



Estimation de la biodiversité des forêts tropicales par imagerie hyperspectrale : de l'approche expérimentale à la modélisation physique

J.-B. Féret, J.-P. Gastellu-Etchegorry, M.-J. Lefèvre-Fonollosa, C. Proisy & G. P. Asner

Colloque scientifique de la SFPT-GH
Porquerolles 2014

Déroulement de la présentation

- I. Introduction
- II. Aperçu du potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie de la biodiversité
- III. La modélisation du transfert radiatif pour une interprétation physique des résultats expérimentaux
- IV. Conclusion et perspectives

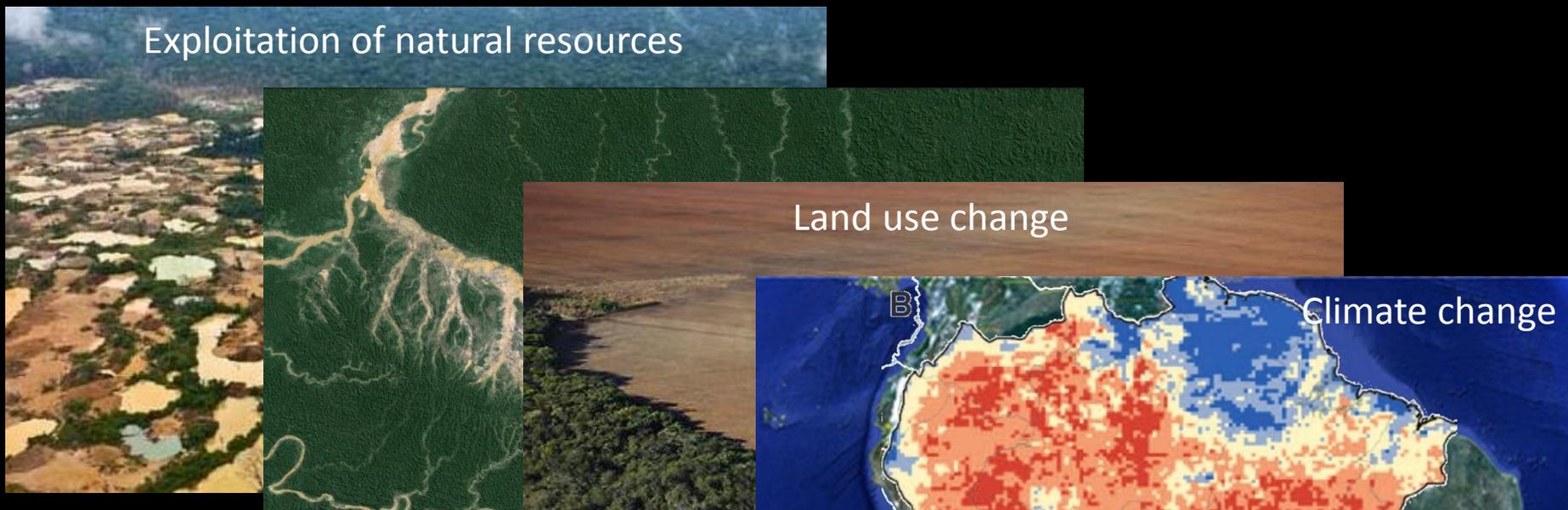
Déroulement de la présentation

I. Introduction

- II. Aperçu du potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie de la biodiversité
- III. La modélisation du transfert radiatif pour une interprétation physique des résultats expérimentaux
- IV. Conclusion et perspectives

Introduction : Contexte

Les forêts tropicales concentrent la majorité de la biodiversité terrestre. Nous assistons à l'augmentation continue de l'érosion de la biodiversité, sans pour autant comprendre les mécanismes associés à sa dynamique.



L'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale et la modélisation 3D permettent des avancées significatives dans le développement de méthodes et la compréhension des mécanismes liés à la biodiversité.

I. Introduction

Les écologues sont intéressés par plusieurs composantes de la biodiversité, dont :

- Présence / absence d'espèces en particulier :
→ *espèces invasives, menacées, indicatrices*
- Richesse et abondance en espèces à l'échelle locale :
→ *Diversité α*
- Distribution spatiale des communautés d'espèces :
→ *Diversité β*

La cartographie fine de ces informations permettrait de les comparer à des données géographiques, environnementales ou autres.

I. Introduction

L'identification des espèces d'arbres par télédétection aéroportée ou spatiale a été réalisée avec succès dans de nombreuses études ces dix dernières années :

- Classification supervisée à partir des signatures spectrales
→ Chimie foliaire et structure de la canopée

 Résolution spectrale trop faible = espèces non différenciables

- La combinaison d'information spectrale et spatiale améliore les résultats de la classification
→ Segmentation : info spatiale 2D; LiDAR : info spatiale 3D

 Résolution spatiale trop forte = ↗ variabilité spectrale intraclasses

I. Introduction

Même avec des données de haute résolution spatiale et spectrale, les approches supervisées ont leurs limites :

- Applicables pour l'identification d'un nombre limité d'espèces (risque de similarité spectrale entre espèces différentes)
- Moindres performances si les conditions d'acquisition varient (acquisition à l'échelle régionale, étude de sites distants...).

Contexte tropical :

- jusqu'à plusieurs centaines d'espèces par hectare
- Forêts très étendues, accessibilité limitée (données apprentissage)
→ Opérabilité des approches supervisées limitée

I. Objectif des travaux présentés

- Proposer une méthode non supervisée pour la cartographie de la biodiversité des forêts tropicales par imagerie hyperspectrale aéroportée

Projet HyperTropik : préparation du volet végétation de la mission HYPXIM

- Interprétation physique de l'information utilisée pour cartographier la biodiversité (séparation chimie foliaire / structure / conditions d'observation)
- Détermination des conditions limites pour l'estimation de la biodiversité
- Précision et consolidation des besoins de la mission hyperspectrale HYPXIM

→ Utilisation de la modélisation du transfert radiatif 3D



Déroulement de la présentation

I. Introduction

II. Aperçu du potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie de la biodiversité

III. La modélisation du transfert radiatif pour une interprétation physique des résultats expérimentaux

IV. Conclusion et perspectives

II. Mise au point d'une méthode de cartographie de la biodiversité

Matériel :

- Campagne aéroportée (imagerie hyperspectrale + LiDAR) sur des sites de l'Amazonie Péruvienne.
- Parcelles de validation : plus de 100 parcelles (0.14 ha) inventoriées (DBH>10cm) dans différents types de forêts, des plaines aux zones montagneuses.

Méthodes :

- Basée sur l'hypothèse de variation spectrale (Palmer et al., 2002)
- Segmentation de l'espace spectral du paysage (clustering) pour définir un ensemble d'« **espèces spectrales** » communes à l'ensemble du paysage

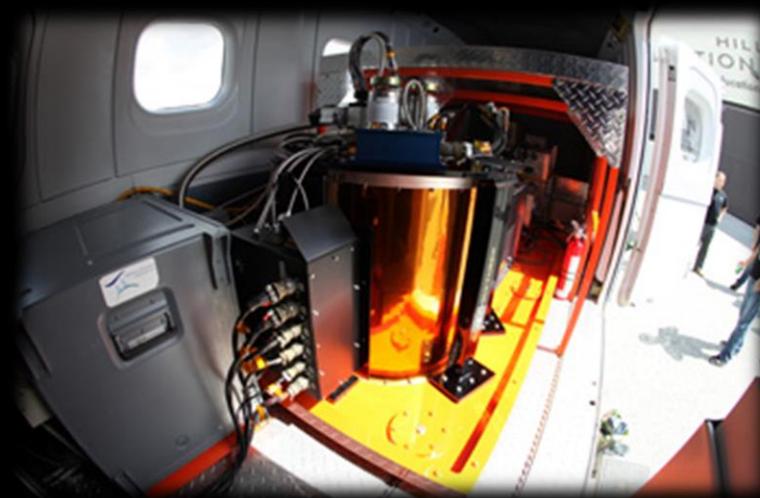
Produits cartographiques :

→ **Diversité α** : indice de Shannon

→ **Diversité β** : dissimilarité de Bray-Curtis



AToMS
(Airborne Taxonomic Mapping System)

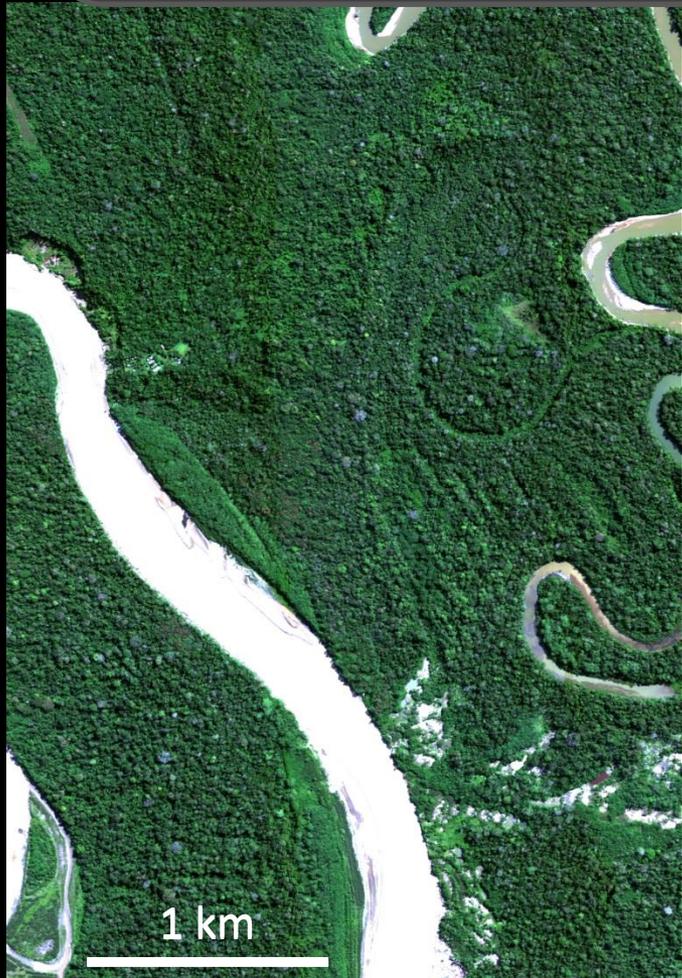


Carbon mapping
Canopy chemistry
Species identification
Canopy structure

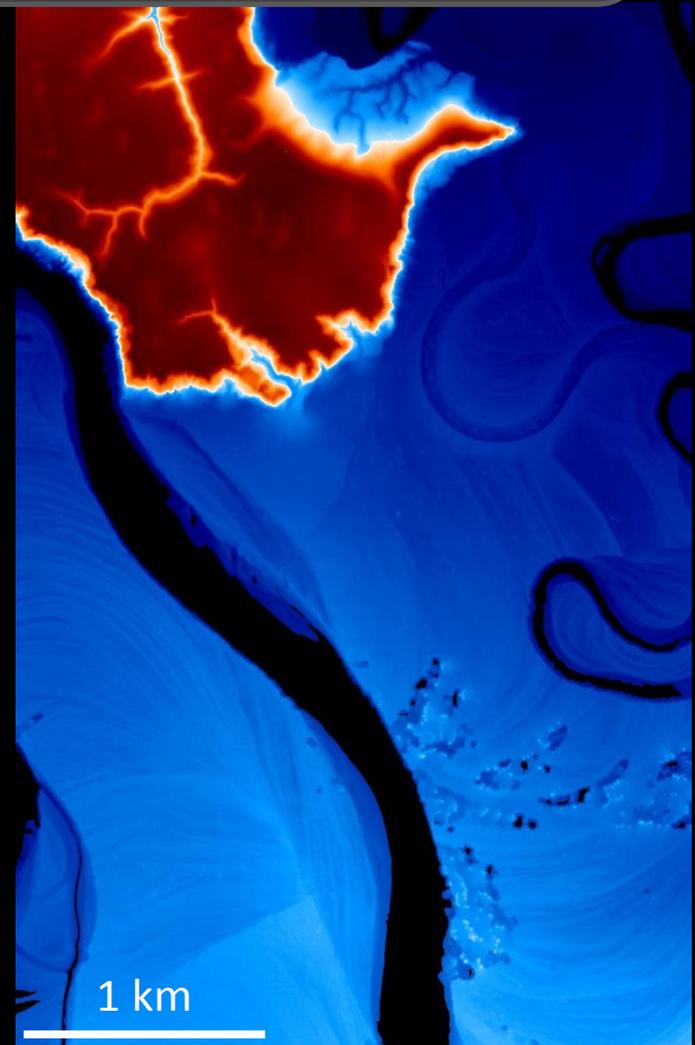
...



II. Mise au point d'une méthode de cartographie de la biodiversité



Spectroscopic imagery
1 pixel = 2 m
214 spectral bands VSWIR

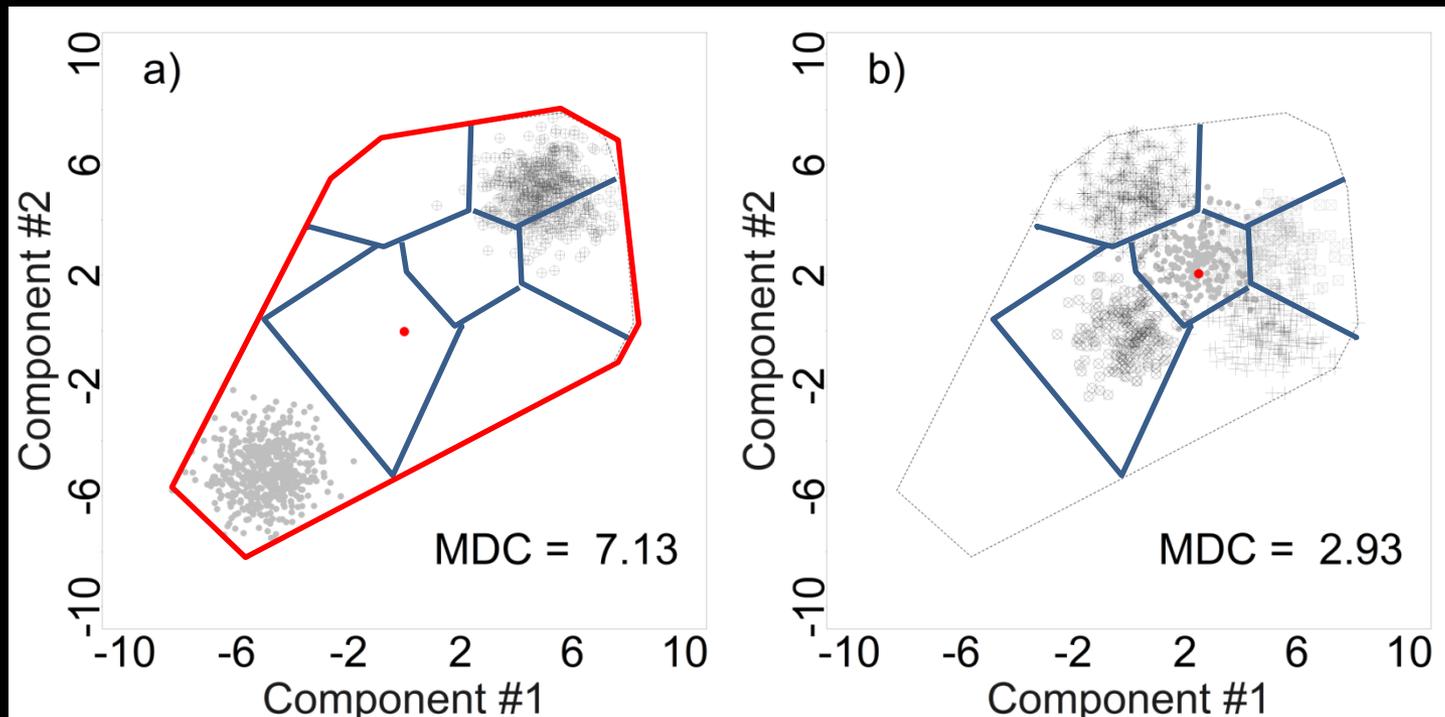


DEM derived from LiDAR
Red: terraces, blue: floodplains

II. Mise au point d'une méthode de cartographie de la biodiversité

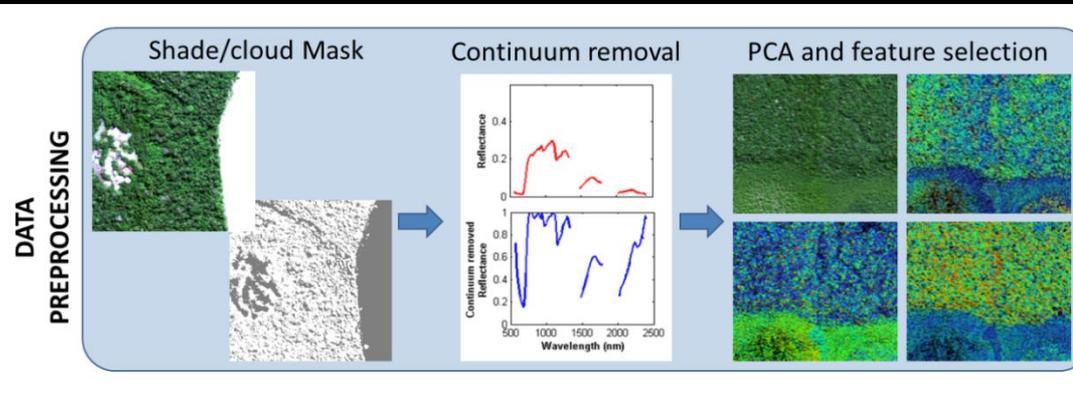
Hypothèse de variation spectrale : quelle métrique utiliser ?

- Variabilité du NDVI
- Distance moyenne au centroïde
- Prise en compte de la distribution dans l'espace spectral

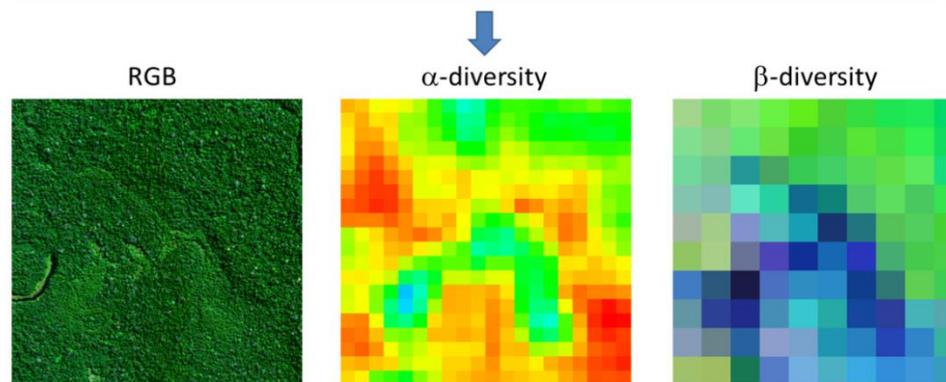
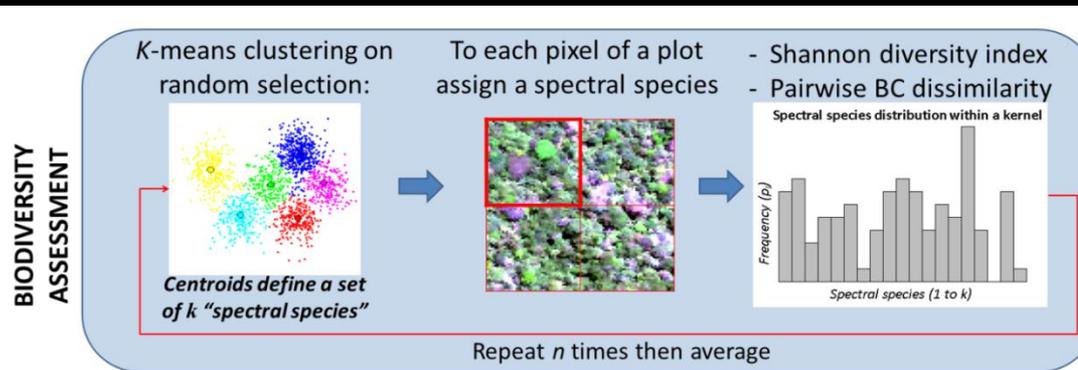


II. Mise au point d'une méthode de cartographie de la biodiversité : Spectral Species Distribution (SSD)

PRE-TRAITEMENT



ESTIMATION D'INDICATEURS DE BIODIVERSITE

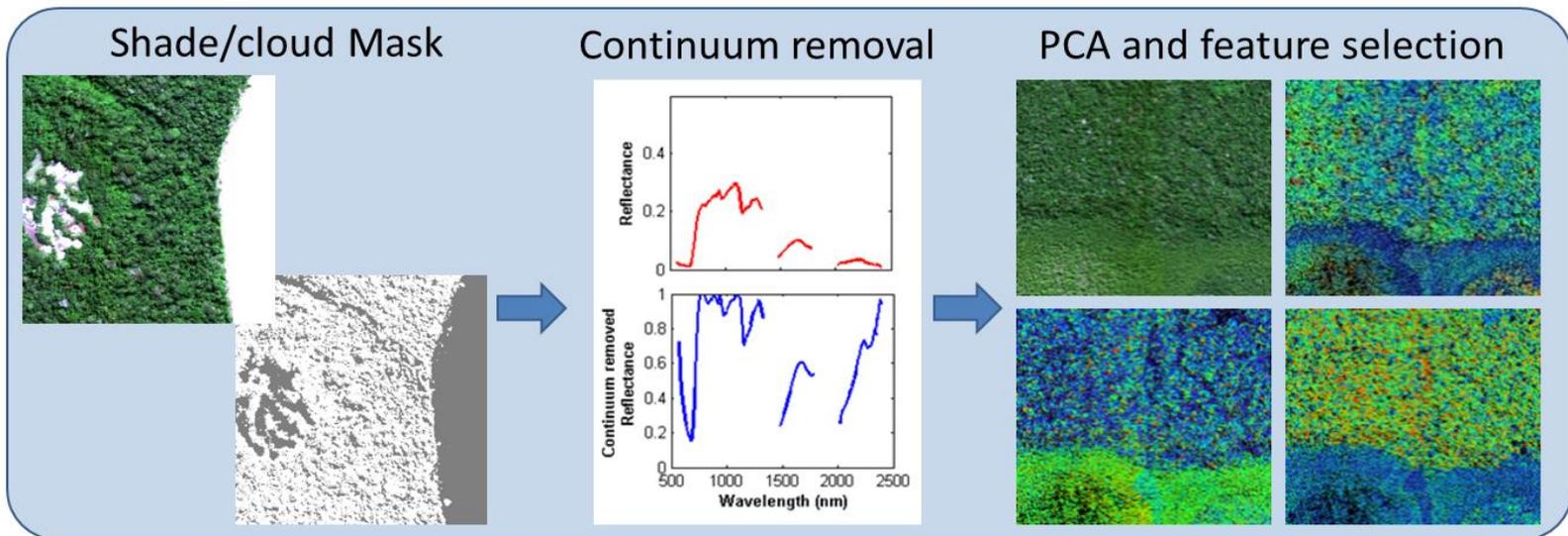


Féret & Asner,
2014 (Ecological
Applications)

Etape 1 – pré-traitement

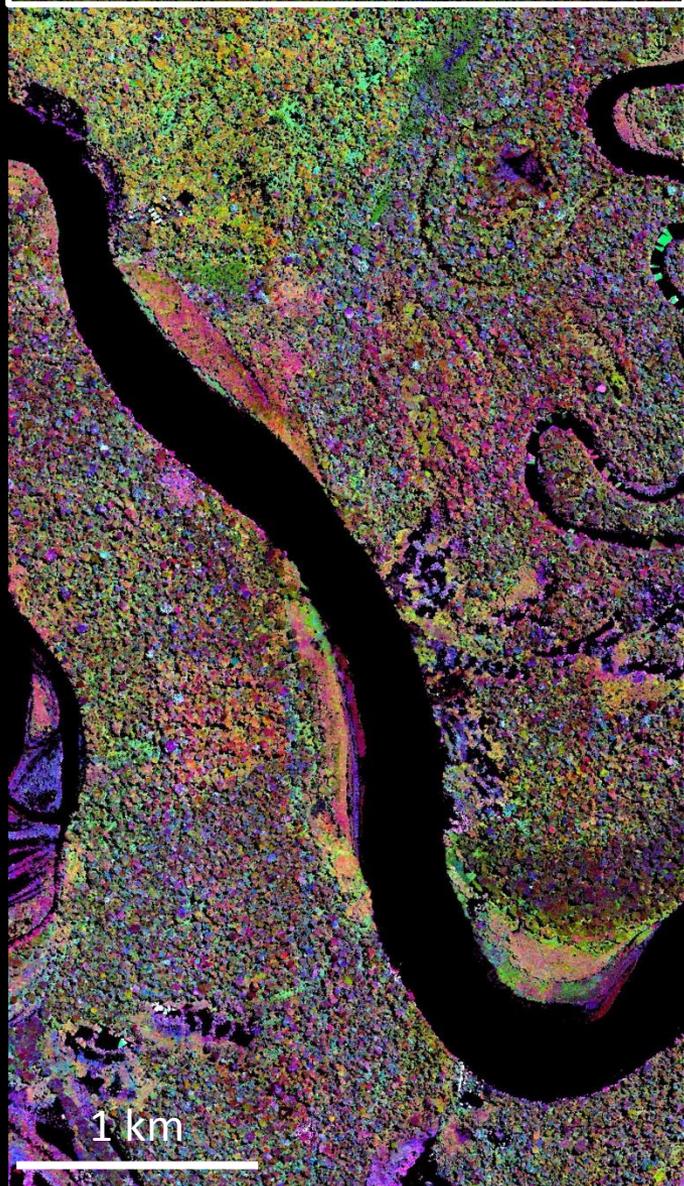
- La diversité en espèces contribue à l'hétérogénéité spectrale pour une résolution spatiale suffisamment fine (taille pixels < taille arbres individuels).
- Les détails augmentent l'hétérogénéité spectrale sans liens avec la biodiversité (effets d'éclaircement, géométrie de la surface de la canopée)

DATA
PREPROCESSING

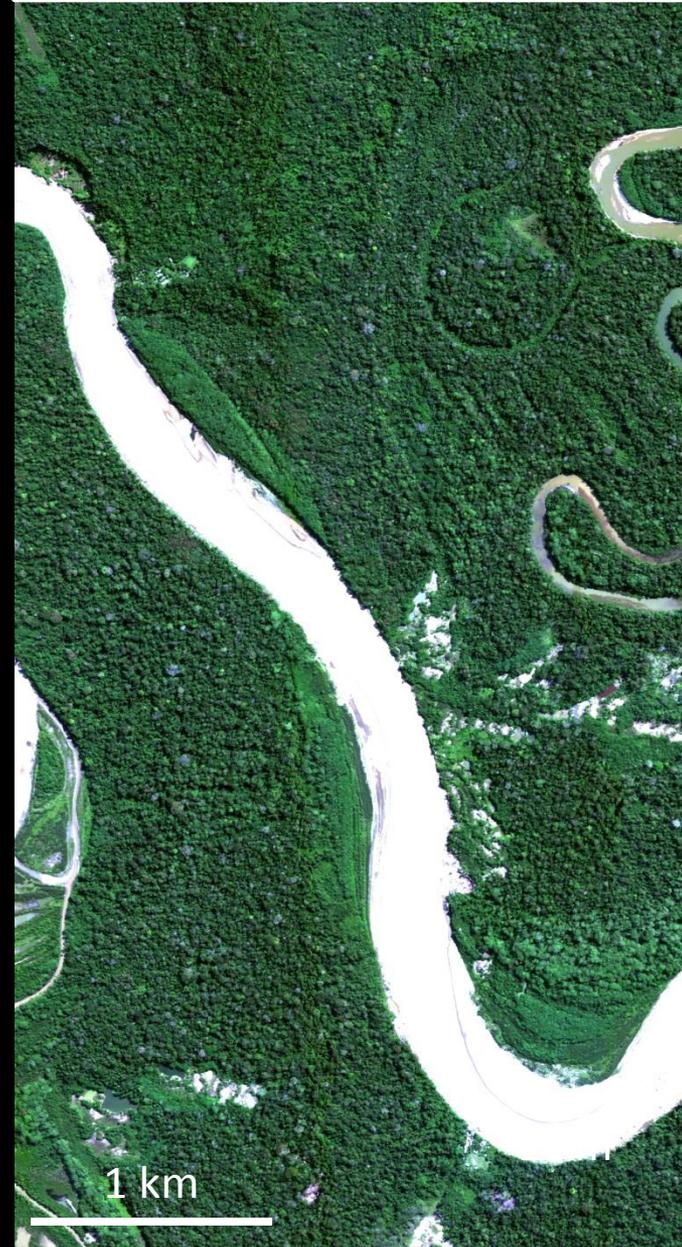


1 km² = 102 Mb
1 landscape = 100 to 500 km²
= 10 to 50 Gb

Colored composition
3 components of PCA



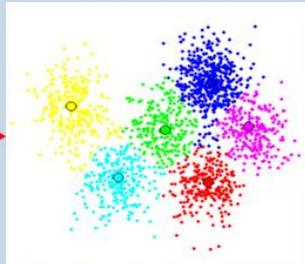
AToMS (1 pixel = 2 m)



Etape 2 – estimation des indicateurs de biodiversité

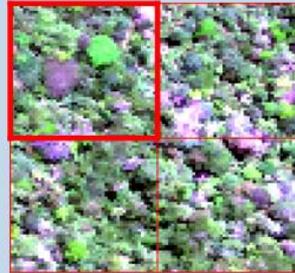
BIODIVERSITY ASSESSMENT

K-means clustering on random selection:

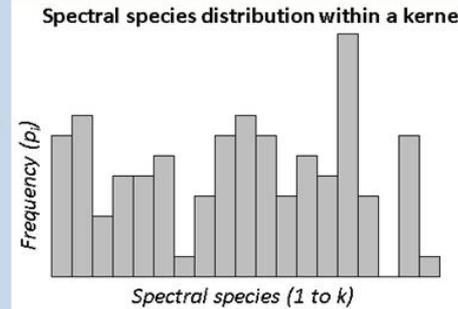


Centroids define a set of k "spectral species"

To each pixel of a plot assign a spectral species



- Shannon diversity index
- Pairwise BC dissimilarity

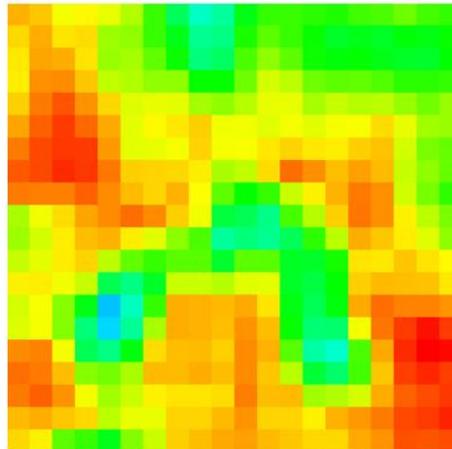


Repeat n times then average

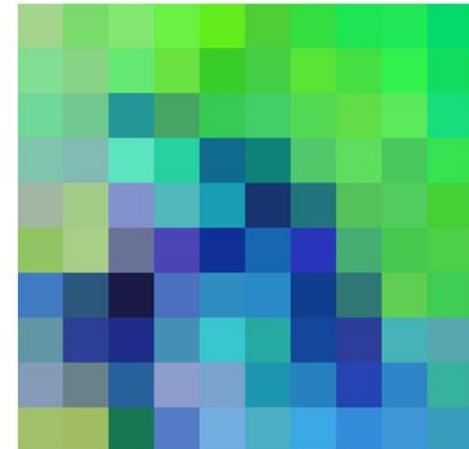
RGB



α -diversity

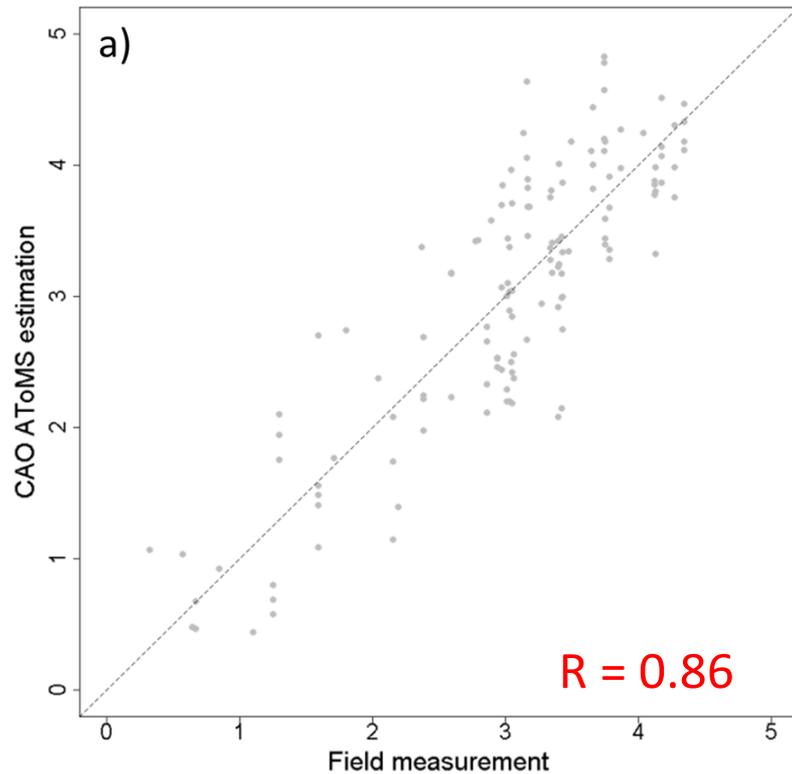


β -diversity

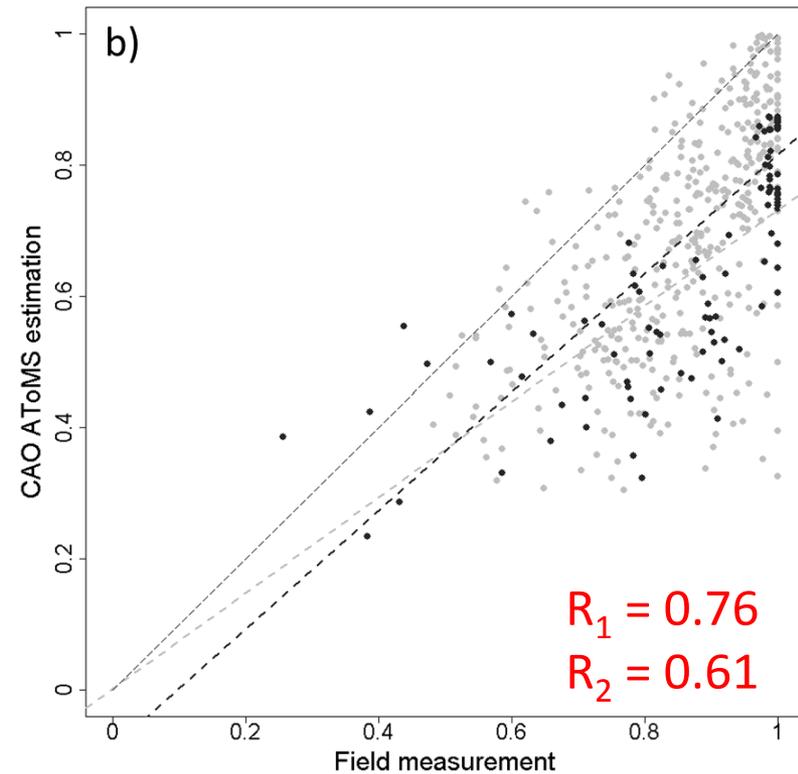


Validation de l'estimation de la biodiversité

Diversité α (Shannon index)
153 plots

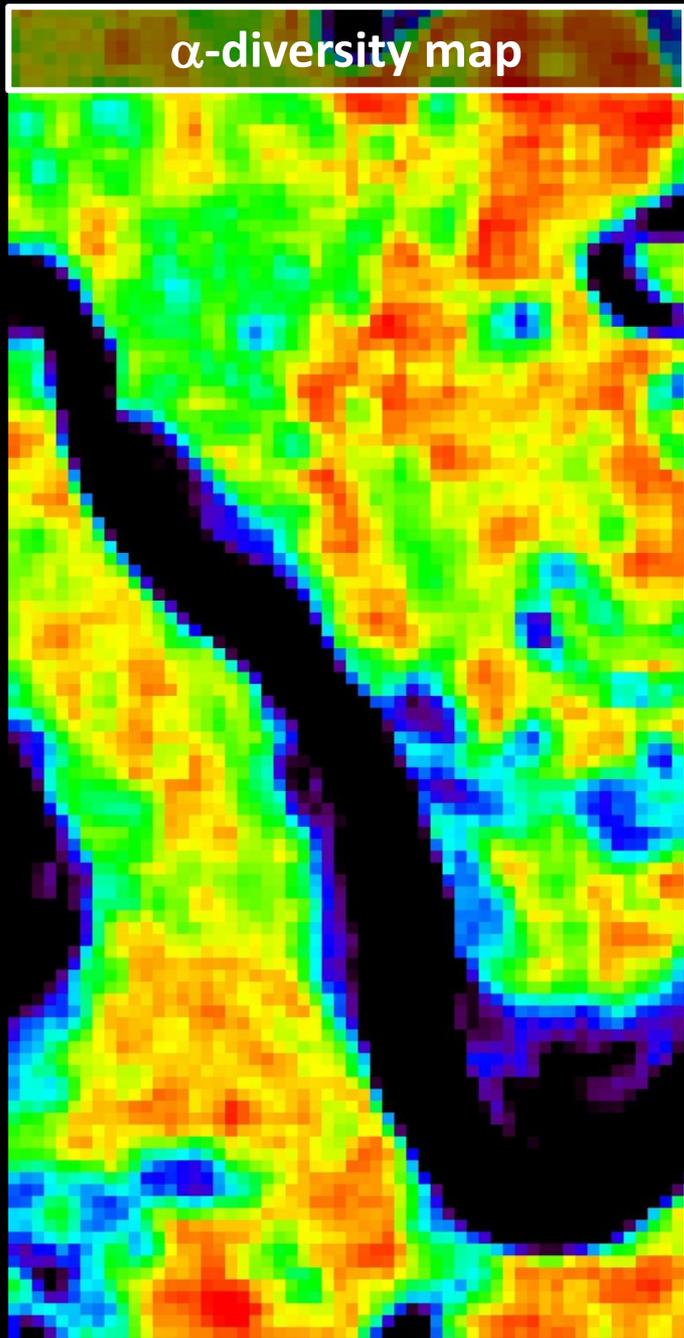


Diversité β (Bray-Curtis dissimilarity)
91 + 496 pairs of plots (2 sites)



→ Outperforms other existing methods

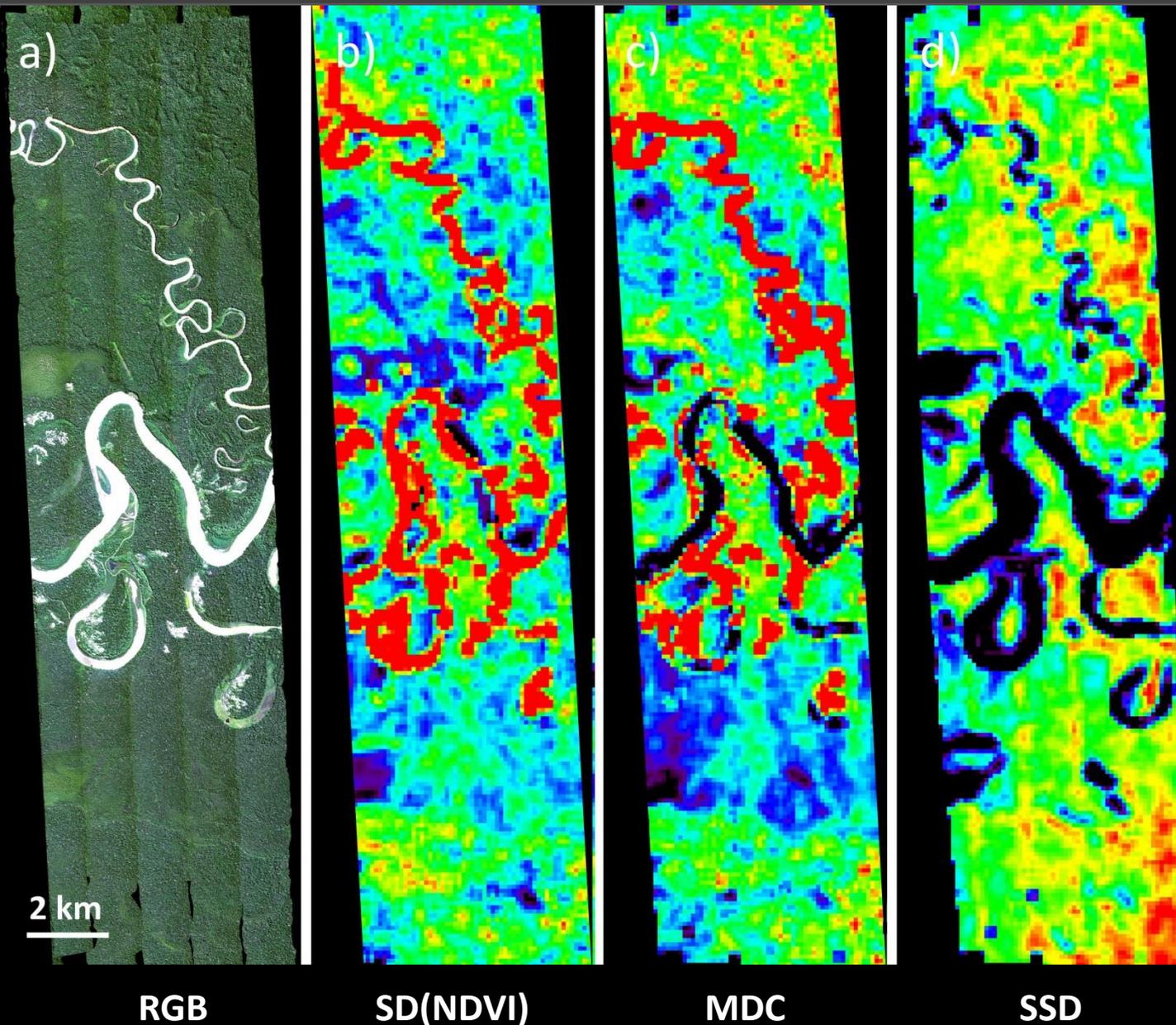
α -diversity map



AToMS (1 pixel = 2 m)



Validation de l'estimation de la biodiversité

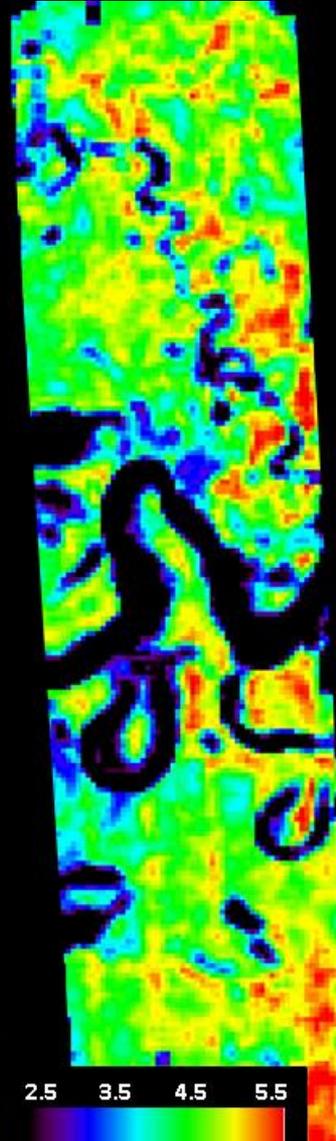


Application de la méthode au site de CICRA

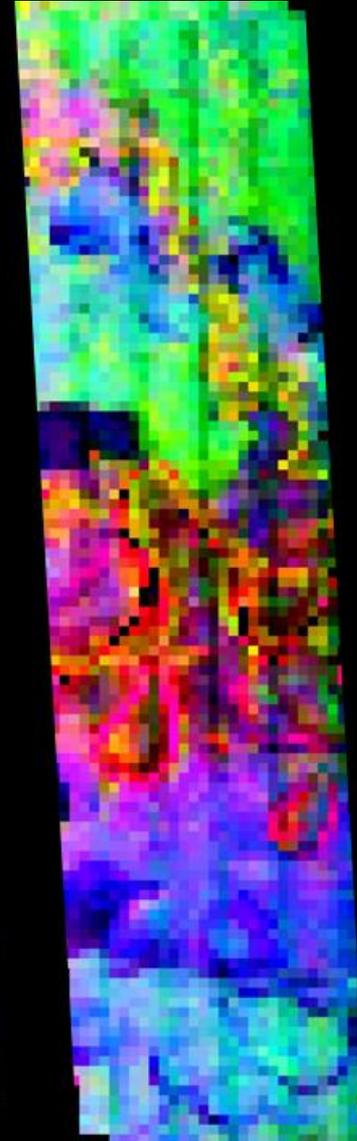
RGB



α -diversity



β -diversity

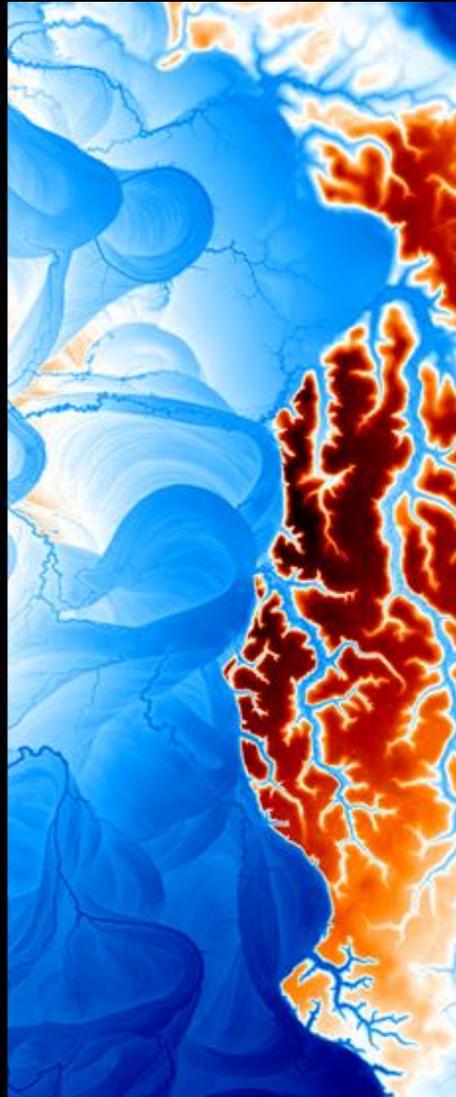


Application de la méthode au site de Chunchu

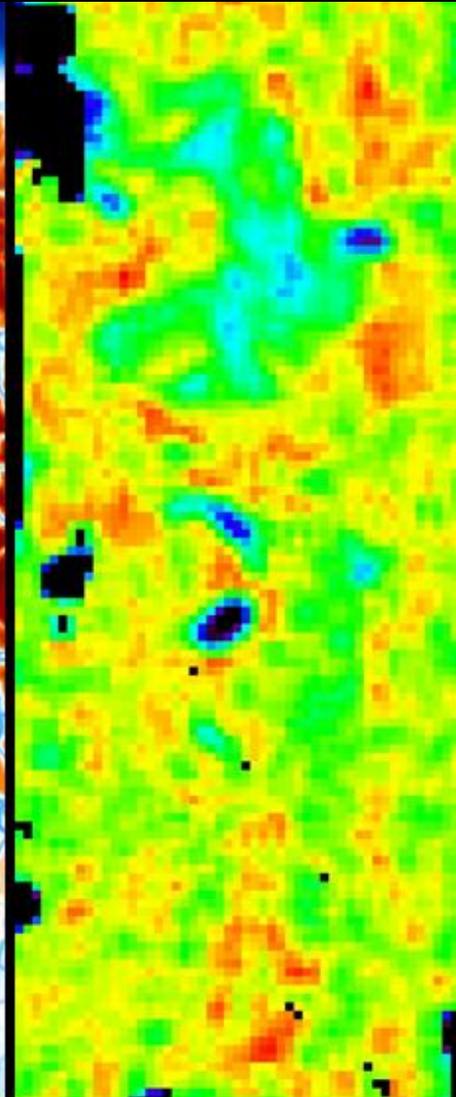
RGB



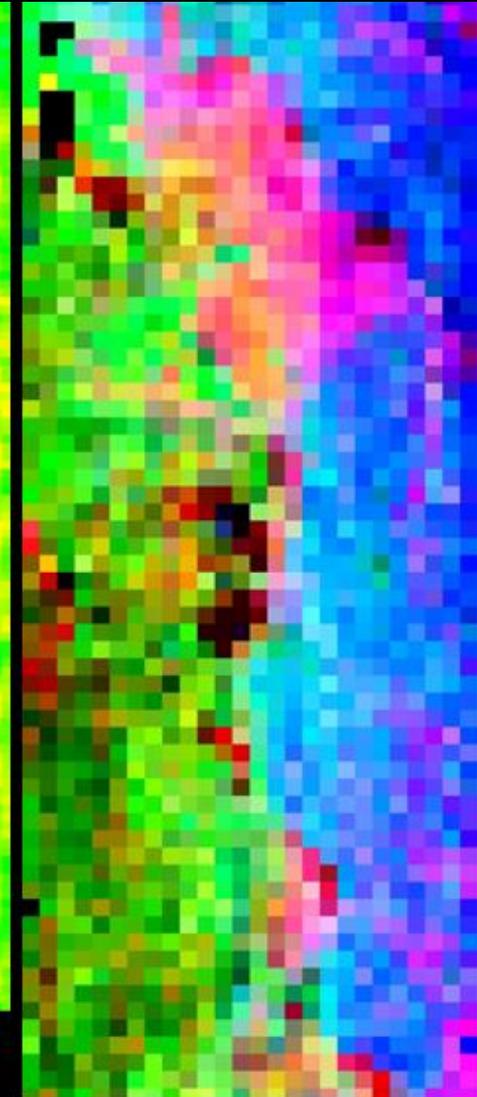
DEM



α -diversity



β -diversity



Conclusions sur la méthode présentée

- La validation sur les données expérimentales fournit des résultats très supérieurs aux autres méthodes testées

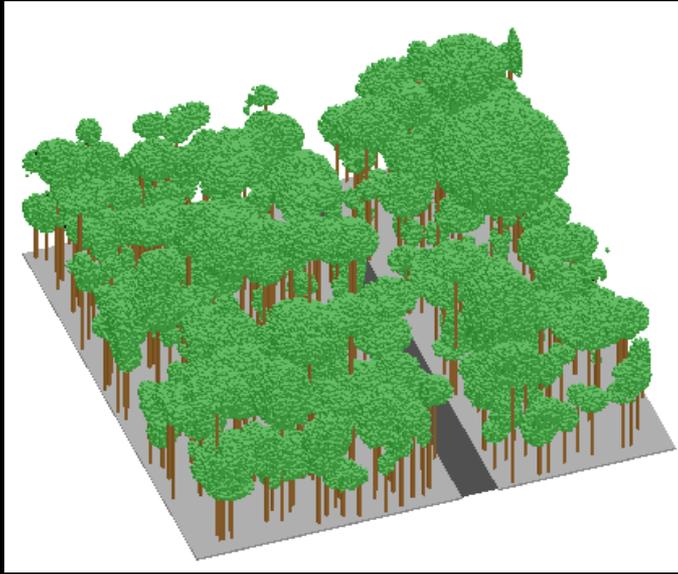
MAIS :

- La faible disponibilité des données expérimentales et des parcelles de validation empêche d'étudier le domaine de validité de la méthode de manière plus complète
- La préparation de missions spatiales comme ***HYPXIM***, dont un objectif est l'étude de la biodiversité tropicale, nécessite de :
 - i) mieux définir les facteurs liant biodiversité et rayonnement pour améliorer le pré-traitement : ***interprétation physique***
 - ii) réaliser des études de sensibilité intensives pour préparer aux contraintes liées à l'application sur des acquisitions spatiales

Déroulement de la présentation

- I. Introduction
- II. Aperçu du potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie de la biodiversité
- III. La modélisation du transfert radiatif pour une interprétation physique des résultats expérimentaux**
- IV. Conclusion et perspectives

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale



Maquette

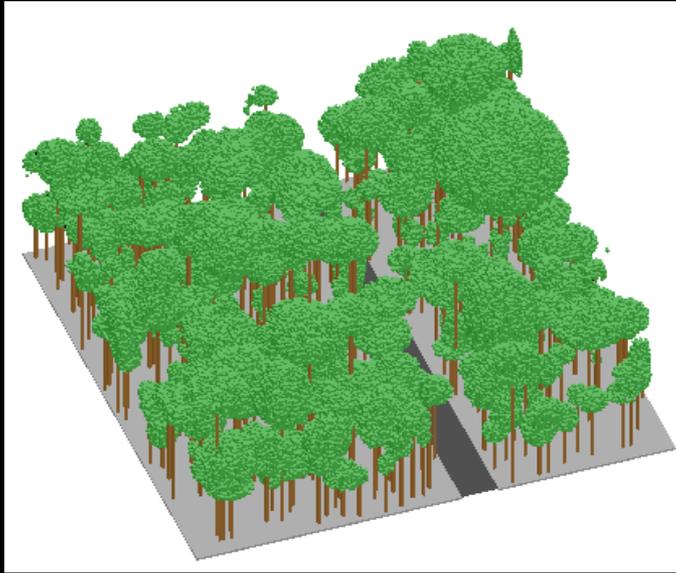


Simulation

Apport de la modélisation 3D pour l'étude de la biodiversité tropicale

- Mieux comprendre la mesure issue des interactions végétation / rayonnement
- Améliorer les méthodes d'analyse
- Tester les conditions limites des méthodes d'analyse
- Tester la robustesse aux conditions expérimentales (direction du soleil, relief, atmosphère, biodiversité)
- Tester la robustesse aux conditions instrumentales (résolution spatiale, spectrale, direction de visée)

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale



Maquette



Simulation

Développement du modèle DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer)

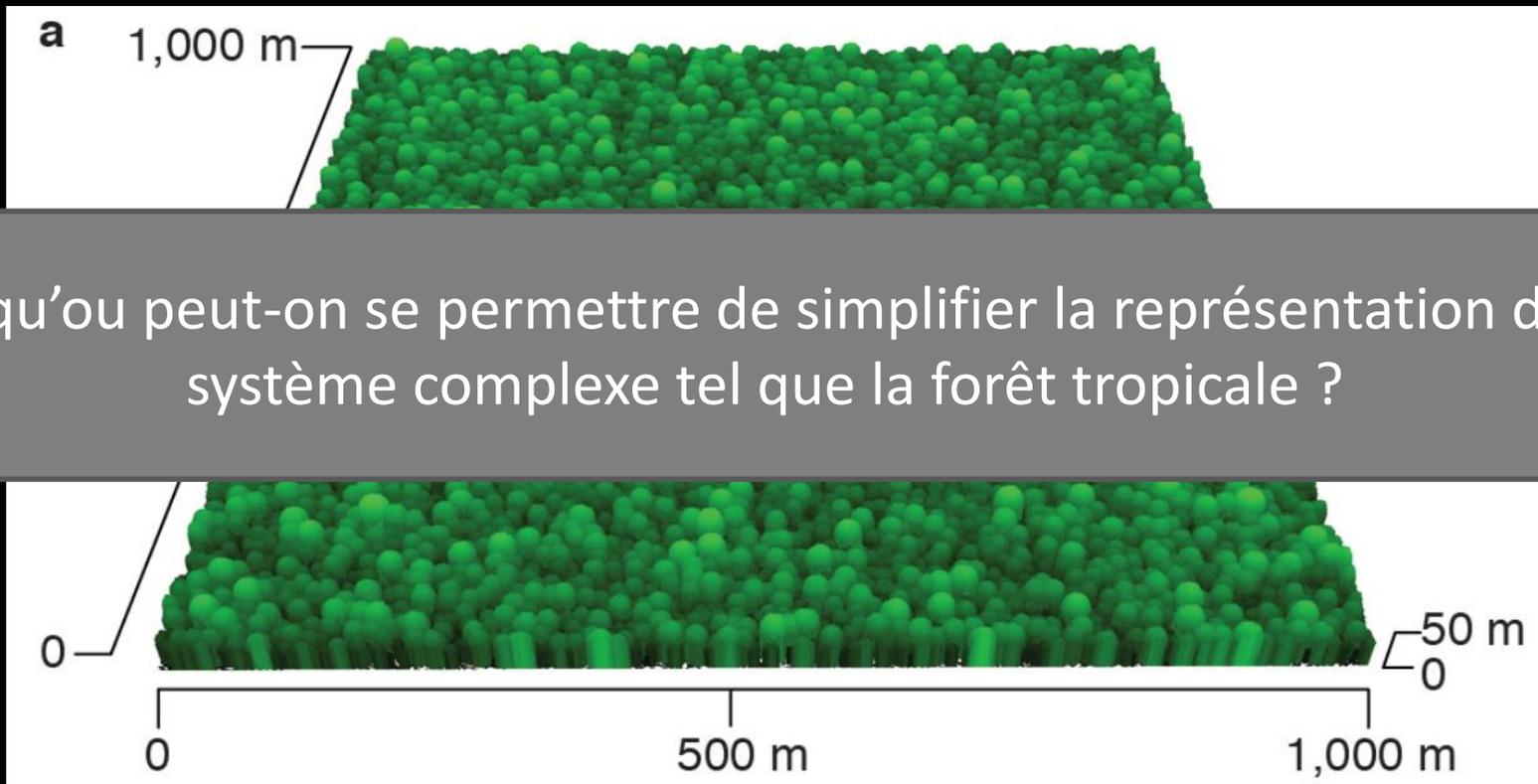
Un effort important est actuellement réalisé afin de répondre aux besoins de la communauté hyperspectrale (végétation, urbain, eau) :

- Amélioration de l'intégration des données d'entrée lors de la construction de la maquette
- Optimisation du code et parallélisation
- Amélioration des formats de sortie pour intégration dans chaîne de traitement
- Amélioration de l'interface utilisateur

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Approche 1 : modélisation simplifiée de la forêt tropicale pour améliorer l'interprétation des données de télédétection (Morton et al., 2014) et différencier les différentes composantes du signal mesuré.

→ Utilise le modèle 3D FLiGHT pour montrer que ce qui avait été interprété comme un verdissement de la forêt tropicale en saison sèche correspond peut-être à un artefact dû aux conditions géométriques d'acquisition.



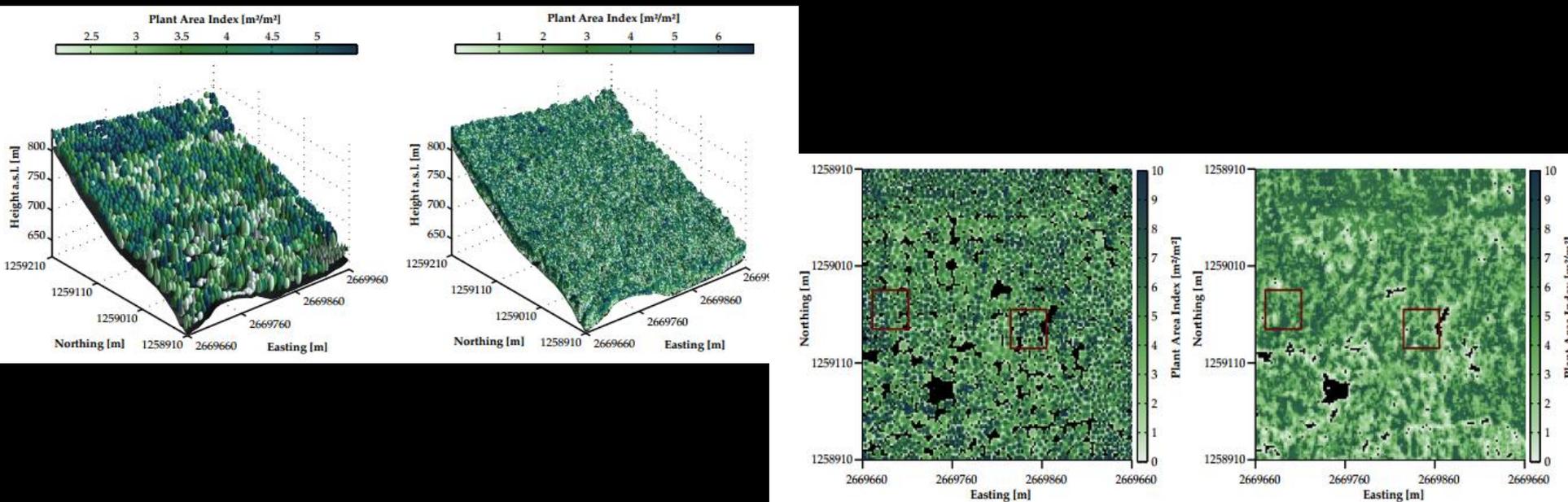
Jusqu'ou peut-on se permettre de simplifier la représentation d'un système complexe tel que la forêt tropicale ?

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Approche 2 : simulation extrêmement précise d'une surface boisée (Schneider et al. 2014):

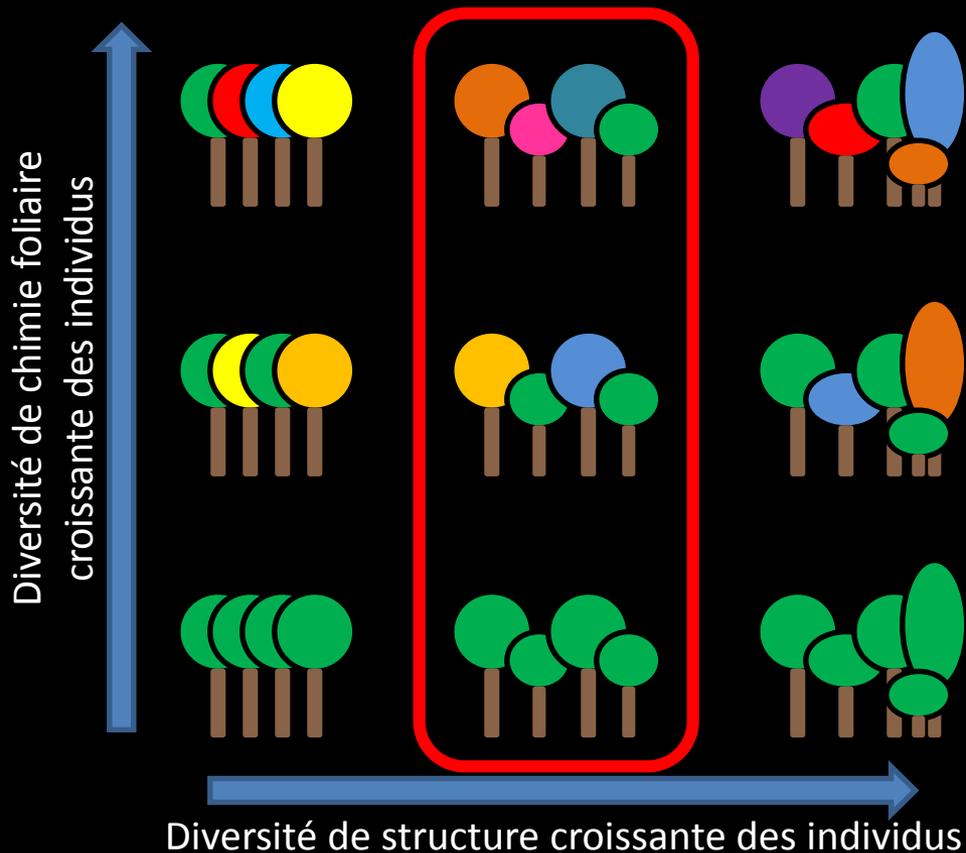
- LiDAR aéroporté et terrestre: distribution foliaire, topographie ...
- Mesures hyperspectrales terrain : feuilles, écorce, sol, litière
- Comparaison de modes de représentation de la végétation : ellipsoïdes, triangles
- Plusieurs niveaux de détails étudiés : variation verticale des propriétés optiques , représentation des éléments végétaux non photosynthétiques

→ Modélisation avec DART et validation par imagerie hyperspectrale aéroportée et LiDAR.



III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Déroulement d'une étude de sensibilité pour étudier la contribution des variables biophysiques de la canopée (chimie et densité volumique foliaire, structure individuelle) :



Dans un premier temps, la variabilité intra-individu n'est pas prise en compte

Application des méthodes existantes:

- Segmentation
- Classification
- Régressions statistiques
- Inversion

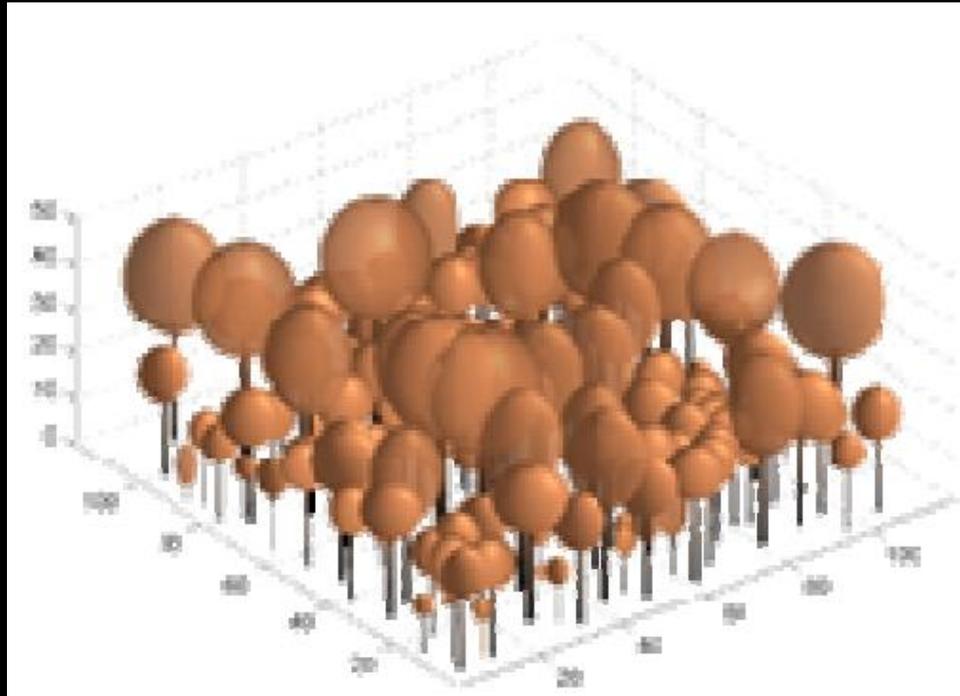
Dans un second temps

- introduction de la variabilité intra-individu
- Ajout de nouveaux gradients de diversité (topo, géométrie d'acquisition, ...)
- prise en compte du maximum des données terrain disponibles

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Maquette utilisée pour l'étude de sensibilité proposée :

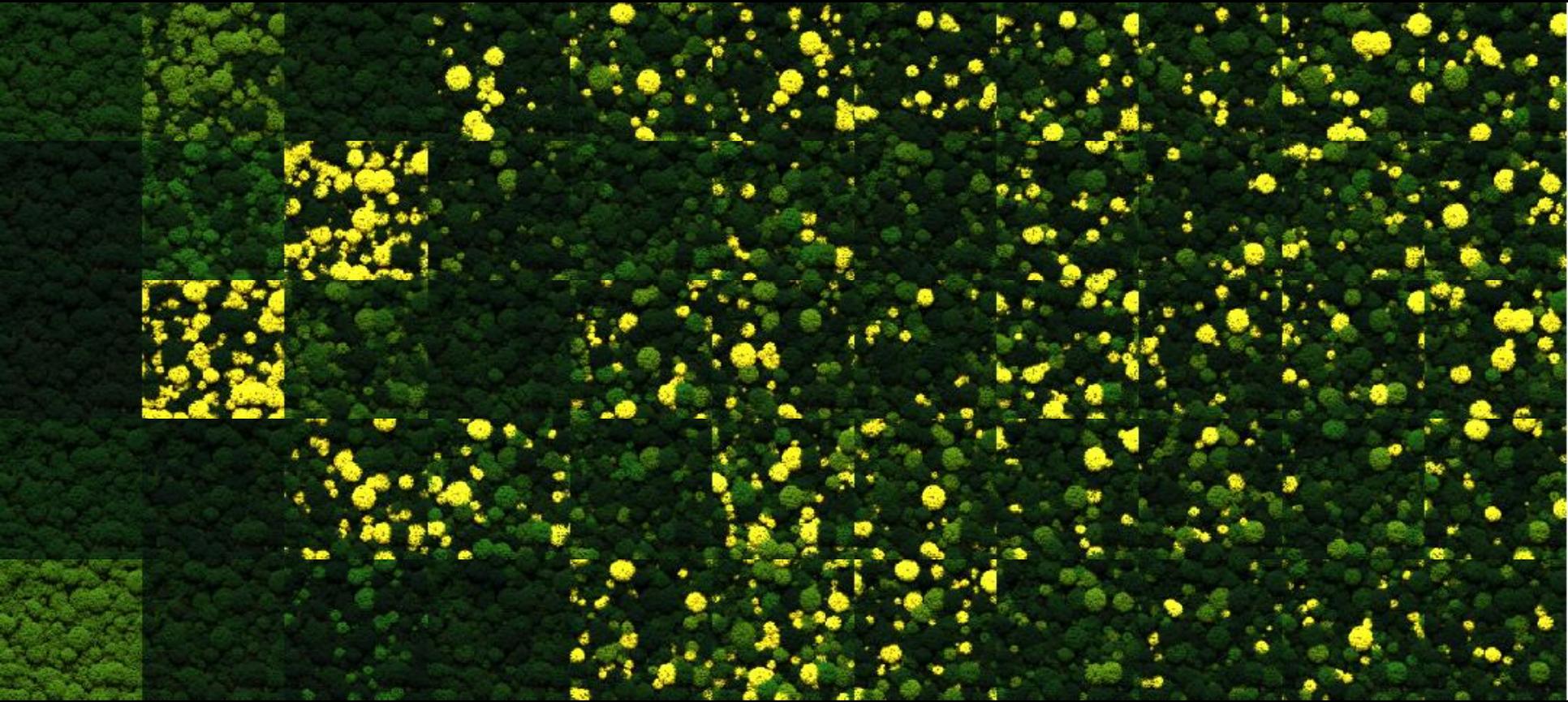
- Distribution spatiale et structure des arbres commune à toutes les simulations
- Chaque espèce est définie à partir de ses propriétés optiques foliaires
- Propriétés optiques foliaires simulées avec PROSPECT-5 en respectant des propriétés biochimiques issues de données expérimentales
- Biodiversité : 1 à 20 espèces par simulation, aléatoirement réparties



III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure Bottom Of Atmosphere

130 m



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

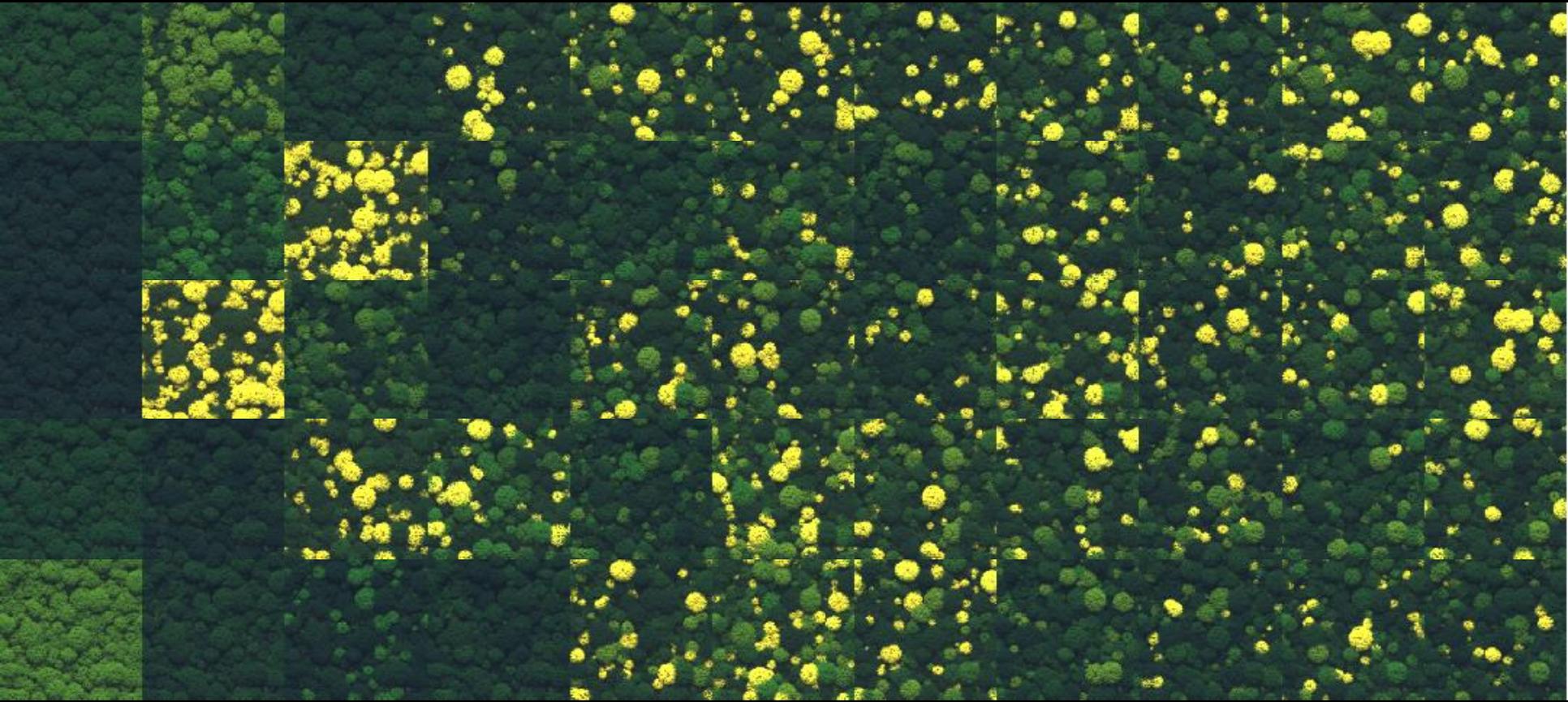
18 sp.

20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure depuis un capteur aéroporté (3000 m)

130 m



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

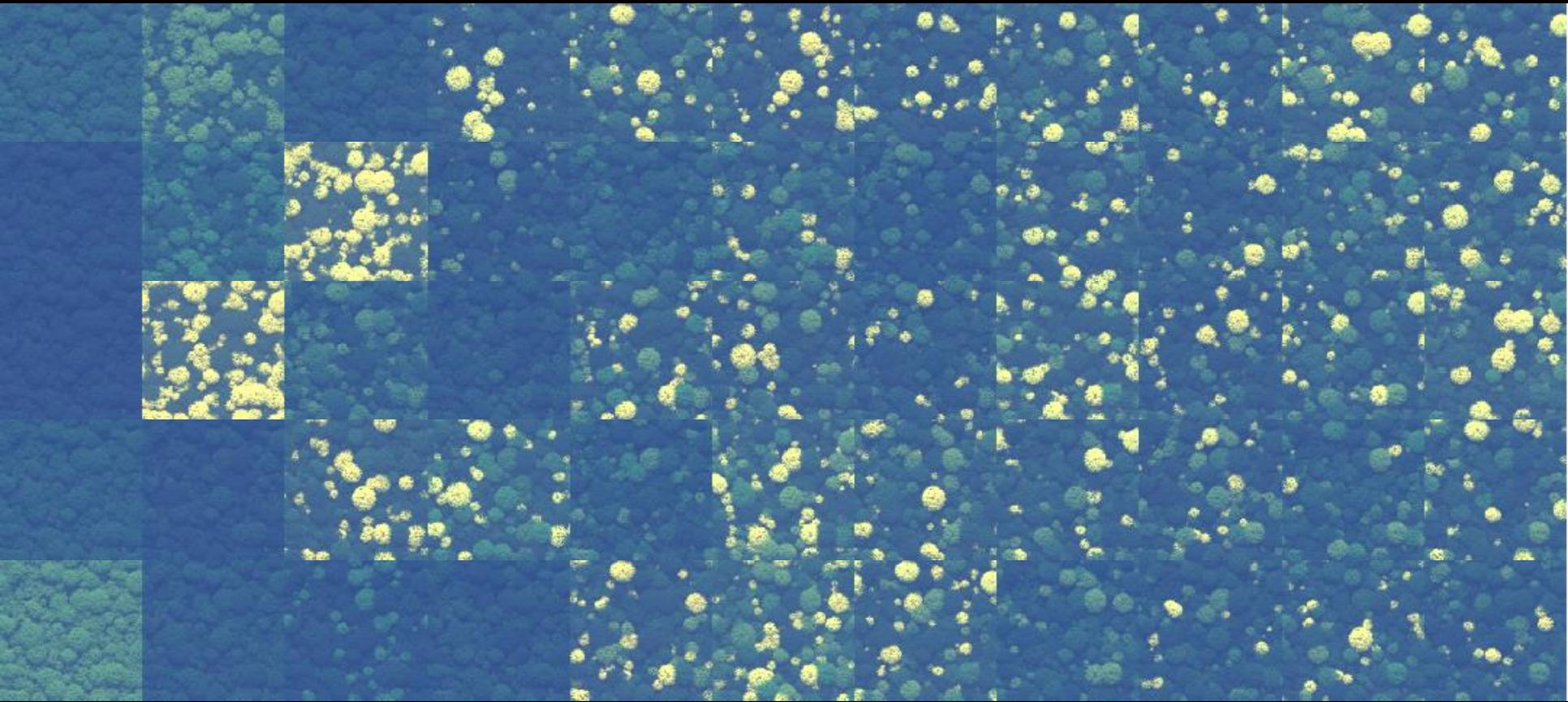
18 sp.

20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure Top Of Atmosphere

130 m



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

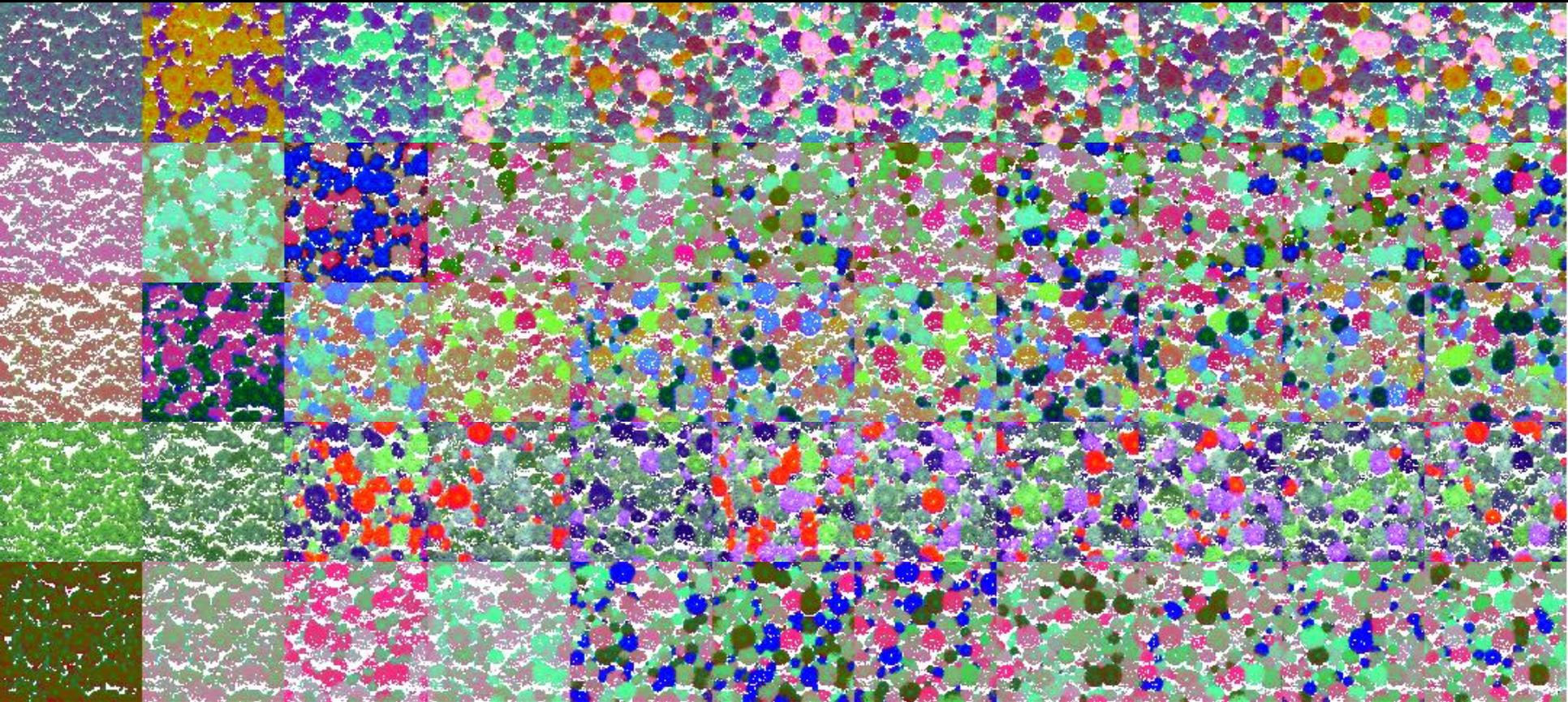
18 sp.

20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure Bottom Of Atmosphere
Composition colorée PCs #1, #2, #3

130 m



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

18 sp.

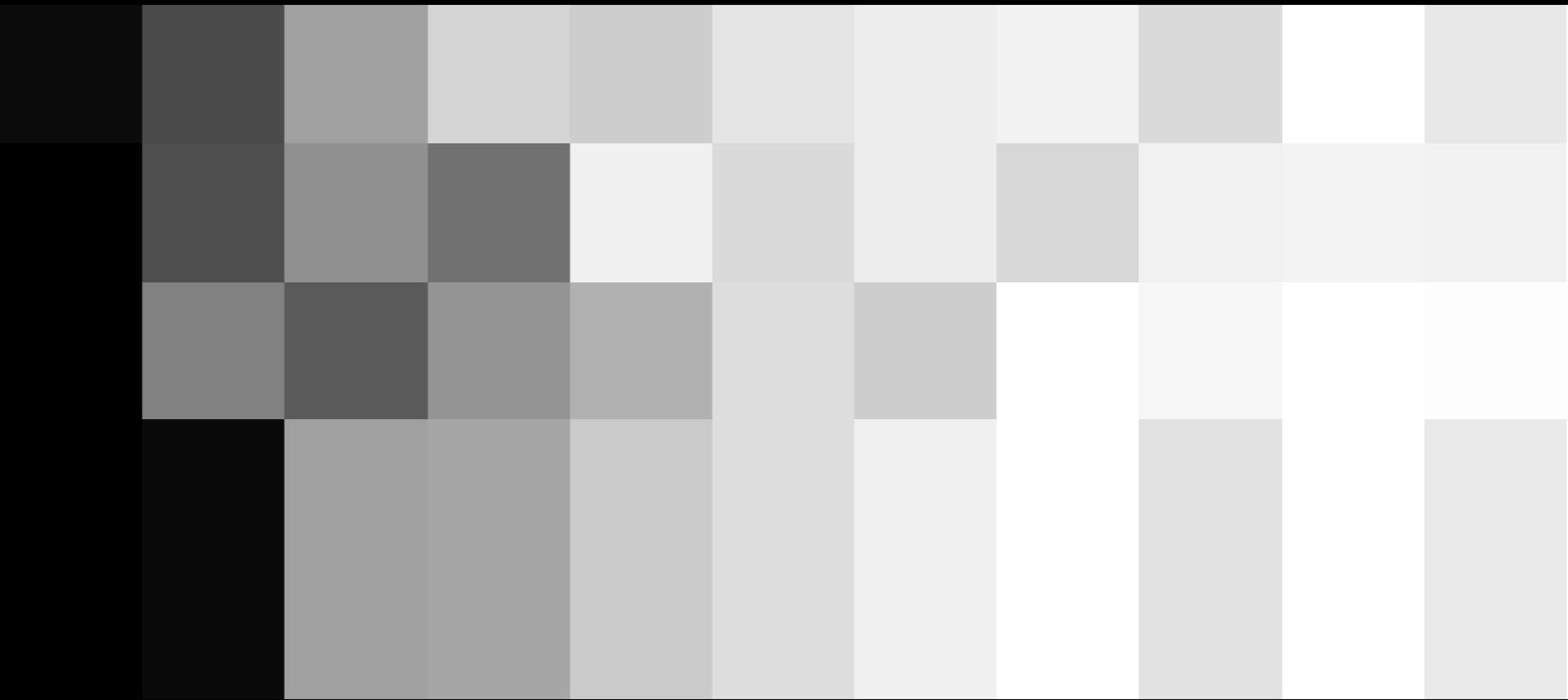
20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure Bottom Of Atmosphere

Indice de Shannon correspondant

130 m



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

18 sp.

20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure depuis un capteur aéroporté (3000 m)

130 m

Indice de Shannon correspondant



1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

18 sp.

20 sp.

III. Modélisation 3D de la biodiversité tropicale

Mesure Top Of Atmosphere

130 m

Indice de Shannon correspondant

Ceci est un résultat préliminaire :

- Combiner la richesse en espèces et leur abondance respective avant de comparer à l'indice de Shannon.
- Propriétés optiques foliaires plus réalistes à choisir.
- Analyse de l'information contenue dans les différentes composantes de l'ACP
- ACP pas nécessairement la méthode la plus adaptée

1 sp.

2 sp.

4 sp.

6 sp.

8 sp.

10 sp.

12 sp.

14 sp.

16 sp.

18 sp.

20 sp.

Déroulement de la présentation

- I. Introduction
- II. Aperçu du potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la cartographie de la biodiversité
- III. La modélisation du transfert radiatif pour une interprétation physique des résultats expérimentaux
- IV. Conclusion et perspectives

IV. Conclusions et perspectives

- Une nouvelle méthode est proposée pour la cartographie de la biodiversité tropicale à partir d'imagerie hyperspectrale haute résolution
- Une validation a été effectuée avec des données expérimentales aéroportées
- L'interprétation physique de l'information mesurée est actuellement en cours grâce au modèle 3D DART
- Les premiers résultats d'une étude de sensibilité partielle sont en accord avec les résultats obtenus avec des données expérimentales (CAO AToMS).

IV. Conclusions et perspectives

HYPERTROPIK : Préparation de la mission HYPXIM et développement DART

Prochaines étapes :

- Précision et consolidation des besoins de la mission hyperspectrale HYPXIM en termes de résolution spatiale, spectrale et radiométrique pour l'étude de la biodiversité des espèces en milieu tropical
- Intégration de nouveaux facteurs dans l'étude de sensibilité :
 - Variabilité structurale
 - Topographie
 - Variabilité de propriétés optiques foliaires intra-individu
 - Géométrie d'éclairement et d'observation

IV. Conclusions et perspectives

HYPERTROPIK : Préparation de la mission HYPXIM et développement DART

Prochaines étapes :

- Collecte de données terrain sur différents types de forêts tropicales (Forêts denses, mangroves, plantations) et mise au point de maquettes extrêmement détaillées (Schneider et al., 2014) pour déterminer le niveau de détail nécessaire à la mise au point de maquettes de forêts tropicales réalistes
- Application de méthodes et détermination de leur domaine de validité
 - Segmentation automatique des couronnes d'arbres
 - estimation de chimie foliaire et structure de canopée (régression)
 - Identification d'espèces (classification)
 - Cartographie de la biodiversité
 - Investigation de processus écologiques plus complexes

Remerciements

Centre d'Etudes spatiales de la BIOSphere

Equipe de développement DART : Nicolas Lauret, Tristan Grégoire, Thomas Cajgfinger, Jordan Guilleux

Centre National d'Etudes Spatiales

Merci pour le financement !

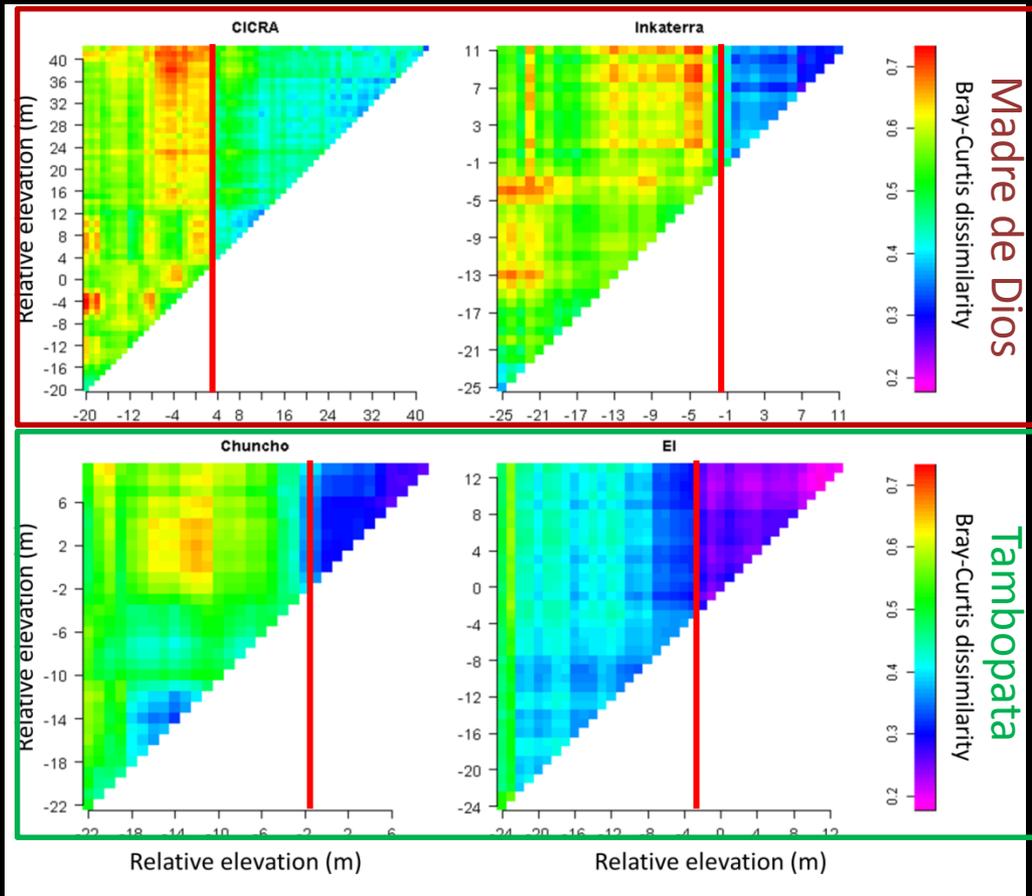
Carnegie Institution for Science

Field coordinators and workers : Felipe Sinca Cansino, Raul Tupayachi and their team

Carnegie Airborne Observatory's flight crew and scientific team : Chris Anderson, Claire Baldeck, Mark Higgins, Ty Kennedy Bowdoin, Dave Knapp, Katie Kryston, Robin Martin, Elif Tasar & the pilots

The Carnegie Airborne Observatory is made possible by the Avatar Alliance Foundation, Grantham Foundation for the Protection of the Environment, Gordon and Betty Moore Foundation, the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, W. M. Keck Foundation, the Margaret A. Cargill Foundation, Mary Anne Nyburg Baker and G. Leonard Baker Jr., and William R. Hearst III.

Comparison of β -diversity between elevation ranges



Comparison of river systems.

Higher overall variability of species composition within and between elevation classes for **MDD**

→ **MDD** is larger river system than **T**

→ More disturbances in **MDD**

Comparison of relative location on river.

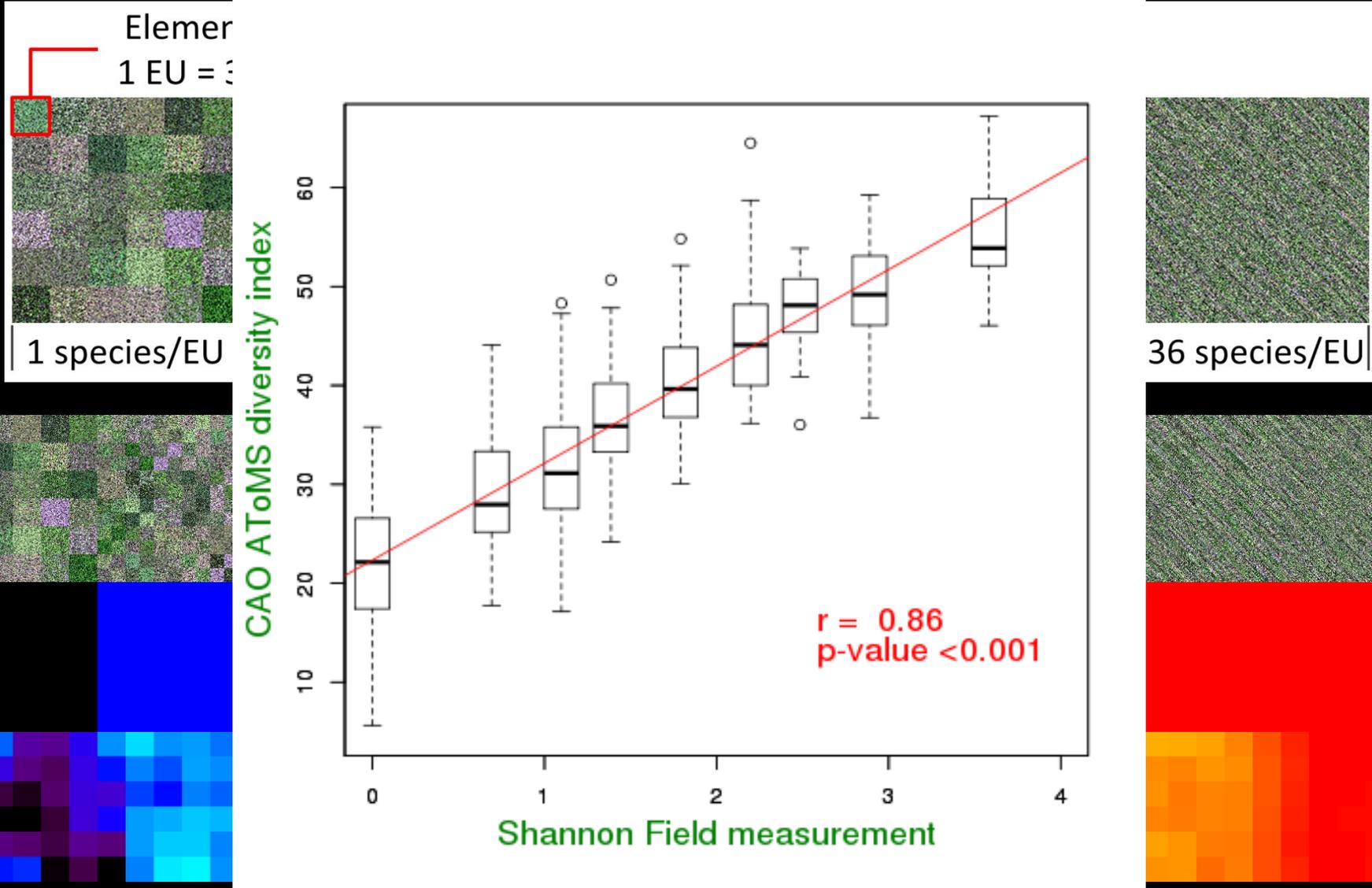
Lower variability of species composition in downstream sites compared to upstream sites

→ softer slopes and homogeneous soils favor similar species composition

Féret & Asner

(Ecological Applications, submitted)

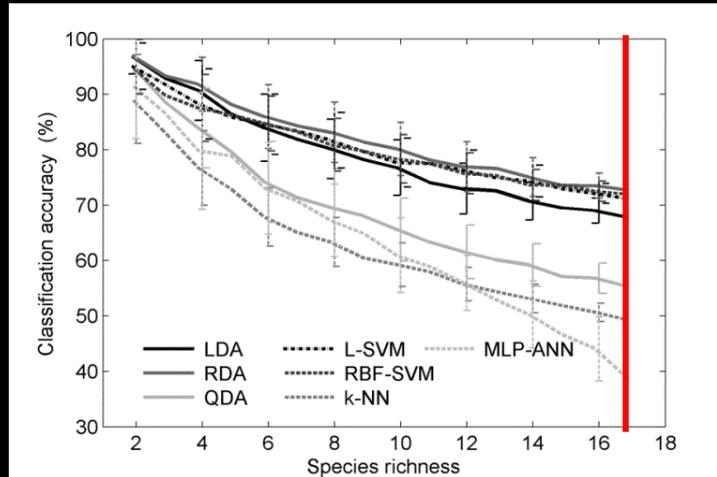
Modélisation du transfert radiatif 3D appliqué aux forêts tropicales



Biodiversité forestière tropicale par imagerie hyperspectrale (spectro-imageur Carnegie Airborne Observatory)

- Identification des espèces d'arbres émergentes

Nombre d'espèces à identifier



Composition colorée CAO

Résultats de la classification

■ <i>Aleurites moluccana</i>	■ <i>Cananga orodata</i>	■ <i>Cecropia peltata</i>	■ <i>Cocos nucifera</i>	■ <i>Eucalyptus robusta</i>	■ <i>Flindersia brayleyana</i>
■ <i>Mangifera indica L.</i>	■ <i>Melochia umbellata</i>	■ <i>Metrosideros polymorpha</i>	■ <i>Pandanus tectorius</i>	■ <i>Persea americana</i>	■ <i>Pithecellobium saman</i>
■ <i>Psidium cattleianum</i>	■ <i>Psidium guajava</i>	■ <i>Syzygium jambos</i>	■ <i>Trema orientalis</i>	■ <i>Zingiber zerumbet</i>	