d'application de PANGEA

Bien que PANGEA soit ambitieuse et intégrative, plusieurs sujets ont été jugés hors de portée par les groupes de travail et la direction de PANGEA. Ces sujets sont énumérés dans le tableau G-1.

<b>Tableau G-1.</b> Éléments, thèmes et questions dont il a été déterminé qu'ils dépassaient le champ d'application de PANGEA	
POINT/SUJET/QUESTION EXCLU(E)	POURQUOI
<b>COMMENT LES STOCKS DE CARBONE DU SOL ÉVOLUENT-ILS ?</b>	Il n'existe pas de lien direct avec la télédétection, et la minéralogie est plus importante que la productivité pour le contrôle des stocks de carbone. Les tours de mesure des flux par covariance des tourbillons ne peuvent pas séparer la respiration autotrophe de la respiration hétérotrophe, et il y a trop d'hétérogénéité à l'échelle entre les chambres de sol et les tours.
<b>OXYDE NITREUX (N<sub>2</sub> O)</b>	Les forêts tropicales constituent une importante source mondiale de N <sub>2</sub> O. Toutefois, en raison de la durée de vie extrêmement longue de N <sub>2</sub> O dans la troposphère, il est difficile de quantifier les sources et les puits régionaux et locaux à l'aide de techniques qui dépendent de l'échantillonnage atmosphérique, telles que l'inversion de flux et la covariance de Foucault. L'absence de ces techniques descendantes se traduit par des contraintes limitées sur les sources et les puits régionaux et locaux de N <sub>2</sub> O. Les mesures de l'écosystème N <sub>2</sub> O se limitent principalement à des techniques en chambre. Les flux de N <sub>2</sub> O étant très épisodiques et variables dans l'espace, l'effort d'échantillonnage nécessaire pour quantifier correctement les sources de N <sub>2</sub> O est très important. Malgré l'importance de N <sub>2</sub> O, les coûts d'une quantification adéquate de N <sub>2</sub> O sont très élevés par rapport à d'autres études pouvant être réalisées dans le cadre de PANGEA.
<b>MANGROVES ET FORÊTS DE MONTAGNE</b>	Les mangroves tropicales et les forêts de montagne constituent toutes deux des domaines relativement restreints au sein des tropiques au sens large, bien qu'elles soient toutes deux très pertinentes en raison de l'adaptation unique des organismes aux micro-environnements et qu'elles contribuent de manière importante au cycle du carbone. Les environnements montagnards et côtiers nécessitent un échantillonnage spécifique et détaillé pour tenir compte de l'hétérogénéité des caractéristiques topographiques et édaphiques, ce qui limiterait l'échantillonnage dans d'autres gradients à grande échelle. Les environnements côtiers posent des problèmes supplémentaires en ce qui concerne le calendrier d'échantillonnage (en particulier pour le lidar). PANGEA a toutefois la possibilité d'aligner ses efforts sur ceux d'autres recherches sur les mangroves tropicales et les forêts de montagne.
<b>COMMENT AMÉLIORER LA DURÉE ET LA FIABILITÉ DES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES SOUS LES TROPIQUES ?</b> <b>COMMENT AMÉLIORER LES PRÉVISIONS DE LA VARIABILITÉ ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUES DANS LES TROPIQUES ?</b>	Il s'agit de questions scientifiques importantes, mais elles ont été considérées comme n'entrant pas dans le cadre d'une campagne d'écologie terrestre sur le terrain. Cependant, les résultats de PANGEA concernant une meilleure compréhension des contrôles de la biosphère sur les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone contribueront indirectement à l'amélioration des prévisions météorologiques et des prévisions de la variabilité climatique.
<b>FONCTIONNEMENT DES RACINES ET INTERACTIONS ENTRE LA FAUNE DU SOL ET LES MICRO-ORGANISMES, D'UNE PART, ET LE FONCTIONNEMENT DE L'ÉCOSYSTÈME, D'AUTRE PART</b>	Ces sujets n'ont pas été inclus dans le champ d'application principal de PANGEA en raison des défis actuels de la mise à l'échelle des processus souterrains à l'aide de la télédétection. Des éléments de ce domaine de recherche peuvent être inclus dans des projets synergiques avec des activités en cours ou à venir.

**Tableau G-1.** Éléments, thèmes et questions dont il a été déterminé qu'ils dépassaient le champ d'application de PANGEA

POINT/SUJET/QUESTION EXCLU(E)	POURQUOI
<b>COMMENT LES NUTRIMENTS SONT-ILS DISTRIBUÉS VERTICALEMENT DANS LE COUVERT FORESTIER (CONCENTRATION, SAISONNALITÉ, VARIATION EN FONCTION DES RESSOURCES ET DE LA GÉOGRAPHIE) ?</b>	L'étude de l'hétérogénéité verticale des caractéristiques des feuilles nécessiterait un échantillonnage beaucoup plus intensif sur le terrain, ce qui limiterait considérablement la capacité à saisir les variations à travers les gradients de la dynamique du sommet de la canopée. Il s'agit toutefois d'une question importante qui peut être étudiée à petite échelle dans le cadre de projets synergiques.
<b>QUELS SONT LES PROCESSUS DE SURFACE QUI DÉTERMINENT LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONVECTION, LES PRÉCIPITATIONS ET LES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES DANS LES FORÊTS TROPICALES, ET COMMENT SONT-ILS INFLUENCÉS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ?</b>	Ce thème de recherche est partiellement abordé dans la Q20, mais les mesures prévues dans le cadre de PANGEA ne seront pas suffisantes pour répondre à cette question dans le cadre d'un projet autonome. Des éléments de cette question peuvent être abordés dans le cadre de projets de collaboration plus vastes.
<b>COMMENT LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LES PHÉNOMÈNES EXTRÊMES INFLUENCENT-ILS LES INTERACTIONS NUAGES-AÉROSOLS, LA CHIMIE ATMOSPHÉRIQUE ET LES RÉTROACTIONS ENTRE LES FORÊTS TROPICALES, LA TERRE ET L'ATMOSPHÈRE ?</b>	Les mesures prévues dans le cadre de PANGEA ne seront pas suffisantes pour répondre à cette question en tant que projet autonome. Des éléments de cette question peuvent être abordés dans le cadre de projets de collaboration plus vastes.
<b>COMMENT LES FACTEURS SOCIO-ÉCONOMIQUES, TELS QUE LE RÉGIME FONCIER, L'ACCESSIBILITÉ ET LA POLITIQUE, INTERAGISSENT-ILS AVEC LES FACTEURS BIOPHYSIQUES ET CLIMATIQUES POUR INFLUENCER LA RÉGÉNÉRATION DES FORÊTS ET LA FOURNITURE DE SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ?</b>	Cette question constitue une base importante pour comprendre pourquoi l'utilisation et la couverture des sols changent. Cependant, cette question repose davantage sur des données sociales, politiques et économiques et il n'existe pas de lien clair entre cette question et la télédétection. Certains projets financés par PANGEA pourraient choisir d'aborder cette question en utilisant des méthodes innovantes. Il existe également des possibilités d'aligner les activités de PANGEA sur les efforts connexes visant à répondre à cette question.
<b>QUELS SONT LES LIENS ENTRE LES POINTS DE BASCULEMENT SOCIAUX ET LES POINTS DE BASCULEMENT ÉCOLOGIQUES DANS LES TROPIQUES, ET COMMENT VARIENT-ILS DANS LES DIFFÉRENTES GÉOGRAPHIES TROPICALES ?</b>	Bien qu'il soit nécessaire de comprendre la relation entre la façon dont les rétroactions sociales et écologiques influencent le potentiel des forêts tropicales à atteindre des transitions critiques, il n'y a pas de lien direct entre cette question et la télédétection. Certains projets financés par PANGEA pourraient choisir d'aborder cette question en utilisant des méthodes innovantes. Il existe également des possibilités d'aligner les activités de PANGEA sur des efforts connexes visant à répondre à cette question.
QUESTIONS PERTINENTES RELEVANT DU CHAMP D'APPLICATION DE PANGEA MAIS NON DIRECTEMENT DÉFINIES DANS LE LIVRE BLANC	
<b>DANS quelle mesure les projections des modèles terrestres sont-elles sensibles aux différents paramétrages de la diversité fonctionnelle des plantes (par exemple, paramétrages de la diversité pantropicale ou spécifique à un continent ; diversité au sein des communautés simulées/cellule de la grille) ? Quels traits fonctionnels manquent dans les paramétrages ?</b>	Ces deux questions ne sont pas incluses dans les questions scientifiques de PANGEA car elles ne sont pas directement liées aux mesures de télédétection. Cependant, la quantification et la limitation de l'incertitude des paramètres des modèles constitueront un mécanisme majeur par lequel les modèles seront intégrés aux observations, et le manque de traits fonctionnels pouvant être mesurés par PANGEA sera évalué en consultation avec les modélisateurs lors de l'élaboration du plan expérimental concis.
<b>Quels sont les impacts des effets de lisière sur la résilience et la complexité structurelle des forêts ?</b>	Cette question n'est pas directement répertoriée comme une question scientifique clé de PANGEA, mais elle fera partie d'une enquête plus large sur les impacts de plusieurs questions (par exemple, Q15, Q16, Q20).

**Tableau G-1.** Éléments, thèmes et questions dont il a été déterminé qu'ils dépassaient le champ d'application de PANGEA

POINT/SUJET/QUESTION EXCLU(E)	POURQUOI
<b>COMMENT LES DIFFÉRENCES DANS L'HÉRITAGE DE LA DÉFORESTATION ET DE LA DÉGRADATION ENTRE LES CONTINENTS AFFECTENT-ELLES LA RÉGÉNÉRATION DES FORÊTS ET LA RESTAURATION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES CLÉS ?</b>	Cette question repose principalement sur des données historiques, qui peuvent être hors du champ d'application de PANGEA. Cependant, cette ligne de recherche sera fondamentale pour contextualiser les observations dans PANGEA et sera abordée dans le cadre de partenariats (par exemple, MapBiomas).