



PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation) : Définition de la portée d'une campagne de terrain parrainée par la NASA

Les forêts tropicales sont les plus riches en biodiversité de la planète et représentent 40 % de la biomasse terrestre et 20 % des émissions mondiales annuelles de méthane (CH_4). Elles pompent de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, refroidissant les tropiques tout en arrosant les fermes de la zone tempérée. Les forêts tropicales ont toujours été d'importants puits de carbone, mais la déforestation, les sécheresses et tempêtes extrêmes et les incendies de plus en plus fréquents transforment certaines régions en sources nettes de carbone. Il est important de noter que ce renversement n'est pas uniforme. Les paysages forestiers tropicaux diffèrent par leurs tendances récentes en matière de flux de carbone, leur sensibilité aux événements extrêmes et leurs interactions avec les changements climatiques et les modifications de l'utilisation des sols. Des histoires évolutives différentes et une énorme hétérogénéité dans les conditions environnementales et les interactions humaines sous-tendent des variations régionales potentiellement importantes dans la résilience des forêts tropicales, avec des conséquences pour l'ensemble du système terrestre. Cependant, d'importantes lacunes dans les données nous empêchent de confirmer cette hypothèse et d'utiliser au mieux les données satellitaires. Les changements régionaux ont des répercussions mondiales sur la dynamique du cycle du carbone et la perte de biodiversité, ce qui nécessite des actions adaptées au niveau régional pour atténuer ces résultats et conserver les biomes forestiers tropicaux d'importance mondiale. PANGEA est une nécessité urgente pour combler les lacunes de connaissances critiques concernant les changements climatiques rapides et à grande échelle et les changements d'utilisation des terres qui sont déjà en cours dans les forêts tropicales.

PANGEA étudiera si les forêts tropicales - en particulier celles d'Afrique et des Amériques - connaîtront le même sort ou si elles réagiront différemment au changement.

En 2022, la NASA a lancé un appel pour des études de cadrage afin de guider la sélection d'une nouvelle campagne de terrain sur l'écologie terrestre. *Le PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA) a répondu à cet appel en proposant une campagne multi-échelle sur les forêts tropicales :

- **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 à la recherche et aux applications futures.

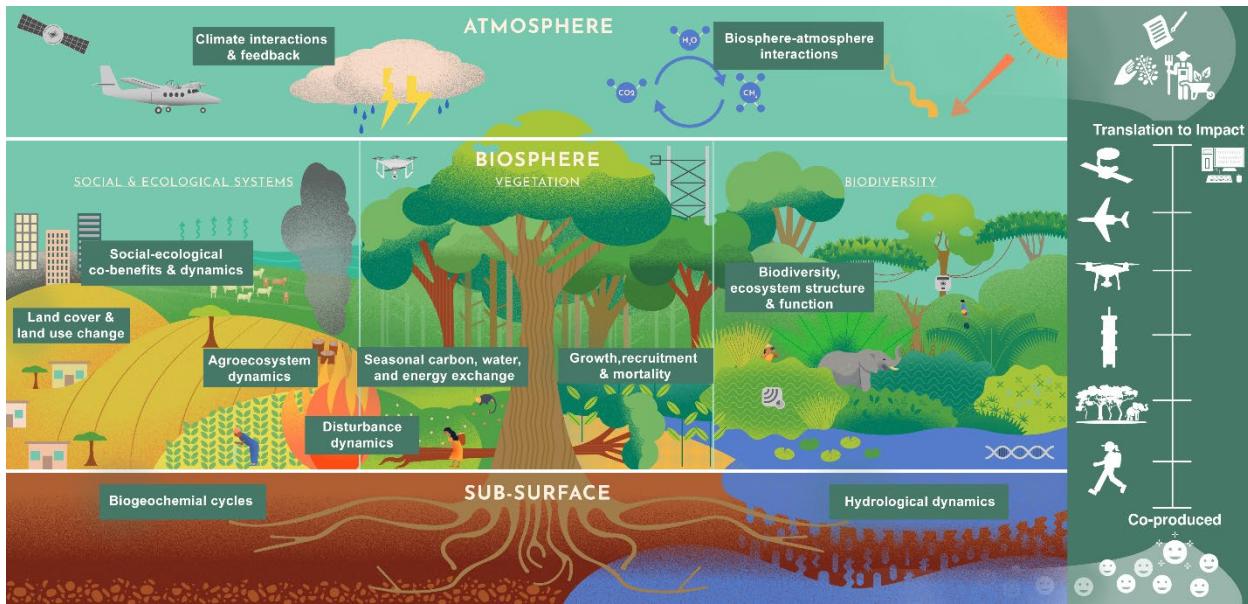
Nous vivons une période sans précédent, riche en données, en modèles et en calculs. Grâce aux observations satellitaires nouvelles et à venir utilisant le lidar, le radar et la spectroscopie d'imagerie, il est possible d'étudier et d'observer la biomasse des forêts tropicales, les flux de carbone, la biodiversité et les fonctions des écosystèmes de manière plus détaillée que jamais. PANGEA est essentiel pour permettre la coordination des mesures au sol, aéroportées et satellitaires opérant simultanément afin de surmonter ces limitations.

PANGEA étudiera les variations entre et au sein des deux plus grandes forêts tropicales de la planète, en **Amérique** et en **Afrique centrale**, tout en intégrant des ensembles de données et des recherches provenant d'activités existantes et complémentaires dans l'ensemble des tropiques. Les questions de recherche de PANGEA se concentrent sur cinq domaines thématiques : les **cycles biogéochimiques**, la **biodiversité**, les **interactions et rétroactions climatiques**, les **systèmes socio-écologiques** et la **dynamique des perturbations**. Pour éclairer les stratégies d'atténuation et d'adaptation au climat et la conservation de la biodiversité, il faut répondre à trois questions essentielles :

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, les **objectifs de PANGEA** sont les suivants :

1. **Caractériser et quantifier les** réponses hétérogènes des forêts tropicales aux changements climatiques et aux modifications de l'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.



Mesures et mise à l'échelle de PANGEA. PANGEA adopte une approche intégrée de la science et des applications, avec des mesures au sol, à la tour, par drone et par avion dans les paysages forestiers tropicaux d'Afrique et des Amériques. Les analyses de modélisation et de télédétection par satellite intègrent des données pan-tropicales.

La structure et la biomasse des forêts pan-tropicales peuvent désormais être étudiées à l'aide du lidar spatial de **GEDI** et des missions radar à venir, notamment la mission **NISAR** de la NASA-ISRO et la mission **Biomass** de l'ESA. Aujourd'hui, nous pouvons étudier en détail la diversité et la chimie foliaires des écosystèmes et des cultures en utilisant la spectroscopie haute fidélité des missions actuelles, notamment les missions **EMIT** et **PACE** de la NASA et **PRISMA** de l'Agence spatiale italienne, ainsi que les futures missions **SBG** de la NASA et **CHIME** de l'ESA. La fluorescence solaire induite par le couvert végétal (SIF), un corrélat de la productivité primaire brute (PPB), est désormais mesurée par des instruments installés sur plusieurs plates-formes satellitaires, notamment **OCO-2**, **OCO-3** et **TROPOMI**. La température de la surface terrestre est depuis longtemps disponible à une résolution grossière grâce aux satellites météorologiques et est maintenant mesurée à une résolution de 70 m par **ECOSTRESS**, ce qui donne de nouvelles indications sur l'évapotranspiration. Les observations par satellite de la colonne totale de CO₂ (par exemple **GOSAT**, **OCO-2/3** et **TROPOMI**) et des anomalies gravitationnelles (**GRACE** et **GRACE-FO**) fournissent des contraintes régionales sur les bilans du carbone atmosphérique et de l'eau. De même, les mesures du niveau des eaux de surface sont désormais disponibles depuis l'espace grâce à **SWOT**. Des données à haute résolution spatiale et temporelle sur la surface terrestre sont désormais disponibles à partir de sources telles que Planet et la série de missions géostationnaires **GOES-R**. Beaucoup de ces sources d'information ont à peine été utilisées pour les études sur les forêts tropicales. **PANGEA soutient l'étalonnage et la validation, le développement d'algorithmes et de produits, ainsi que l'utilité globale de ces satellites actuels et futurs de la NASA et des agences spatiales partenaires.** La campagne coordonnée à plusieurs échelles de PANGEA intègre les mesures des drones et des avions (par exemple, AVIRIS, LVIS, lidar à faible empreinte, UAVSAR, CARAFE) avec les mesures au sol (par exemple, les mesures des tours de flux et des chambres, les mesures des traits, les mouvements des animaux, la bioacoustique et les connaissances écologiques indigènes) pour faire progresser la compréhension des systèmes forestiers tropicaux et l'utilité de la télédétection par satellite pour les mesurer et les surveiller.

Les forêts tropicales sont les moins étudiées de tous les principaux biomes terrestres de la planète.
La rareté des observations dans les régions tropicales rend difficile l'extrapolation des résultats obtenus sur des sites de recherche individuels aux niveaux régional, pan-tropical et mondial.

PANGEA s'appuie sur les campagnes aériennes et de terrain très réussies de la NASA en Afrique et en Amérique du Sud, notamment **SAFARI 2000**, **LBA**, **AfriSAR-1 et -2**, **BioSCape** et plusieurs missions Earth Venture Suborbital (EVS). PANGEA s'appuiera sur ces précédents pour permettre aux chercheurs financés par la NASA de répondre à des questions scientifiques cruciales en comparant les principaux systèmes forestiers tropicaux. Parmi les réalisations récentes qui démontrent la faisabilité, on peut citer la campagne AfriSAR-2 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. Ces campagnes fournissent des données initiales précieuses, mais il reste un besoin crucial de mesures terrestres, aériennes et satellitaires colocalisées et coïncidentes dans les paysages tropicaux extrêmement variables, afin de saisir les variations de la structure et de la fonction des écosystèmes à l'intérieur des continents et d'un continent à l'autre. Ces mesures coïncidentes sont particulièrement importantes en Afrique, où les lacunes en matière de données sont les plus importantes et où la compréhension des processus est la plus médiocre.

La campagne PANGEA serait exécutée sur une période de 6 à 9 ans, commençant en 2026 après la phase de définition scientifique. Nous obtenons les **mesures scientifiques essentielles de référence, de seuil et de déscope** à partir des objectifs scientifiques de PANGEA :

- **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.

PANGEA comprendra un domaine principal et un domaine étendu. Le domaine étendu englobera les forêts pan-tropicales et sera prioritaire pour la télédétection par satellite et les analyses de modélisation. Le domaine central de PANGEA se concentrera sur les biomes tropicaux d'Afrique et des Amériques. Les domaines central et étendu engloberont les forêts tropicales humides, y compris les forêts inondées, les zones humides et les tourbières. Le domaine étendu permettra d'inclure des ensembles de données existants et de procéder à des collectes opportunistes en Asie et en Australie.

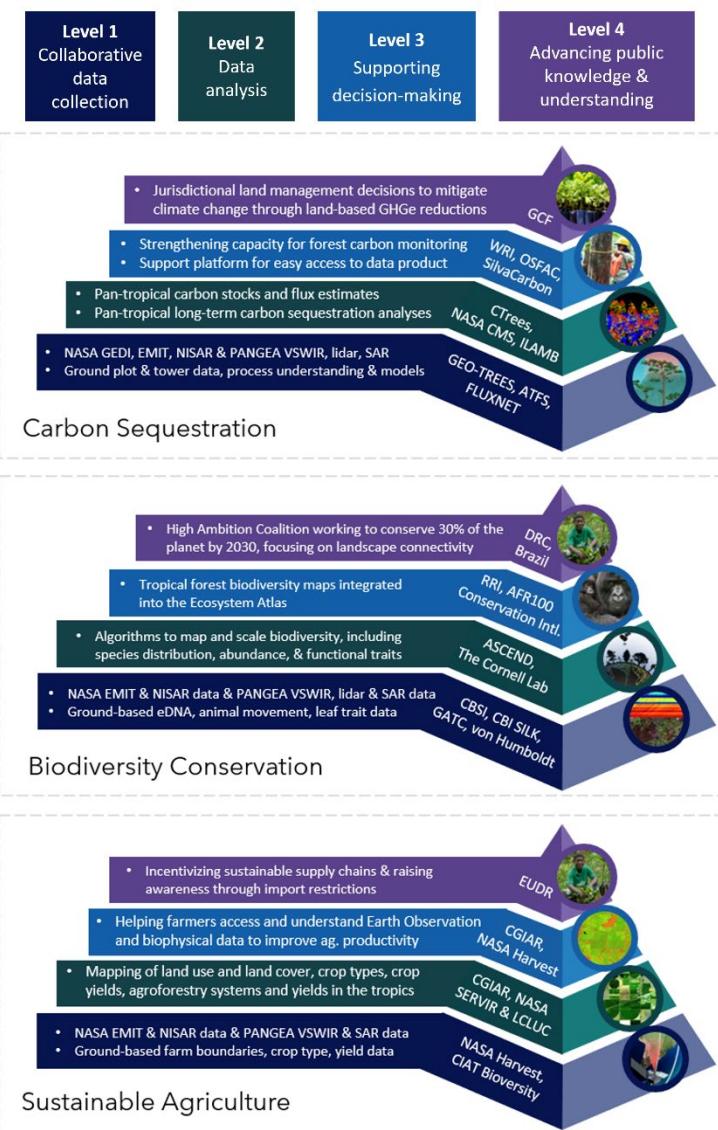
PANGEA coordonnera étroitement la sélection des paysages avec les efforts qui sont activement en train de sélectionner des sites pour la collecte de données complémentaires et l'investissement dans l'infrastructure. Il s'agit notamment de GEO-TREES, de la campagne INPE-ESA sur l'Amazonie, de l'initiative One Forest Vision, des mesures sur le terrain du méthane tropical et des tourbières financées par la Fondation Moore et la 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 sera formalisé dans le cadre du plan expérimental concis afin de garantir la transparence. 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.

En partenariat avec les institutions locales, PANGEA donnera la priorité à la formation, au renforcement des capacités et à l'éducation afin de préparer la prochaine génération à poursuivre ce travail bien après la campagne PANGEA. PANGEA est une occasion importante d'améliorer la compréhension des observations de la Terre et d'étendre l'utilisation des données, des produits et des services de la NASA dans le monde entier. En faisant progresser les connaissances sur les forêts tropicales, leur vulnérabilité et leur résistance aux changements climatiques, PANGEA développera des méthodes innovantes, compilera des ensembles de données précieuses et produira des résultats essentiels qui aideront les scientifiques, les gouvernements, les peuples autochtones et les communautés locales, les spécialistes de la conservation, les entreprises privées et bien d'autres à comprendre leurs impacts environnementaux et à prendre des mesures urgentes pour atténuer les changements climatiques et la perte de biodiversité, et pour s'y adapter.

PANGEA partage l'objectif stratégique de NASA Earth Science de faire progresser et d'intégrer les connaissances en sciences de la Terre pour permettre à l'humanité de créer un monde plus résilient au cours de la prochaine décennie. Le renforcement des capacités et l'investissement dans l'éducation associés à PANGEA sont au cœur de cet objectif et sont essentiels pour préparer la prochaine génération avec l'expertise et les outils nécessaires. Le renforcement des capacités, la formation et l'éducation dans le cadre de PANGEA cibleront les communautés de chercheurs et de travailleurs basés aux États-Unis, ainsi que les communautés locales et nationales des pays forestiers tropicaux partenaires de PANGEA. PANGEA s'associera aux programmes existants de la NASA, ainsi qu'aux institutions collaboratrices locales et internationales, afin de planifier et d'exécuter des activités de formation adaptées à un éventail de stagiaires potentiels, y compris les étudiants, les scientifiques en début de carrière, la main-d'œuvre au sens large, ainsi que les populations autochtones et les communautés locales.

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 et applicative des observations et analyses spatiales de la Terre pour la nation et le monde, d'une manière qui apporte une grande valeur ajoutée". Le moment est venu d'investir stratégiquement dans des collaborations internationales ambitieuses afin de combler le fossé entre les progrès rapides de la science et de la technologie et la capacité de la société à les exploiter pour créer un monde plus résilient. PANGEA s'inscrit parfaitement dans l'objectif stratégique de la NASA de faire progresser et d'intégrer les connaissances en sciences de la Terre afin de permettre à l'humanité de créer un monde plus résilient. Plus précisément, PANGEA soutient la stratégie "Earth Science to Action" de la NASA par les moyens suivants

- Étude des risques liés au franchissement de points de basculement susceptibles d'avoir des répercussions en cascade.
- Soutenir les efforts visant à renforcer la résilience de la Terre par l'atténuation et l'adaptation.
- Faciliter le développement d'outils, de modèles et de 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 décideurs et aux responsables politiques de prendre des mesures fondées sur des données scientifiques.



Stratégie de mise en œuvre de **PANGEA Earth Science to Action**, avec des domaines d'intervention potentiels dans la séquestration du carbone et l'atténuation du changement climatique, la conservation de la biodiversité et l'agriculture durable.

PANGEA développera de nouvelles capacités de surveillance du carbone, de la biodiversité et de l'agriculture à l'aide de la télédétection par satellite et soutiendra le développement d'outils permettant de traduire la science en action grâce à un partenariat avec divers partenaires, notamment les gouvernements, les CLPI, la société civile et l'industrie privée. Il s'agit notamment d'avancées dans les domaines suivants 1) la **cartographie à long terme de la stabilité du piégeage du carbone**, 2) la **surveillance des flux de méthane**, 3) la **conservation de la biodiversité** et 3) l'**agriculture durable**. PANGEA implique diverses communautés pour aborder les questions scientifiques et les applications de PANGEA, identifier les synergies avec les priorités de recherche locales et mettre en œuvre PANGEA d'une manière qui soit largement bénéfique dans les paysages et les pays ciblés pour la recherche. La stratégie s'appuie sur les connaissances, l'expertise et les expériences partagées tout au long de la campagne de cadrage de PANGEA. Elle complétera et développera de nombreux efforts existants, mais il est également urgent de combler les lacunes laissées par ces autres activités.

La coproduction est au cœur de la science et des applications transdisciplinaires de PANGEA et de la formation de la prochaine génération de scientifiques et de dirigeants.