



HAL
open science

From leaf to satellite, dynamics and functioning of tropical vegetation

Nicolas Barbier

► **To cite this version:**

Nicolas Barbier. From leaf to satellite, dynamics and functioning of tropical vegetation. Environmental Sciences. Université de Montpellier (UM), FRA, 2024. tel-04653724

HAL Id: tel-04653724

<https://hal.inrae.fr/tel-04653724v1>

Submitted on 19 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Thèse d'Habilitation à Diriger la Recherche

Nicolas Barbier

Jury :

Jérôme CHAVE (EDB/CNRS)
Philippe CIAIS (LSCE/CEA) (Rapporteur)
Sylvie DURRIEU (Tetis/INRAE)
Helene MULLER LANDAU (STRI) (Rapporteuse)
Imma OLIVEIRAS MENOR (AMAP/IRD)
Nicolas PICARD (GIP Ecofor)
Cédric VEGA (ENSG/IGN) (Rapporteur)

De la feuille au
satellite, dynamique et
fonctionnement des
végétations tropicales

Année académique
2023-2024



Biodiversité
Agriculture
Alimentation
Environnement
Terre
Eau



**UNIVERSITÉ DE
MONTPELLIER**

" JE DECLARE AVOIR RESPECTE, DANS LA CONCEPTION ET LA REDACTION DE CE MEMOIRE D'HDR, LES VALEURS ET PRINCIPES D'INTEGRITE SCIENTIFIQUE DESTINES A GARANTIR LE CARACTERE HONNETE ET SCIENTIFIQUEMENT RIGOREUX DE TOUT TRAVAIL DE RECHERCHE, VISES A L'ARTICLE L.211-2 DU CODE DE LA RECHERCHE ET ENONCES PAR LA CHARTE NATIONALE DE DEONTOLOGIE DES METIERS DE LA RECHERCHE ET LA CHARTE D'INTEGRITE SCIENTIFIQUE DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER. JE M'ENGAGE A LES PROMOUVOIR DANS LE CADRE DE MES ACTIVITES FUTURES D'ENCADREMENT DE RECHERCHE."

TABLE OF CONTENTS

Curriculum Vitae.....	5
1 Experience.....	5
1.1 Positions.....	5
1.2 Training.....	5
1.3 Projects.....	6
1.3.1 Participation to scientific projects	6
1.3.2 Consultancy missions and applied research projects	7
1.3.3 Responsibilities.....	8
2 Teaching - supervision.....	8
2.1 Exercises and seminars.....	8
2.2 Undergraduate and postgraduate thesis supervision.....	9
3 Publications and scientific activities.....	11
3.1 Papers in international peer-reviewed journals.....	13
3.2 Popularization.....	21
3.3 Theses.....	22
3.4 Patents and deposits	22
3.5 Active participation to international congresses and seminars.....	23
3.6 Participation to scientific societies.....	25
3.7 Referee missions for international journals and funding boards.....	25
3.8 Awards.....	26
Thesis in English.....	27
4 Previous research.....	27
4.1 General framework.....	27
4.2 Study of semi-arid systems.....	27
4.2.1 Mechanistic modeling	29
4.2.2 Remote sensing and spatial analysis.....	31
4.2.3 Crown/root allometry and plant interactions.....	40
4.2.4 Incursions into pyrophyllous savannas and the question of fires	43
4.3 Study of tropical forests	45
4.3.1 Adapting the spectral approach to dense forests.....	46

4.3.2	Extrapolation and sampling strategies.....	55
4.3.3	Understanding forests and trees to understand the signal.....	56
4.3.4	Drones: an indispensable intermediate scale	64
4.3.5	Summary	67
5	Research project.....	69
5.1	A transdisciplinary project focussing on forest functioning.....	69
5.2	The contribution of drones.....	70
5.3	Functioning and biodiversity	72
5.4	The switch to satellites	74
5.5	Tree and stand architecture	76
5.6	partnership and institutional integration.....	77
6	References.....	80
	These en français (sans figures)	92
7	Recherches antérieures.....	92
7.1	Cadre général.....	92
7.2	Etude des Systemes semi-arides	92
7.2.1	Modélisation mécaniste.....	94
7.2.2	Télédétection et analyse spatiale.....	95
7.2.3	Allometrie couronne/racines et interactions entre plantes	98
7.2.4	Incursions dans les savanes pyrophytes et la question des feux	99
7.3	Etude des forets tropicales.....	100
7.3.1	Adaptation de l'approche spectrale aux forêts denses	101
7.3.2	Stratégies d'extrapolation et d'échantillonnage.....	105
7.3.3	Mieux connaître les forêts et les arbres pour comprendre le signal.....	106
7.3.4	Les drones : une échelle intermédiaire indispensable.....	112
7.3.5	Synthèse	113
8	Projet de recherches	116
8.1	Un projet transdisciplinaire tourné vers le fonctionnement des forêts	116
8.2	L'apport des drones.....	117
8.3	Fonctionnement et diversité	119
8.4	Le passage aux satellites.....	120

8.5	Architecture des arbres et peuplements.....	122
8.6	Insertion partenariale et institutionnelle	123
	Annexes : Tirés à part	125
	ANNEXES : Presentation Défense.....	126

"The problem of relating phenomena across scales is the central problem in biology and in all of science."

"Addressing the problem of scale also has fundamental applied importance. Global and regional changes in biological diversity, in the distribution of greenhouse gases and pollutants, and in climate all have origins in and consequences for fine-scale phenomena." (Levin, 1992)

CURRICULUM VITAE

1 EXPERIENCE

1.1 POSITIONS

09/2017 -	IRD 'Chargé de Recherches' CRCN – Signal Physics and 3D modeling of tropical forests, at AMAP (Montpellier)
09/2015 - 08/2017	IRD 'Chargé de Recherches' CR1 - Expatriation in Yaounde, Cameroun (ENS-Yaounde 1)
12/2010 - 08/2015	IRD 'Chargé de Recherches' CR2 – Signal Physics and 3D modeling of tropical forests, at AMAP (Montpellier)
07/2010 - 06/2012	Marie Curie IEF-FP7 Post-doctoral research fellow at AMAP (Montpellier)
04/2009 - 12/2009	INRA Post-doctoral research fellow at AMAP (Montpellier)
10/2007 - 09/2010	FNRS Post-doctoral research fellow at the Laboratoire de Botanique Systématique et Phytosociologie (ULB).
01/2007 - 09/2007	FNRS Post-doctoral research fellow (Honorific mandate) FNRS.
10/2006 - 10/2007	Wiener-Anspach post-doctoral research fellow at the Oxford University Center for the Environment – Environment Change Institute.
10/2002 - 09/2006	FNRS Research fellow at the Laboratoire de Botanique Systématique et Phytosociologie (ULB).

1.2 TRAINING

2017	UAV multicopter drone training FORMATdrone, Montpellier
2017	microlight aircraft theoretical degree, Instructor level
2014	First aid in remote conditions UDPS13, Marseille
2011, 2013, 2020	Tree climbing, advanced tree climbing in tropical forest, control of Personal protective equipment Tree Climbing France & En Quête d' Arbres
2003 - 2006	PhD in Agronomical Science and Biological Engineering – ULB Thesis : 'Spatial interactions and self-organization in semi-arid vegetations' Directors : J. Lejoly, P. Couteron
2001 - 2003	DEA (MSc) Life Sciences - Université Libre de Bruxelles

	Thesis : 'Spatial interactions in self-organized semi-arid vegetations' Director : J. Lejoly
1996 - 2001	Master Agronomy (Bio-) Engineering - Université Libre de Bruxelles (1 st year : G.D., 2 nd year : G.D., 3 rd year : L.P.G.D.= summa cum laude) Thesis : 'Characterization and mapping of vegetation types and contribution to the participatory management of the Pendjari Hunting Zone (Northern Benin)' Directors : J. Lejoly, E. Wolff

1.3 PROJECTS

1.3.1 PARTICIPATION TO SCIENTIFIC PROJECTS

2023-2027	ONE FOREST VISION INITIATIVE (OFVI) Coopération scientifique et renforcement des capacités pour la protection des forêts et des zones humides tropicales Funding: MESR/MEAE, <u>Lead pour AMAP: N. Barbier</u>
2023-2027	COFORFUNC Toward a biome-scale monitoring of the COngo basin FORest FUNCtional composition Funding : Biodiversa+ Biomon (UE-ANR) / Lead: UMR AMAP
2020-2024	PHENOBS Strategic project: Towards a phenological observatory in French Guiana, to study climate-vegetation feedbacks and the diversity of plant strategies Funding: ANR – Labex CEBA / <u>PI: N. Barbier</u>
2021-2024	Understanding seed disperser movements and their consequences across rainforests gradients of structural and phenological diversity Funding: NASA / PIs: T. Smith & S. Saatchi
2021-2024	DESSFOR Degraded Stable States in tropical forests Funding: ANR – JCJC / PI: M. Réjou Méchain
2019-2023	PROFEEAC PROmouvoir et Formaliser l'Exploitation Artisanale du bois d'œuvre en Afrique Centrale par une approche multi-scalaire : gestion territorialisée de la ressource, gouvernance de la filière, promotion des demandes de sciages légaux Funding : FFEM / Lead : CIFOR
2019-2023	FORESTSCAN New technology for characterising forest structure and biomass at 'Super Sites' for EO cal/val across the tropics Funding : ESA / PI : M. Disney
2017 - 2020	3DFORMOD Combining remote sensing and 3D forest modelling to improve tropical forests monitoring of GHG emissions. Funding : ERA-GAS (UE-ANR) / Lead: UMR AMAP
2015 - 2016	PRE-REDD COMPOSANTE 2B, PARTIE CAMEROUN : Elaboration d'équations allométriques pour le bassin du Congo + Etudes complémentaires T-LIDAR et inventaires forestiers Funding : World Bank / Lead : COMIFAC

2017 - 2022	<p>BIOMASS Préparation à la mission satellitale Biomass Funding: CNES TOSCA / Lead: UMR CESBIO</p>
2016	<p>HYDROVEG Lien entre occupation du sol, couvert végétal et dynamiques hydro-climatiques et géochimiques : le cas du bassin du Nyong Funding : AUF-IRD / <u>PI : Nicolas Barbier</u></p>
2014 - 2017	<p>HYPER-TROPIK Consolidation de la mission hyperspectrale HYPXIM pour la thématique "Biodiversité des Forêts Tropicales", apport de la modélisation du transfert radiatif 3D. Funding: CNES TOSCA / Lead: UMR TETIS</p>
2013 - 2015	<p>FOREST GHG PLATFORM Fully Optimised and Reliable EmissionS Tool Funding: UE EIT - KIC Climate / Lead: Airbus DS</p>
2013 - 2015	<p>STEM-LEAF Preliminary studies for a vegetation Radar/Lidar space mission in France Funding: CNES TOSCA / Lead: UMR Tetis</p>
2013 - 2015	<p>COFORTIPS Forêts du Bassin du Congo: Biodiversité, Points de Basculement et Résilience des Systèmes Écologiques et Sociaux Forestiers. Funding: ERA-Net BiodivERSA (BiodivERSA 2012) / Lead: CIRAD</p>
2013 - 2014	<p>BIOFORAC Nouvelles approches méthodologiques pour l'évaluation de la biomasse forestière à partir des données satellitaires et de terrain en Afrique Centrale. Funding: AIRD Geoforafri / Lead: UMMISCO</p>
2011 - 2013	<p>FORAFAMA : Appui à la gestion durable des forêts du Bassin du Congo et du bassin amazonien brésilien Funding AFD-FFEM Lead : CIFOR</p>
2010 - 2012	<p>FOTOFor2 Funding : UE IEF – Marie Curie <u>PI: Barbier N.</u></p>

1.3.2 CONSULTANCY MISSIONS AND APPLIED RESEARCH PROJECTS

2017 - 2025	<p>NACHTIGAL Vegetation cover mapping and monitoring of the Nachtigal dam (Cameroon) and compensation measures in the Copal area and the Mpem & Djim National Park Funding: NHPC / <u>PI: N. Barbier</u></p>
2020	<p>Calibration of a non-destructive allometric equation for the Miombo forests of DRC Funding FAO / <u>PI: N. Barbier</u></p>
2019-2022	<p>RELIQUES Fragmentation des forets sur substrats ultramafiques en Nouvelle Calédonie Funding : CNRT/ <u>PIs : P. Birnbaum, N. Barbier</u></p>
2019	<p>Vegetation mapping in the Center Province – Cameroon Funding : GIZ / <u>PIs N. Barbier, P. Couteron</u></p>

2013 - 2015	Vegetation mapping for baseline study, Evaro Ramsar Reserve (Gabon) Client : Ministère des Forêts. Partnership: MBG-WWF. Funding : BAD. / PI : T. Stevart
2012 - 2013	Vegetation mapping for baseline study, Maboumine (Gabon) Client: ERAMET. Partnership: MBG-Golder / PI: T. Stevart
10/2011	UN-REDD (Rome): Methodology of the National Forest Inventory of the DR Congo.
07/2011	Direction Générale de l'Armement, ONERA, Thales (France) : Simulation of hyperspectral targets in tropical forests. PI : <u>N. Barbier</u>
12/2001	Projet ECOPAS-W Parc Régional du W (Burkina, Benin, Niger). Field inventory and vegetation mapping. Lead: CIRAD

1.3.3 RESPONSIBILITIES

2017 -	Supervision of the drone platform at AMAP (about 10 pilots and UAVs)
2020 - 2025	Co-animator of theme Tetrorfor: Remote sensing of tropical forests at AMAP (about 10 full time equivalents)
2015-2020	Co-animator of Theme '3D structure and dynamics of tropical forests'

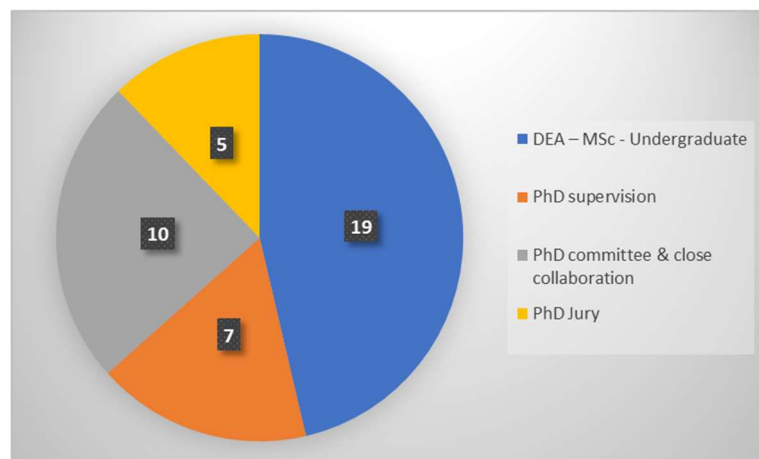
2 TEACHING - SUPERVISION

2.1 EXERCISES AND SEMINARS

2022	Participation to MOOC 'l'arbre' de l'Université Virtuelle Environnement et Développement Durable (19 000 inscriptions). https://www.uved.fr/production-et-coordination-de-mooc/mooc-arbres
2022	Teacher training in remote sensing and scientific forest inventory at Ecole National des Eaux et Forêts (Mbalmayo, Cameroun)
2021-2024	Introduction pratique aux Méthodes de télédétection 3D en foresterie. Master sciences du bois, 'Fil Rouge'. Université de Montpellier, France
2015	Guest Lecturer at the 'XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto': Estimating forest biomass with remote sensing and carbon cycle modeling for REDD+ services. Joao Pessoa, Brasil

2014	Guest Lecturer: Post Graduate Course in Spatial Ecology, Utrecht, Holland.
2013	Guest Lecturer at the 'XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto': Advances on the Detection and Analysis of Environmental Changes in Amazonia using Remote Sensing, Iguassu, Brasil
2010 - 2012	UM2 : MSc1, MSc2 Ecology – Biodiversity Guest Lecturer in Exeter: Geography Dpt.
2008	ULB : BIOL-F-438 (J. Lejoly) Systématique et évolution des plantes : 3 ECTS.
2007 - 2010	ULB : AGRO 044 (M. Dufrêne) Phytoécologie et cartographie appliquées à l'aménagement du territoire : 15 h. Guest Lecturer in Oxford: Geography Dpt.
2005	ULB : Cours tournant (P. Couteron) Statistiques spatiales. 8h.

2.2 UNDERGRADUATE AND POSTGRADUATE THESIS SUPERVISION



DEA – MSc - Undergraduate

Vincent Deblauwe (ULB, 2004), Abdoulaye Diouf (ULB, 2006), Barima Sabas (ULB, 2006), Rebecca Blandford (Oxford, 2007), Delphine Renard (UM2, 2007), Frank Winsen (Utrecht, 2008), Stany Angoyi (ULB, 2008), Isabelle Fabre, (UM2, 2011), Gaëlle Viennois (Silat AgroParisTech, 2011), Stéphane Momo (Dshang, UM2, 2012-2014), Marilou Hircq (UM2, 2015), Mandjo Boré (Agro Paris Tech, 2015), Le Bienfaiteur Sagang (Dshang, 2016), Nelly Sirri (Yaoundé,

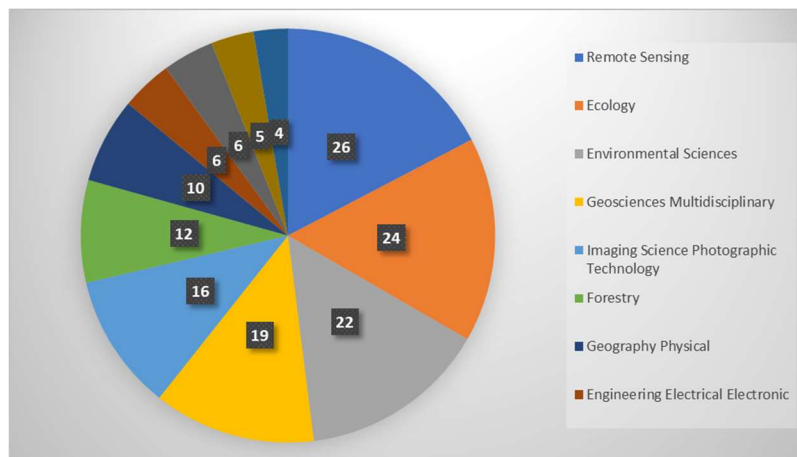
	2016), Guillaume Delaître (Marseille BBSG/DLAD 2019), Emmanuel Bourassin (Paris ENSG-Géomatique, 2019), Imma Tcheferi (Yaoundé I, 2020), Imma Tcheferi (Silat AgroParisTech, 2023), Carmel Mounziegou (Rennes II, 2024)
PhD supervision	Vincent Deblauwe (ULB, 2010), Abdoulaye Diouf (ULB, 2012), Ibrahim Fayad (UM2, 2015), John Katembo (U. Kisangani, 2021), Stéphane Momo (Yaounde I, 2019), LeBienfaiteur Sagang (Yaoundé I, 2020), Gislain Mofack (Yaoundé I, ongoing)
PhD committee & close collaboration	Ali Mahamane (ULB, 2005), Barima Sabas (ULB, 2009), Serge Yedmel (Cocodi, 2010), Delphine Renard (CEFE - UM2, 2011), J.F. Bastin (ULB-FSA Gbx, 2014), Karine Adeline (ONERA - UPS Toulouse, 2015), Pierre Ploton (U. Dresde/U. Montpellier, 2017), Emil Cherrington (U. Dresde/U. Montpellier, 2016), Libalah Moses (Yaounde I, 2018), Eric Chraibi (U. Montpellier, ongoing)
PhD Jury	Gabriel Hmimina (Paris Sud, 2013), J.F. Bastin (ULB-FSA Gbx, 2014), Karine Adeline (GEET, 2015), Alvaro Lau (Wageningen UR, 2018), Dav Ebengo (U. Montpellier, 2021)

3 PUBLICATIONS AND SCIENTIFIC ACTIVITIES

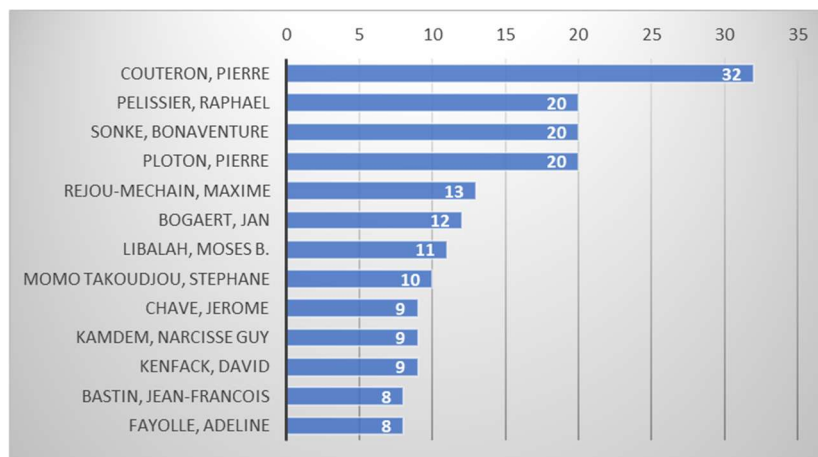
PUBLICATION STATISTICS

	WOS	Google
Publications	83	
Citations	3555	~6000
H-Index	31	39
First author position	10 %	
Last author position	16 %	

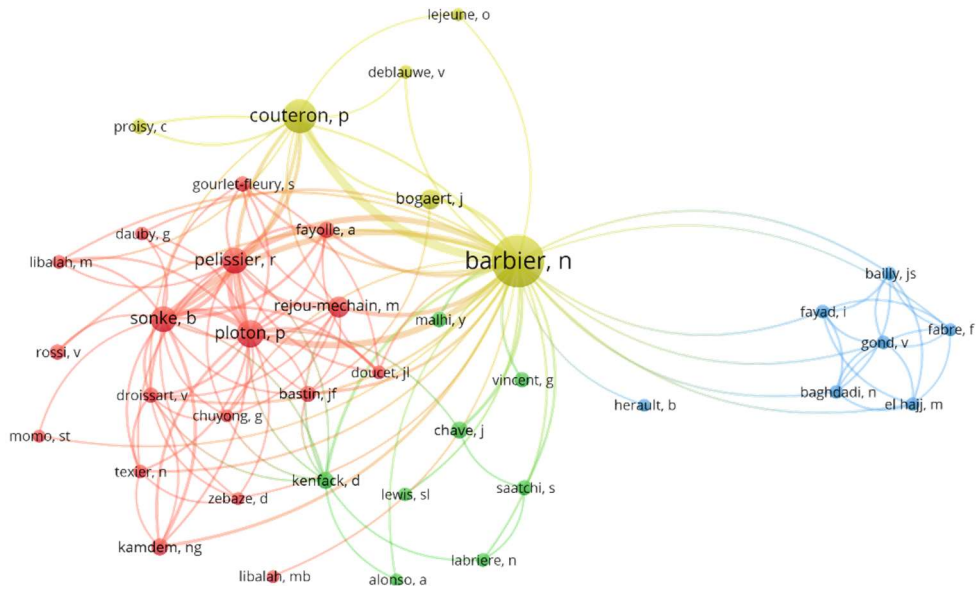
MAIN FIELDS OF TARGETED JOURNALS (# PUBLISHED PAPERS)



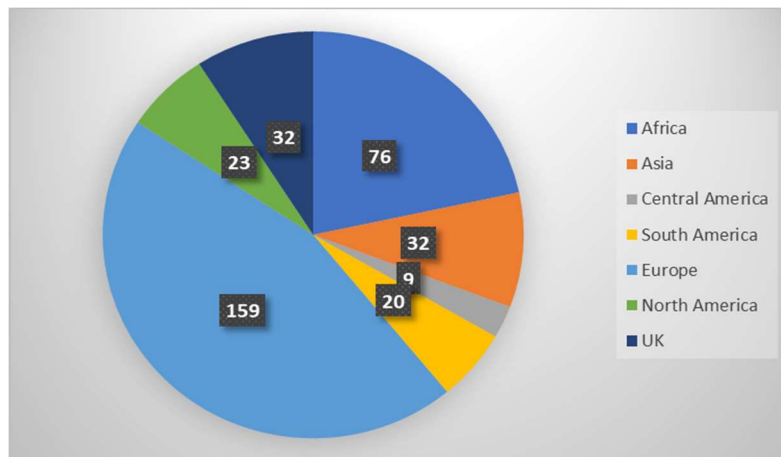
PRINCIPAL CO-AUTHORS



CO-AUTHORSHIP NETWORK



REGIONAL DISTRIBUTION OF CO-AUTHORS



3.1 PAPERS IN INTERNATIONAL PEER-REVIEWED JOURNALS

2024

RODDA, S.R., FARARODA, R., GOPALAKRISHNAN, R., JHA, N., REJOU-MECHAIN, M., COUTERON, P., N. BARBIER, et al. 2024. LiDAR-based reference aboveground biomass maps for tropical forests of South Asia and Central Africa. *Scientific Data* 11(1): 334.

COOPER, D., LM, S.L. LEWIS, M.JP SULLIVAN, P.I. PRADO, H. TER STEEGE, N. BARBIER, SLIK, F. et al. 2024. Consistent patterns of common species across tropical tree communities. *Nature*: 1-10.

2023

ZÉBAZÉ, D., GOREL A., GILLET J.F., HOUNGBÉGNON F., BARBIER N., LIGOT G., LHOEST S., et al. 2023. Natural regeneration in tropical forests along a disturbance gradient in South-East Cameroon. *Forest Ecology and Management* 547: 121402.

VINCENT, G., VERLEY, P., BREDE, B., DELAITRE, G., MAURENT, E., BALL, J., CLOCHER, I., BARBIER, N., 2023. Multi-sensor airborne lidar requires intercalibration for consistent estimation of light attenuation and plant area density. *Remote Sensing of Environment* 286, 113442.

BIRNBAUM, P., IBANEZ, T., BLANCHARD, G., JUSTEAU-ALLAIRE, D., HEQUET, V., ELTABET, N., VIEILLEDENT, G., BARBIER, N., BARRIERE, R., & BRUY, D. (2023). Forest and tree species distribution on the ultramafic substrates of New Caledonia. *Botany Letters*, 1-13.

BLANCHARD, G., BARBIER, N., VIEILLEDENT, G., IBANEZ, T., HEQUET, V., MCCOY, S., & BIRNBAUM, P. 2023. UAV-Lidar reveals that canopy structure mediates the influence of edge effects on forest diversity, function and microclimate. *Journal of Ecology* 111, 1411–1427.

2022

BREDE, B., BARTHOLOMEUS, H.M., BARBIER, N., PIMONT, F., VINCENT, G., HEROLD, M., 2022a. Peering through the thicket: Effects of UAV LiDAR scanner settings and flight planning on canopy volume discovery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 114, 103056.

BREDE, B., TERRY, L., BARBIER, N., BARTHOLOMEUS, H.M., BARTOLO, R., CALDERS, K., DERROIRE, G., KRISHNA MOORTHY, S.M., LAU, A., LEVICK, S.R., RAUMONEN, P., VERBEECK, H., WANG, D., WHITESIDE, T., VAN DER ZEE, J., HEROLD, M., 2022b. Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 280, 113180. h

CHRAIBI, E., DE BOISSIEU, F., BARBIER, N., LUQUE, S., FERET, J.-B., 2022. Stability in time and consistency between atmospheric corrections: Assessing the reliability of Sentinel-2 products for biodiversity monitoring in tropical forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112, 102884.

JUCKER, T., FISCHER, F.J., CHAVE, J., COOMES, D.A., CASPERSEN, J., ALI, A., LOUBOTA PANZOU, G.J., FELDPAUSCH, T.R., FALSTER, D., USOLTSEV, V.A., ADU-BREDU, S., ALVES, L.F., AMINPOUR, M., ANGOBOY, I.B., ANTEN, N.P.R., ANTIN, C., ASKARI, Y., MUÑOZ, R., AYYAPPAN, N., BALVANERA, P., BANIN, L., BARBIER, N., ET AL., 2022. Tallo: A global tree allometry and crown architecture database. *Global Change Biology* 28, 5254–5268.

KAÇAMAK, B., BARBIER, N., AUBRY-KIENTZ, M., FORNI, E., GOURLET-FLEURY, S., GUIBAL, D., LOUMETO, J.-J., POLLET, S., ROSSI, V., ROWE, N.P., 2022. Linking drone and ground-based liana measurements in a Congolese forest. *Frontiers in Forests and Global Change* 5.

SAGANG, L.B.T., PLOTON, P., VIENNOIS, G., FÉRET, J.-B., SONKÉ, B., COUTERON, P., BARBIER, N., 2022. Monitoring vegetation dynamics with open earth observation tools: the case of fire-modulated savanna to forest transitions in Central Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 188, 142–156. 8

VIENNOIS, G., BETARD, F., FREYCON, V., BARBIER, N., COUTERON, P., 2022. Automated landform classification and mapping using a combined textural-morphometric approach: the Congo basin and surroundings. *Journal of Geomorphology* 1, 79.

2021

LOUBOTA PANZOU, G. J., FAYOLLE, A., JUCKER, T., PHILLIPS, O. L., BOHLMAN, S., BANIN, L. F., LEWIS, S. L., AFFUM-BAFFOE, K., ALVES, L. F., ANTIN, C., ARETS, E., ARROYO, L., BAKER, T. R., BARBIER, N., BEECKMAN, H., BERGER, U., BOCKO, Y. E., BONGERS, F., BOWERS, S., ... FELDPAUSCH, T. R. 2021. Pantropical variability in tree crown allometry. *Global Ecology and Biogeography*, 30(2), 459-475.

FATOYINBO, T., ARMSTON, J., SIMARD, M., SAATCHI, S., DENBINA, M., LAVALLE, M., HOFTON, M., TANG, H., MARSELIS, S., PINTO, N., HANCOCK, S., HAWKINS, B., DUNCANSON, L., BLAIR, B., HANSEN, C., LOU, Y., DUBAYAH, R., HENSLEY, S., SILVA, C., BARBIER, N.... HIBBARD, K. 2021. The NASA AfriSAR campaign : Airborne SAR and lidar measurements of tropical forest structure and biomass in support of current and future space missions. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112533.

JHA, N., TRIPATHI, N. K., BARBIER, N., VIRDIS, S. G., CHANTHORN, W., VIENNOIS, G., BROCKELMAN, W. Y., NATHALANG, A., TONGSIMA, S., SASAKI, N., & OTHERS. 2021. The real potential of current passive satellite data to map aboveground biomass in tropical forests. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(3), 504-520.

MARTIN-DUCUP, O., MOFACK, G., WANG, D., RAUMONEN, P., PLOTON, P., SONKÉ, B., BARBIER, N., COUTERON, P., & PÉLISSIER, R. 2021. Evaluation of automated pipelines for tree and plot metric estimation from TLS data in tropical forest areas. *Annals of Botany*, 128(6), 753-766.

RÉJOU-MÉCHAIN, M., MORTIER, F., BASTIN, J.-F., CORNU, G., BARBIER, N., BAYOL, N., BÉNÉDET, F., BRY, X., DAUBY, G., DEBLAUWE, V., & OTHERS. 2021. Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature*, 593(7857), 90-94.

TEILLET, C., PILLOT, B., CATRY, T., DEMAGISTRI, L., LYSZCZARZ, D., LANG, M., COUTERON, P., BARBIER, N., ADOU KOUASSI, A., GUNTHER, Q., & OTHERS. 2021. Fast Unsupervised Multi-Scale Characterization of Urban Landscapes Based on Earth Observation Data. *Remote Sensing*, 13(12), 2398.

2020

SAGANG, L. B. T., PLOTON, P., SONKÉ, B., POILVÉ, H., COUTERON, P., & BARBIER, N. 2020. Airborne Lidar Sampling Pivotal for Accurate Regional AGB Predictions from Multispectral Images in Forest-Savanna Landscapes. *Remote Sensing*, 12(10), 1637.

KATEMBO, J. M., LIBALAH, M. B., BOYEMBA, F. B., DAUBY, G., & BARBIER, N. 2020. Multiple Stable Dominance States in the Congo Basin Forests. *Forests*, 11(5), 553.

LIBALAH, M. B., DROISSART, V., SONKÉ, B., BARBIER, N., DAUBY, G., FORTUNEL, C., KAMDEM, G., KAMDEM, N., LEWIS, S. L., & MOFACK, G. I. 2020. Additive influences of soil and climate gradients drive tree community composition of Central African rain forests. *Journal of Vegetation Science*, 31(6), 1154-1167.

MOMO TAKOUDJOU, S., PLOTON, P., MARTIN-DUCUP, O., LEHNEBACH, R., FORTUNEL, C., TAKOUGOUM SAGANG, L.B., BOYEMBA, F., . . . , & BARBIER, N. 2020. Leveraging signatures of plant functional strategies in wood density profiles of African trees to correct mass estimations from terrestrial laser data. *Scientific Reports* 10(1): 1-11.

PLOTON, P., MORTIER, F., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BARBIER, N., PICARD, N., ROSSI, V., DORMANN, C., CORNU, G., VIENNOIS, G., & BAYOL, N. 2020. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. *Nature communications*, 11(1), 1-11.

PLOTON, P., MORTIER, F., BARBIER, N., CORNU, G., RÉJOU-MÉCHAIN, M., ROSSI, V., ALONSO, A., BASTIN, J.-F., BAYOL, N., BENEDET, F., & OTHERS. 2020. A map of African humid tropical forest aboveground biomass derived from management inventories. *Scientific Data*, 7(1), 1-13.

MARTIN-DUCUP, O., PLOTON, P., BARBIER, N., MOMO TAKOUDJOU, S., MOFACK, G., KAMDEM, N. G., FOURCAUD, T., SONKE, B., COUTERON, P., & PELISSIER, R. 2020. Terrestrial laser scanning reveals convergence of tree architecture with increasingly dominant crown canopy position. *Functional Ecology*, 34(12), 2442-2452.

2019

SIRRI, N. F., LIBALAH, M. B., MOMO TAKOUDJOU, S., PLOTON, P., MEDJIBE, V., KAMDEM, N. G., MOFACK, G., SONKÉ, B., & BARBIER, N. 2019. Allometric models to estimate leaf area for tropical African broadleaved forests. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 8985-8994.

DUNCANSON, L., ARMSTON, J., DISNEY, M., AVITABILE, V., BARBIER, N., CALDERS, K., CARTER, S., CHAVE, J., HEROLD, M., CROWTHER, T.W., 2019. The importance of consistent global forest aboveground biomass product validation. *Surveys in Geophysics* 1–21.

MARSELIS, S.M., TANG, H., ARMSTON, J., ABERNETHY, K., ALONSO, A., BARBIER, N., BISSIENGOU, P., JEFFERY, K., KENFACK, D., LABRIÈRE, N., LEE, S.K., LEWIS, S., MEMIAGHE, H., POULSEN, J.R., WHITE, L., DUBAYAH, R., 2019. Exploring the relation between remotely sensed vertical canopy structure and tree species diversity in Gabon. *Environ. Res. Lett.* 14 094013.

REJOU-MECHAIN, M., BARBIER, N., COUTERON, P., PLOTON, P., VINCENT, G., HEROLD, M., MERMOZ, S., SAATCHI, S., CHAVE, J., DE BOISSIEU, F., 2019. Upscaling Forest biomass from field to satellite measurements: sources of errors and ways to reduce them. *Surveys in Geophysics* 1–31.

2018

FAYOLLE, A., NGOMANDA, A., MBASI, M., BARBIER, N., BOCKO, Y., BOYEMBA, F., COUTERON, P., FONTON, N., KAMDEM, N., KATEMBO, J., ET AL., 2018. A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling. *Forest Ecology and Management* 430, 228–240.

BUGNICOURT, P., GUITET, S., SANTOS, V.F., BLANC, L., SOTTA, E.D., BARBIER, N., COUTERON, P., 2018. Using textural analysis for regional landform and landscape mapping, Eastern Guiana Shield. *Geomorphology*. 317, 23-44.

MOMO TAKOUDJOU, S., PLOTON, P., SONKÉ, B., HACKENBERG, J., GRIFFON, S., DE COLIGNY, F., KAMDEM, N.G., LIBALAH, M., MOFACK, G.I., LE MOGUÉDEC, G., ..., BARBIER, N., 2018. Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods in Ecology and Evolution* 9, 905–916.

TAKOUGOUM SAGANG, MOMO, S.T., LIBALAH, M.B., ROSSI, V., FONTON, N., MOFACK, G.I., KAMDEM, N.G., NGUETSOP, V.F., SONKÉ, B., BARBIER, N., 2018. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data. *Forest Ecology and Management* 424, 519–528.

LABRIERE, N., S. TAO, J. CHAVE, K. SCIPAL, T. LE TOAN, K. ABERNETHY, A. ALONSO, BARBIER, N., ET AL. 2018. In Situ Reference Datasets From the TropiSAR and AfriSAR Campaigns in Support of Upcoming Spaceborne Biomass Missions. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1-11.

BASTIN, J.F., E. RUTISHAUSER, J. R. KELLNER, S. S. SAATCHI, R. PELISSIER, B. HÉRAULT, J. W. FERRY SLIK, BARBIER, N., ET AL. 2018 Pan-Tropical Prediction of Forest Structure from the Largest Trees. *Global Ecology and Biogeography*, 27 (11) 1366-1383

2017

JOETZJER, E., PILLET, M., CIAIS, P., BARBIER, N., CHAVE, J., SCHLUND, M., MAIGNAN, F., BARICHIVICH, J., LUYSSAERT, S., HÉRAULT, B., OTHERS, 2017. Assimilating satellite-based canopy height within an ecosystem model to estimate aboveground forest biomass. *Geophysical Research Letters* 44, 6823–6832.

JUCKER, T., CASPERSEN, J., CHAVE, J., ANTIN, C., BARBIER, N., BONGERS, F., DALPONTE, M., EWIJK, K.Y., FORRESTER, D.I., HAENI, M., OTHERS, 2017. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Global change biology* 23, 177–190.

PARGAL, S., FARARODA, R., RAJASHEKAR, G., BALACHANDRAN, N., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BARBIER, N., JHA, C.S., PÉLISSIER, R., DADHWAL, V.K., COUTERON, P., 2017. Inverting aboveground biomass–canopy texture relationships in a landscape of Forest mosaic in the Western Ghats of India using very high resolution Cartosat imagery. *Remote Sensing* 9, 228.

PLOTON, P., BARBIER, N., COUTERON, P., ANTIN, C., AYYAPPAN, N., BALACHANDRAN, N., BARATHAN, N., BASTIN, J.-F., CHUYONG, G., DAUBY, G., OTHERS, 2017. Toward a general tropical forest biomass prediction model from very high resolution optical satellite images. *Remote Sensing of Environment* 200, 140–153.

2016

CHERRINGTON, E.A., BARBIER, N., PLOTON, P., VINCENT, G., SABATIER, D., BERGER, U., PÉLISSIER, R., 2016. Equatorial Forests Display Distinct Trends in Phenological Variation: A Time-Series Analysis of Vegetation Index Data from Three Continents. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9, 3505–3511.

PLOTON, P., BARBIER, N., MOMO, S.T., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BOYEMBA BOSELA, F., CHUYONG, G., DAUBY, G., DROISSART, V., FAYOLLE, A., GOODMAN, R.C., OTHERS, 2016. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries. *Biogeosciences* 13, 1571–1585.

BLANCHARD, E., BIRNBAUM, P., IBANEZ, T., BOUTREUX, T., ANTIN, C., PLOTON, P., VINCENT, G., POUTEAU, R., VANDROT, H., HEQUET, V., BARBIER, N. ET AL. 2016. Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees* 1–16.

FAYAD, I., BAGHDADI, N., BAILLY, J.-S., BARBIER, N., GOND, V., HÉRAULT, B., EL HAJJ, M., FABRE, F., AND PERRIN, J. 2016. Regional Scale Rain-Forest Height Mapping Using Regression-Kriging of Spaceborne and Airborne LiDAR Data: Application on French Guiana. *Remote Sensing* 8, 240.

2015

BARBIER, N., AND COUTERON, P. 2015. Attenuating the bidirectional texture variation of satellite images of tropical forests. *Remote Sensing of Environment*. 171, 245–260.

BASTIN, J.-F., BARBIER, N., REJOU-MECHAIN, M., FAYOLLE, A., GOURLET-FLEURY, S., MANIATIS, D., DE HAULLEVILLE, T., MALHI, Y., PLOTON, P., ADAMS, B., ET AL. 2015. Seeing Central African forests through their largest trees. *Scientific Reports*.5,13156.

BASTIN, J.-F., BARBIER, N., COUTERON, P., ADAMS, B., SHAPIRO, A., BOGAERT, J., AND DE CANNIÈRE, C. 2015. Aboveground biomass mapping of African forest mosaics using canopy texture analysis: towards a regional approach. *Ecological Applications*. 25, 1747–1747.

2014

FAYAD, I., BAGHDADI, N., GOND, V., BAILLY, J.S., BARBIER, N., EL HAJJ, M., AND FABRE, F. 2014. Coupling potential of ICESat/GLAS and SRTM for the discrimination of forest landscape types in French Guiana. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33, 21–31.

FAYAD, I., BAGHDADI, N., BAILLY, J.-S., BARBIER, N., GOND, V., HAJJ, M. E., FABRE, F., & BOURGINE, B. 2014. Canopy height estimation in French Guiana with LiDAR ICESat/GLAS data using principal component analysis and random forest regressions. *Remote Sensing*, 6(12), 11883-11914.

FAYAD, I., BAGHDADI, N., BAILLY, J.-S., BARBIER, N., GOND, V., HAJJ, M.E., AND FABRE, F. 2014. Canopy height estimation in French Guiana using LiDAR ICESat/GLAS data. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International, (IEEE), pp. 1337–1340.*

2013

VIENNOIS, G., BARBIER, N., FABRE, I. & COUTERON, P. 2013. Multiresolution quantification of deciduousness in West Central African forests. *Biogeosciences* 10, 6957–6967.

2012

DIOUF, A., N. BARBIER, P. COUTERON, A.M. LYKKE, DEBLAUWE, V., A. MAHAMANE, M. SAADOU, ET J. BOGAERT, 2012. Relationships between fire history and woody vegetation structure and composition in a semi-arid savanna landscape (Niger, West Africa). *Applied Vegetation Science*. DOI: 10.1111/j.1654-109X.2012.01187.x

DEBLAUWE, V., P. COUTERON, J. BOGAERT, ET N. BARBIER, 2012. Determinants and dynamics of banded vegetation pattern migration in arid climates. *Ecological Monographs*. DOI:10.1890/11-0362.1.

PLOTON, P., R. PELISSIER, C. PROISY, T. FLAVENOT, N. BARBIER, S.N. RAI, ET P. COUTERON, 2012. Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images. *Ecological Applications*. DOI : 10.1890/11-1606.

2011

DEBLAUWE, V., P. COUTERON, O. LEJEUNE, J. BOGAERT, ET N. BARBIER, 2011. Environmental modulation of self-organized periodic vegetation patterns in Sudan. *Ecography* 34: p.990–1001.

BARBIER, N., 2011. Macro-ecology of the world's savannas (Book Review). *Frontiers of Biogeography* 3: p.28-29.

BARBIER, N., C. PROISY, C. VEGA, D. SABATIER, ET P. COUTERON, 2011. Bidirectional texture function of high resolution optical images of tropical forest: An approach using LiDAR hillshade simulations. *Remote Sensing of Environment* 115: p.167–179.

BRADLEY, A.V., F.F. GERARD, N. BARBIER, G.P. WEEDON, L.O. ANDERSON, C. HUNTINGFORD, L.E.O.C. ARAGAO, P. ZALAZOWSKI, ET E. ARAI, 2011. Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region. *Global Change Biology* 17: p.2245-2260.

BARBIER, N., P. COUTERON, J.P. GASTELLY-ETCHEGORRY, ET C. PROISY, 2011. Linking canopy images to forest structural parameters: potential of a modeling framework. *Annals of Forest Science* p.1–7.

MANIATIS, D., MALHI, Y., L. SAINT-ANDRÉ, D. MOLLICONE, N. BARBIER, S.S. SAATCHI, M. HENRY, L. TEILLIER, M. SCHARTZENBERG, ET L. WHITE, 2011. Evaluating the potential of commercial forest inventory data to report on forest carbon stock and forest carbon stock changes for REDD+ under the UNFCCC. *International Journal of Forestry Research*. DOI :10.1155/2011/134526

2010

ANDERSON, L.O., Y. MALHI, L.E.O.C. ARAGAO, R. LADLE, E. ARAI, N. BARBIER, ET O. PHILLIPS, 2010. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytologist* 187: p.733-750.

BARBIER, N., P. COUTERON, O. PLANCHON, ET A. DIOUF, 2010. Multiscale comparison of spatial patterns using two-dimensional cross-spectral analysis: application to a semi-arid (gapped) landscape. *Landscape Ecology* 25: p.889-902.

BARBIER, N., P. COUTERON, C. PROISY, Y. MALHI, ET J.P. GASTELLU-ETCHEGORRY, 2010. The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography* 19: p.72–84.

BARIMA, Y.S.S., N. BARBIER, B. OUATTARA, ET J. BOGAERT, 2010. Relation entre la composition floristique et des indicateurs de la fragmentation du paysage dans une région de transition forêt-savane ivoirienne. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ* 14: p.617–625.

BUTLER, A.J., N. BARBIER, J. CERMAK, J. KOLLER, C. THORNILY, C. McEVOY, B. NICOLL, M.P. PERKS, J. GRACE, ET P. MEIR, 2010. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. *Tree Physiology* 30: p.705-714.

DIOUF, A., N. BARBIER, A. MAHAMANE, J. LEJOLY, M. SAADOU, ET J. BOGAERT, 2010. Characterization of the spatial structure of ligneous entities in a « speckled bushland » to the south-west of Niger. *Canadian Journal of Forest Research* 40: p.827-835.

YEDMEL, M.S.C., A.A. KADIO, O.J. HARDY, K. N'GUESSAN FRANCOIS, ET N.S. BARBIER, 2010. Impact du feu sur la structure et la composition floristique d'un peuplement forestier de Côte d'Ivoire et interaction avec les traitements sylvicoles. *Canadian journal of forest research* 40: P.1904–1913.

2009

BARIMA, Y.S.S., N. BARBIER, I. BAMBA, D. TRAORE, J. LEJOLY, ET J. BOGAERT, 2009. Landscape Dynamics in a Transitional Forest-Savannah Zone in Cote D'Ivoire. *Bois Et Forêts Des Tropiques* 299: p.15-25.

LEFEVER, R., N. BARBIER, P. COUTERON, ET O. LEJEUNE, 2009. Deeply gapped vegetation patterns: on crown/root-allometry, vegetation critical point and desertification. *Journal of Theoretical Biology* 261: p.194-209.

2008

ARAGAO, L.E.O.C., Y. MALHI, N. BARBIER, A. LIMA, Y. SHIMABUKURO, L. ANDERSON, ET S. SAATCHI, 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 363: p.1779-1785.

BARBIER, N., P. COUTERON, R. LEFEVER, V. DEBLAUWE, ET O. LEJEUNE, 2008. Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gap vegetation patterns in SW Niger. *Ecology* 89: p.1521-1531.

2007

D'ODORICO, P., F. LAIO, A. PORPORATO, L. RIDOLFI, ET N. BARBIER, 2007. Noise-induced vegetation patterns in fire-prone savannas. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 112: p.G02021.

2006

BARBIER, N., P. COUTERON, J. LEJOLY, V. DEBLAUWE, ET O. LEJEUNE, 2006. Self-organised vegetation patterning as fingerprint of climate and human impact on semiarid ecosystems. *Journal of Ecology* 94: p.537-547.

COUTERON, P., N. BARBIER, ET D. GAUTIER, 2006. Textural ordination based on Fourier spectral decomposition: a method to analyze and compare landscape patterns. *Landscape Ecology* 21: p.555-567.

Book chapters

VIENNOIS, G., STÉVART, T., WEGHE, J. P. V., SAATCHI, S., SCHILL, S., ALDOUS, A., PAIZ, M.-C., BOUPOYA, A., & BARBIER, N. (2022). Vegetation Mapping. In VAN DE WEGHE, J. P., & STÉVART, T. (2022). THE OGOUÉ DELTA. MISSOURI BOTANICAL GARDEN PRESS.

DUNCANSON, L., ARMSTON, J., DISNEY, M., AVITABILE, V., BARBIER, N., CALDERS, K., CARTER, S., CHAVE, J., HEROLD, M., MACBEAN, N., & OTHERS. (2021). ABOVEGROUND WOODY BIOMASS PRODUCT VALIDATION GOOD PRACTICES PROTOCOL. GOOD PRACTICES FOR SATELLITE DERIVED LAND PRODUCT VALIDATION,(P. 236)

VIENNOIS, G., STÉVART, T., WEGHE, J. P. V., SAATCHI, S., SCHILL, S., ALDOUS, A., PAIZ, M.-C., BOUPOYA, A., & BARBIER, N. (2017). Cartographie de la végétation. In Le Delta de l'Ogooué. Agence Nationale des Parcs Nationaux. <https://hal-sde.archives-ouvertes.fr/hal-01614663>

BARBIER, N., LIBALAH, M., KATEMBO, J., PLOTON, P., DROISSART, V., TEXIER, N., SONKE, B., 2016. Pistes pour l'étude de la distribution des peuplements de *Gilbertiodendron dewevrei* comme signature

des impacts climatiques ou anthropiques anciens, in: Pour Une Écologie Historique En Afrique Centrale. Yaoundé.

GOND, V., CORNU, G., VIENNOIS, G., BETBEDER, J., REJOU-MECHAIN, M., FAYOLLE, A., GOURLET-FLEURY, S., BAGHDADI, N., BARBIER, N., MORTIER, F., OTHERS, 2016. De l'arbre au satellite: comment cartographier la diversité des forêts tropicales d'Afrique Centrale?, in: Botanists of the Twenty-First Century: Roles, Challenges and Opportunities = Quels Botanistes Pour Le 21e Siècle? Métiers, Enjeux et Opportunités. UNESCO, Paris.

BARBIER, N., J. BELLOT, P. COUTERON, A. J. PARSONS, ET E. N. MUELLER, « Short-Range Ecogeomorphic Processes in Dryland Systems », in Patterns of Land Degradation in Drylands, Springer, 2014, p. 85–101.

BARBIER, N., J. BELLOT, P. COUTERON, T. WIEGAND, V. GRIMM, V. DEBLAUWE, P. BIRO, ET E. N. MUELLER, « Assessment of Patterns in Ecogeomorphic Systems », in Patterns of Land Degradation in Drylands, Springer, 2014, p. 247–264.

BARBIER, N., P. COUTERON, ET V. DEBLAUWE, « Case Study of Self-Organized Vegetation Patterning in Dryland Regions of Central Africa », in Patterns of Land Degradation in Drylands, Springer, 2014, p. 347–356.

JELTSCH, F., L. TURNBULL, S. SCARSOGGIO, C. L. ALADOS, F. GALLART, E. N. MUELLER, N. BARBIER, J. D. MILLINGTON, J. WAINWRIGHT, M. WIECZOREK, ET OTHERS, « Resilience, Self-Organization, Complexity and Pattern Formation », in Patterns of Land Degradation in Drylands, Springer, 2014, p. 55–84.

PLOTON, P., PELISSIER, R., BARBIER, N., PROISY, C., RAMESH, B. R. & P. COUTERON. Canopy texture analysis for large-scale assessments of tropical forest stand structure and biomass. In Treetops at Risk: Challenges of Global Canopy Ecology and Conservation. Lowman, M., Devy, S. Ganesh, T. Eds. (Springer Science & Business; New York, 2013). pp 237-245.

PROISY, C., BARBIER, N., GASTELLU-ÉTCHEGORRY, J. P., GUÉROULT, M., GRAU, E., PÉLISSIER, R. & COUTERON, P. Biomass Prediction in Tropical Forests: the Canopy Grain Approach. In: Temilola, D, Fatoyindo, E. (Eds). Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications / Book 1. (Intech; Shangai, 2012). pp 59-76.

KOFFI, K.J., V. DEBLAUWE, S. SIBOMANA, D.F.R. NEUBA, D. CHAMPLUVIER, C.D. CANNIERE, N. BARBIER, D. TRAORE, B. HABONIMANA, E. ROBBRECHT, ET OTHERS, 2007. Spatial Pattern Analysis as a Focus of Landscape Ecology to Support Evaluation of Human Impact on Landscapes and Diversity. Landscape Ecological Applications in Man-Influenced Areas. 7–32.

3.2 POPULARIZATION

BARBIER, N., SONKE B., SAGANG L.B., TAKOUDJOU, S., PLOTON P., 2023. Mesurer l'invisible : la dure tâche de calculer le stock et le flux de carbone d'une forêt. The Conversation.

<https://theconversation.com/mesurer-linvisible-la-dure-tache-de-calculer-le-stock-et-le-flux-de-carbone-dune-foret-212810>

BARBIER, N. 2021. African tropical montane forests store more carbon than was thought. *Nature*, 596(7873), 488-490.

2022 : Interview pour Science & Vie Junior Hors-série Nature : « La vie secrète de la Forêt » : La photosynthèse avec des drones/ Les forêts depuis l'espace.

OUHANON, M. 2019. Ces aventures qui font du sens : Les conquérants des sommets verts. *Geo Aventure* 8, 23-32.

VIENNOIS, G., STÉVART, T., WEGHE, J.P.V., SAATCHI, S., SCHILL, S., ALDOUS, A., PAIZ, M.-C., BOUPOYA, A., BARBIER, N., 2017. Cartographie de la végétation, in: *Le Delta de l'Ogooué*. Agence Nationale des Parcs Nationaux.

REJOU-MECHAIN, M., AND BARBIER, N. (2014). Les tropiques vus du ciel. In *Ecologie Tropicale, de L'ombre À La Lumière*, (Paris: Sous la direction de Forget, P.-M., Hossaert-McKey, M., Poncy, O.), pp. 46-47.

COUTERON, P., N. BARBIER, C. PROISY, R. PELISSIER, ET G. VINCENT, 2012. Linking Remote-Sensing Information to Tropical Forest Structure: The Crucial Role of Modelling. *Earthzine*. Available at: <http://www.earthzine.org/2012/04/24/linking-remote-sensing-information-to-tropical-forest-structure-the-crucial-role-of-modelling/> [Consulté juillet 6, 2012].

LEFEVER, R., N. BARBIER, P. COUTERON, V. DEBLAUWE, ET O. LEJEUNE, 2004. Les paysages tigrés et tachetés. *Dossiers Pour la Science* 44: p.68-71.

La Tache. Supplément au numéro spécial : Le monde comme vous ne l'avez jamais vu. *Science et Vie*: 1067 : 31

3.3 THESES

BARBIER, N., 2006. *Auto-organisation et interactions spatiales des végétations semi-arides*. Brussels: PhD, Sciences Agronomiques et Bio Ingénierie, Université Libre de Bruxelles.

BARBIER, N., 2003. *Vegetation patterns in semi-arid areas: Linking remote sensing to field work*. Bruxelles: DEA, Sciences de la Vie, Université Libre de Bruxelles.

BARBIER, N., 2001. *Caractérisation et cartographie des formations végétales et contribution à l'évaluation de l'impact humain dans le cadre de la gestion participative de la Zone Cynégétique de la Pendjari (Nord Bénin)*. Bruxelles: Mémoire d'Ingénieur Agronome. Université Libre de Bruxelles.

3.4 PATENTS AND DEPOSITS

2016

3.5 ACTIVE PARTICIPATION TO INTERNATIONAL CONGRESSES AND SEMINARS

10/2022	<p>Labex CEBA annual meeting</p> <p>Invited oral: Barbier N and project team: Advancement of project Phenobs Cayenne, French Guiana</p>
07/2021	<p>IEEE IGARSS</p> <p>Invited oral + acts: Barbier, N., Ball, J., Clocher, I., Poilvé, H., Verley, P., & Vincent, G. Sensing Tropical Forest Phenology and Productivity from the Field to the Satellite. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 716-719.</p>
05/2019	<p>Terrestrial laser scanning in forest ecology</p> <p>Two posters: - Barbier N., Delaître G., Martin Ducup O., Vincent G. Fusion of UAV-LS and T-LS data to assess tree and stand level leaf and wood properties</p> <p>- Takoudjou Momo, ... Barbier, N. Weighing trees with lasers: What about vertical variations in wood density? Ghent, Belgium</p>
10/2018	<p>Labex CEBA annual meeting</p> <p>Invited Oral: Barbier N, Feret JB, Vincent G. Quantifying leaf phenology in tropical forests to help improve climate - vegetation models: <i>From laser to (nano-)satellites</i> Cayenne, French Guiana</p>
01/2018	<p>Royal Society Meeting : 'Tropical phenology: functional change in ecosystems across space and time'</p> <p>Invited Oral: Barbier N., Vincent G., Momo, S. Towards a robust framework to quantify LAI and radiative transfer variations at tree and landscape levels in the tropics' Buckinghamshire, UK</p>
06/2016	<p>ATBC Annual Meeting. Tropical Ecology and Society.</p> <p>Invited Oral: Barbier N., Ploton P. Libalah M., Droissart V., Texier N., Houdry P., Sonke B., Pelissier R. Couteron P. <i>Regional scale mapping of forest types, biomass and degradation in Cameroon using a groundinventory network and canopy texture on VHR optical imagery.</i> Co-author of two other oral presentations. Montpellier, France</p>
05/2016	<p>Ilèmes journées de la Géomatique: Information spatiale, aide à la décision et développement durable</p> <p>Invited oral: Barbier N, Bastin J-F, Droissart V., Houdry P., Libalah M, Ploton P., Pelissier R., Sonké B, Stevart T, Texier N, Viennois G, Couteron P. <i>Cartographie des types forestiers, de la biomasse et de la dégradation à l'aide de données de télédétection à très haute résolution spatiale.</i> Libreville, Gabon</p>
07/2015	<p>Our Common Future Under Climate Change International Scientific Conference</p> <p>Invited oral: Barbier N. Couteron P. Poncet F. Schlund M. Operational approaches for mapping tropical forest biomass and degradation using optical and radar satellite data. Paris, France</p>

04/2015	XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto Invited oral: Barbier N. <i>Stability and precision of FOTO texture features.</i> Joao Pessoa, Brasil
01/2014	AETFAT XXth Congress Oral: Stévant T., Dauby G., Barbier N., Bidault E., Sonké B., Droissart V., Ploton P., Boupoya A., Lowry. <i>A mega floristic and vegetation survey of a 10 by 20 km block of Gabonese costal forest.</i> Stellenbosch, South Africa
04/2013	SBSR-INPE XVIth Congress Invited oral: Barbier N. <i>Tropical forest characterization based on spatial and temporal patterns in optical remote sensing data.</i> Iguassu, Brasil
04/2013	COMIFAC workshop: Regional scientific workshop on allometric equations in Central Africa. - Oral : Barbier N., Bastin J.F., Ploton P., Viennois G., Droissart V., Sonké B., Stévant T., Dauby G., Pélissier R., Couteron P. <i>Téledétection pour la typologie forestière et l'inversion de biomasse en Afrique centrale.</i> - Oral : P. Ploton, S. Momo, N. Barbier, J. Demenois, L. Zapfack, F.V. Nguetsop, D. Bastin, R. Pélissier. <i>Equations allométriques : Pistes d'amélioration.</i> - Oral: Sonké B., Droissart V., Ploton P., Barbier N., Taedoumg H., Kamdem M.-N., Simo M., Zemagho L., Kamdem N., Kouob B., Lewis S.L. <i>Mesure et suivi de la biomasse épigée dans les forêts d'Afrique tropicale au moyen d'un réseau de parcelles (semi-) permanentes.</i> Yaoundé, Cameroun
04/2013	EGU General Assembly Oral : Deblauwe V., Barbier N., Couteron P. <i>Large scale pattern modulation and local processes in self-organised semi-arid vegetations.</i> Vienna, Austria
10/2012	EcoSummit 2012 - Ecological Sustainability: Restoring the Planet's Ecosystem Services Invited oral: Barbier N., Deblauwe V., Couteron P.: <i>Self-organized vegetation patterns are 'sentinels' at the verge of deserts: Lessons from 50 years of large scale monitoring</i> Columbus, Ohio
01/2012	Pleiades days (CNES, ASTRIUM) Oral: Barbier N. <i>From canopy texture to forest structure through trees and stand models.</i> Toulouse, France
01/2012	Climate change, deforestation and the future of the African rainforest Poster: Barbier N., Viennois G., Droissart V., Ploton P., Sonké B., Couteron P., Pélissier R. <i>Mapping forest types in Central Africa using spatial and temporal signatures of remote sensing data.</i> Oxford, UK
03/2011	BES Meeting: Forest and Global Change. Oral: Barbier N., Couteron, P., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Proisy, C. <i>Linking canopy texture on VHR imagery to forest 3D structure: a modeling framework</i> Cambridge, UK

02/2011	COMIFAC Conference: Monitoring Carbon stocks and fluxes in the Congo Basin. Oral and acts: Barbier N., Couteron, P., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Proisy, C. <i>Canopy Textural Properties from Metric Resolution Imagery : Validation, Sensitivity and Perspectives within REDD.</i> Brazzaville, Rep. of Congo.
10/2009	International workshop for the conception of a IRD collaboration network around rainforest issues (PPR FTH AC), Yaoundé, Cameroon
07/2009	IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS Oral: Bradley A., Gerard F.F., Barbier N., Weedon G., Huntingford C., Anderson L., Zelazowski P., Aragão L.E.O.C. <i>Template phenology for vegetation models.</i> Cape Town, South Africa
08/2008	International Scientific Conference: Amazon in Perspective, Integrated Science for a Sustainable Future. Poster: Barbier N, Couteron P. , Malhi Y. <i>Apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests.</i> Manaus, Brasil
09/2007	British Ecological Society Annual meeting. Invited oral communication, thematic topic: Self-organised Pattern Formation at Ecosystem and Landscape Scales. Invited oral: Couteron P., Barbier N., Deblauwe V. <i>Detection and characterization of periodic vegetation patterns from remotely sensed data: towards a worldwide perspective.</i> Glasgow, UK.
07/2007	IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS Poster: Proisy C., Couteron P., Pélissier R., Barbier N., Engel J. <i>Monitoring canopy grain of tropical forest using FOTO of very high resolution images.</i> Barcelona, Spain.
03/2007	British Ecological Society – Tropical Ecology Group. 1 st PhD/Post-doc meeting. Oral: Barbier N. <i>Spatial interactions and self-organisation in semi-arid vegetations.</i> Leeds, UK.
06/2005	Alpine Summer School XIII "Water-vegetation interactions and biodiversity in changing environments". Oral: Barbier N. <i>Spatial interactions and self-organisation in semi-arid vegetations.</i> Valsavarenche, Italy.
06/2002	46th IAVS Symposium : «Water ressources and vegetation». Oral: Barbier N., Lejeune O., Couteron P. <i>Spotted bush : field test of vegetation patterning mechanism.</i> Naples, Italy.
07/2001	Congress : « Phytosociology and dynamics of montain vegetation ». Oral: Barbier N., Hardy O., Lejoly J. <i>Réflexion méthodologique pour l'étude de la végétation dans des systèmes soudaniens d'Afrique de l'Ouest.</i> Peyresq-Annot, France.

3.6 PARTICIPATION TO SCIENTIFIC SOCIETIES

British Ecological Society, Société Royale de Botanique de Belgique.

3.7 REFEREE MISSIONS FOR INTERNATIONAL JOURNALS AND FUNDING BOARDS

Editor: *Special Issue Biomass Remote Sensing in Forest Landscapes, (Editors: P. Couteron, N. Barbier, M. Herold)*

Associate Editor: *Plant Ecology and Evolution.*

Reviews for Journals: Nature, Nature Geoscience, The American Naturalist, Journal of Biogeography, Ecology Letters, Journal of Theoretical Biology, Theoretical Population Biology, Reviews of Geophysics, Geophysical Research Letters, Environmental Conservation, Chaos, Journal of Arid Environments, Journal of Ecology, Ecological Informatics, Remote Sensing of Environment, Plos One, Revue Française de Photogrammétrie et de télédétection, Sécheresse, Plant Ecology and Evolution, Frontiers of Biogeography, Annals of Forest Science, Philosophical Transactions of the Royal Society B, Geoscience and Remote Sensing Letters, Sensors, Vertigo, Remote Sensing, Scientific Reports, Trees - Structure and Function, Ecosphere, Southern Forests, Journal of Sustainable Forestry.

Reviews for Institutions: National Science Foundation, Wageningen University and Research, German Research Foundation, Agence Nationale de la Recherche, Wildlife Conservation Society, British Petroleum Foundation, Association for the Taxonomic Study of the Flora of Tropical Africa.

3.8 AWARDS

2022	Royal Academy of Belgium, Emile Laurent Price for contribution to the study of African vegetation
2003	Development cooperation prize (Tervuren) for undergraduate thesis
2001	First prize of the Brussels Engineering association for undergraduate thesis
2001	Honor Diploma of the Université Libre de Bruxelles for highest undergraduate marks.

THESIS IN ENGLISH

4 PREVIOUS RESEARCH

4.1 GENERAL FRAMEWORK

The main objective of my research is to understand vegetation dynamics at spatial (landscape, region...) and temporal (season-decade) scales relevant to the management, conservation and mechanistic modeling of these systems under the effect of climatic and anthropogenic forcings. The link between the architecture and functioning of plants and the structure and dynamics of vegetation is central to my research. Understanding how plant structure, function and interactions generate large-scale emergent dynamics may require the use of biophysical models to capture the often non-linear mechanisms at play.

I'm also working on improving remote sensing approaches (mainly active and passive optical sensors), for the potential they offer for upscaling, although sensitivity and error propagation, instrumental effects and relevant indicators need to be carefully considered, which may also involve employing spatially explicit statistical approaches or radiative transfer modeling.

In the following sections, I will summarize my past and current research on contrasting tropical ecosystems, before summarizing the originality of my contribution as a researcher and research director.

4.2 STUDY OF SEMI-ARID SYSTEMS

During my bioengineer's thesis on the characterization of vegetation in northern Benin with Jean Lejoly and Brice Sinsin (Barbier, 2001) followed by mapping missions in the WAP transboundary protected area of Niger, Burkina Faso and Benin with Gérard de Wispelaere, I was struck by the degree of local heterogeneity in the vegetation cover of the Sudano-Sahelian savannas. Bare patches of soil contrasted sharply with areas of dense grass or woody thickets. The interest in linking spatial and functional ecology to build a PhD thesis topic was immediately obvious. Based on the classic concepts of phytosociology, we were looking for the origins of this heterogeneity in edaphic variations: bowé outcrops, termite mounds, microtopography, catenas, variations in soil texture, etc.

The meeting with Pierre Couteron, who had recently completed his thesis on "Relations spatiales entre individus et structure d'ensemble dans des peuplements ligneux soudano-sahéliens au nord-ouest du Burkina-Faso" ("Spatial relationships between individuals and overall structure in Sudano-Sahelian woody stands in northwest Burkina-Faso") (Couteron, 1998) led me to focus my thesis on the study of endogenous vegetation structuring mechanisms. After obtaining aerial photos of the study area (the Parc du W in Niger), we realized that the whole area was dotted with regular spotted and tiger-like structures. These

vegetation structures, found in most warm semi-arid zones, feature striped, labyrinthine or patchy patterns, in which dense vegetation groves contrast with a matrix of bare soil, at spatial scales extending over tens or hundreds of meters. These structures are therefore clearly visible from the air, which explains their discovery in the 1950s during the first aerial photography campaigns. Although this is not their most common name, I will refer to them in the remainder of this document as periodic vegetation patterns (PVPs).

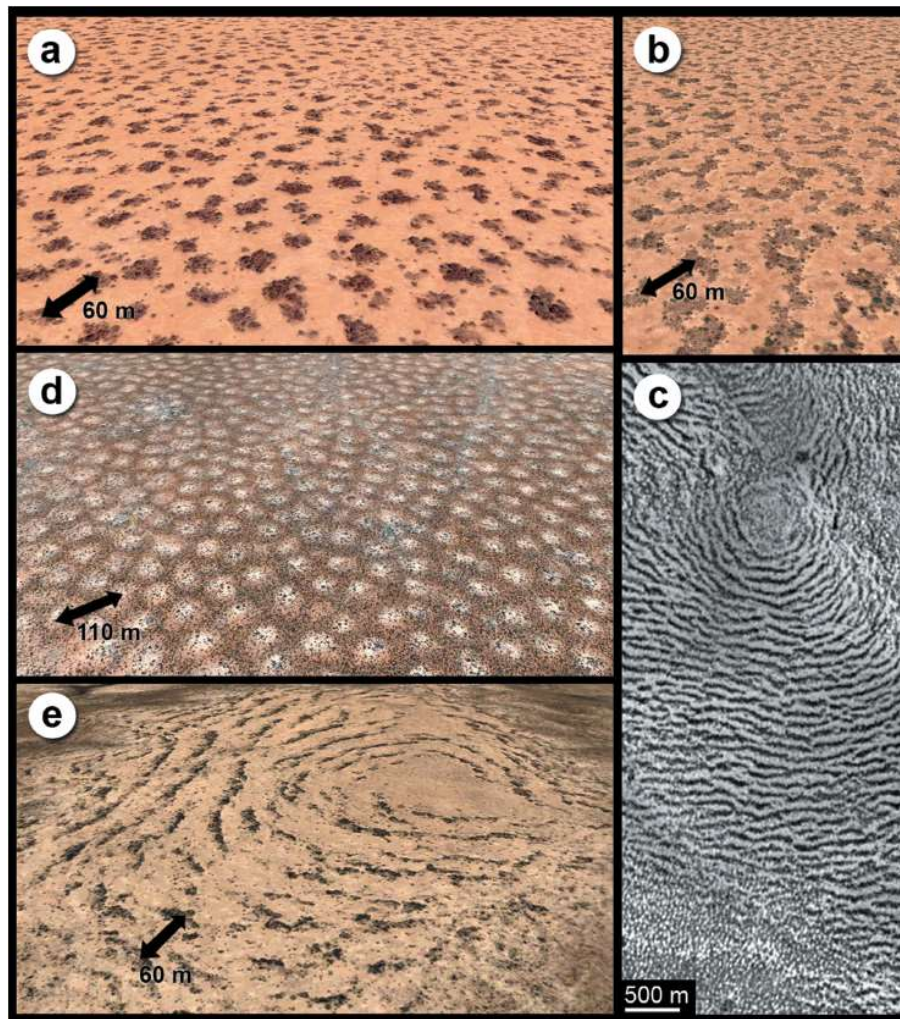


Figure 1. Examples of Periodic Vegetation Patterns (Deblauwe et al., 2008).

Most of the research carried out on PVPs since their discovery had been carried out by two distinct disciplines. On the one hand, field hydrologists (d'Herbès et al., 1997; Tongway et al., 2001) and on the other, mathematicians and physical modellers (Borgogno et al., 2009). In fact, there had been little exchange between these disciplines. Fortunately, René Lefever's team, and in particular Olivier Lejeune - who had just received his doctorate (Lejeune, 1999) was working at ULB on mathematical modelling of the morphogenesis of these semi-arid vegetations. Pierre Couteron had already initiated the collaboration (Couteron and Lejeune, 2001). He had also adapted image analysis tools based on the Fourier transform, which made it possible to extract quantitative indicators of the structures and their dynamics (Couteron,

2002). We had unique access to the field in Niger, thanks to the support and skills of Mahamane Saadou and Ali Mahamane's laboratory on the one hand, and the logistical support of the ECOPAS project (EU) on the other. In the middle of my thesis, I was also lucky enough to be able to co-supervise Vincent Deblauwe, who was starting his thesis at ULB. (Deblauwe, 2010). I thus found myself at the conjunction of an extraordinary field site, a dynamic partnership, an entourage of leading experts in complementary disciplines (field ecology/botany, remote sensing, mathematical modelling) and a stimulating theoretical framework.

To summarize our study of the emergence of PVPs, I have positioned the different approaches used during my doctoral research and that of Vincent Deblauwe, along the two axes of spatial and temporal scales (Figure 2). This graph shows at a glance the interweaving of local-scale studies, which provide information on biological processes, and large-scale, long-term ecosystem dynamics, which can be characterized by remote sensing approaches. The transfer of scale has been made possible by theoretical models.

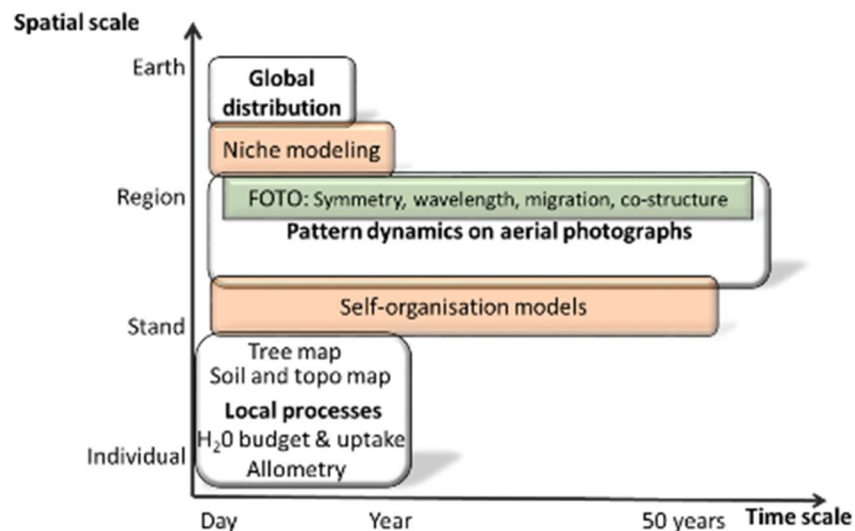


Figure 2. Spatial and temporal scales covered, and contextual approaches used to study periodic vegetation patterns.

4.2.1 MECHANISTIC MODELING

Mathematical models are frequently used to represent the dynamics of dissipative self-organizing spatial structures ¹(Couteron, 2023). The best-known are the Turing reaction-diffusion models, but they are not the only ones. More generally, a system of partial (integro-) differential equations is used to represent the evolution of variables of interest, taking spatial effects into account. A number of models of this type have been published to study the

¹ Dissipative = occurring far from equilibrium in open thermodynamic systems

phenomenon of PVPs (Borgogno et al., 2009; Klausmeier, 1999). In these continuous models, plant biomass is generally approximated by a local density, as is the limiting resource - usually water. These models make it possible to link a wide range of spatially periodic patterns observed in nature within a simple theoretical framework. What's more, they offer an interesting mechanistic explanation, in which patterns emerge from endogenous processes, rather than reflecting pre-existing substrate heterogeneity.

The precise mechanisms involved are still debated and may vary between sites, but there is a general consensus that they involve interactions between plants and occur on a local scale via the soil water balance. Regardless of the mechanism and modeling choices, two ingredients are necessary for the emergence of periodic patterns: (i) the range of activation (e.g. facilitation or diffusion of an activator) must be less than the range of inhibition (competition) and (ii) the mechanisms must induce feedback loops. In the model developed at ULB, water runoff and diffusion are not directly taken into account, unlike other existing models (Couteron and Lejeune, 2001; Lefever et al., 2009). It is assumed that the plant (more precisely, the biomass density at a point) interacts spatially with its surroundings via a kernel whose effect is positive at short range and negative at longer range (Figure 3). These effects are assumed to be induced by epigeous structures (shade, litter, biological activity) below the crown for facilitation, and by tracer roots beyond for competition.

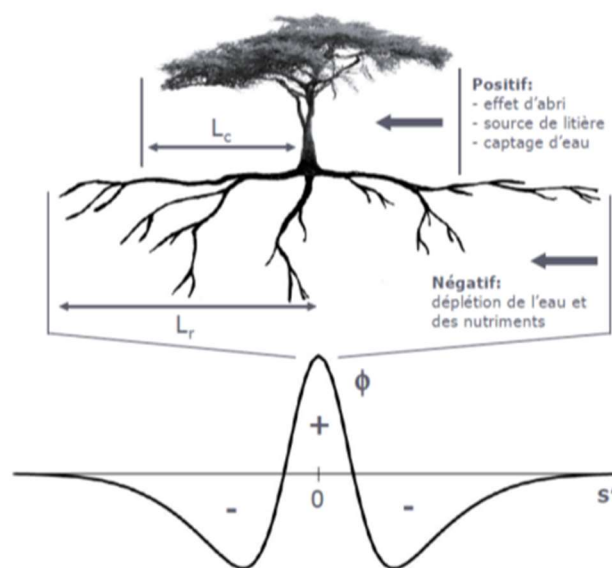


Figure 3. Diagram of interaction kernels in the ULB mean-field model (Lefever et al., 2009)

The emergence of periodic patterns and their characteristics (symmetry, spatial scale, migration of bands up the slope, etc.) are modulated by plant productivity and/or mortality, the variation of which may represent the effect of climatic stress or extraction pressure (grazing, firewood). Some models explicitly represent the effect of stochastic disturbances (fires) or stress induced by an irregular distribution of water supplies (D'Odorico et al., 2006).

In this context, shape geometry can be used as an indicator of the state of the system, and in particular of the risk of imminent transition from one stable state to another (Rietkerk et al., 2004) such as the dreaded collapse of a vegetated state into desert. The existence of hystereses, with hardly reversible transitions between certain states (notably the desert state), is indeed a strong prediction. Within the vegetated state, most models predict for increasing aridity (on flat, homogeneous terrain) a progressive sequence passing through periodic structures with gaps, then labyrinths and finally spots. In the case of an anisotropic environment, such as a slight topographical slope, the various structures are reorganized into bands perpendicular to the slope, moving upstream (Figure 4).

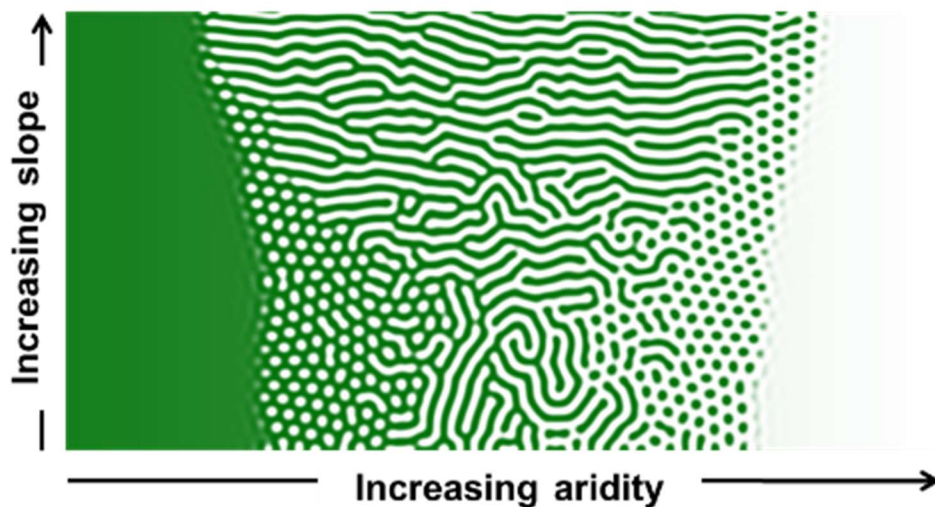


Figure 4. Succession of patterns predicted by the Lefever & Lejeune model for different levels of aridity and slope.

It is obviously essential to be able to make the link between models and reality, both for construction/calibration and for verification of predictions, whether at the level of underlying mechanisms or system dynamics. I was fortunate to be able to participate actively in this effort, and to be associated with modeling articles (D'Odorico et al., 2006; Lefever et al., 2009), papers co-published with modellers (Barbier et al., 2008) or, more generally, to consider all research activities within the theoretical framework offered by self-organization models. The following sections summarize our efforts to test the constitutive hypotheses of this theoretical framework at different scales, via remote sensing and field approaches.

4.2.2 REMOTE SENSING AND SPATIAL ANALYSIS

To compare observed spatial and temporal dynamics with the predictions of self-organization models, we needed an image analysis method that could characterize spatial patterns in terms of wavelength, orientation and anisotropy. The spatially periodic nature of the patterns naturally lent itself to the use of an approach based on the Fourier transform, which aims precisely to characterize structures on the basis of a decomposition into sinusoidal periodic functions. In order to extract structural properties at stand level and compare variations

across the landscape, we opted for a localized sliding window analysis (analogous in two dimensions to the short-time Fourier transform, or Gabor transform).

In an initial diachronic study in SW Niger (Barbier et al., 2006, 2014b) we were interested in the appearance of periodic patterns, without distinguishing structures according to their level of anisotropy. We were able to take advantage of old aerial photographs (dating from 1956, 1976 and 1996) as well as archival Spot panchromatic images covering the protected area of Parc du W and surrounding areas. We were thus able to study the effect of climate change and increasing anthropogenic pressures on the appearance of structures. The signature of the canopy's spatial structuring was characterized via the r-spectrum (azimuthal mean of the 2D periodogram for frequency intervals) of 300 m-square windows. The Fourier Transform Textural Ordination (later called FOTO) method (Couteron, 2002; Couteron et al., 2006) and unsupervised classifications were used to extract most of the information contained in the multi-date r-spectra table (Figure 5, Figure 1).

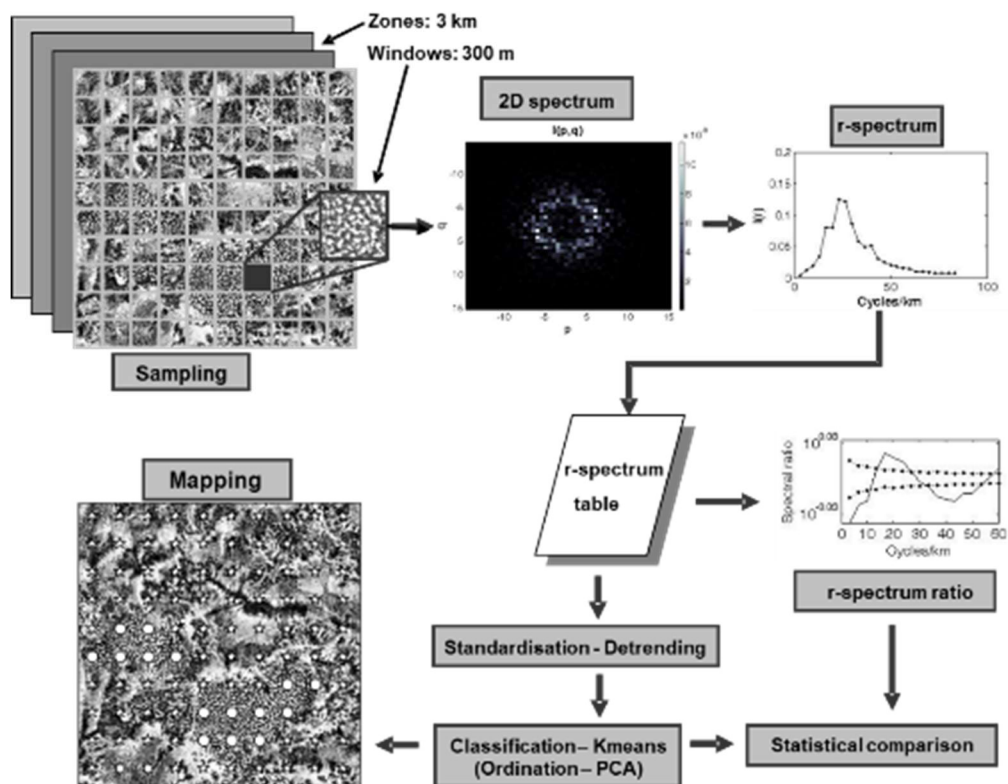


Figure 5. Comparison of r-spectra to identify the appearance of periodic structures in SW Niger

One striking result was the doubling of the areas covered by spatially periodic structures, in line with the rainfall of previous years, and more markedly in unprotected areas outside the national park (Figure 6). Because of the phenomenon's almost continuous (upward) trend, it was not possible to identify an optimal duration for the temporal integration of rainfall data to explain the abundance of mottled patterns in the landscape. Indeed, we can see that the

R^2 of the model relating the proportion of gap patterns to average rainfall only increases with the duration of integration.

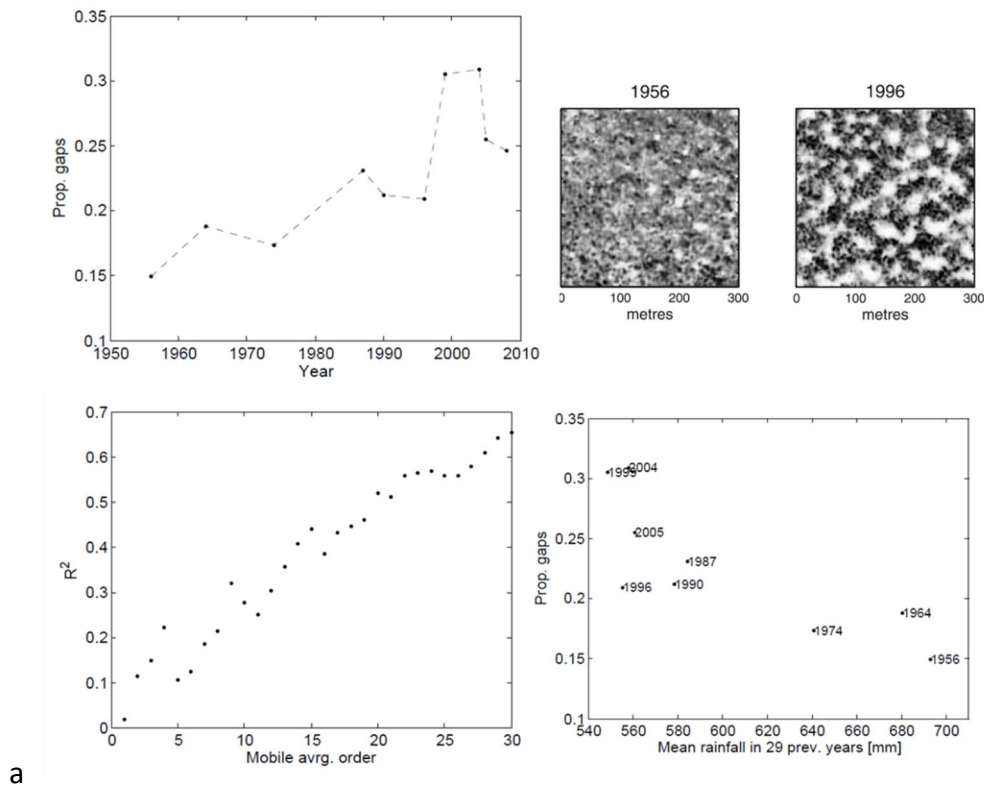


Figure 6. Changes in areas of spotted vegetation over time, in relation to rainfall in previous years.

In another diachronic study (Barbier et al., 2014b; Deblauwe et al., 2011) conducted in South Sudan with Vincent Deblauwe, we went a step further by distinguishing different levels of pattern anisotropy. In addition to the r -spectrum, we analyzed the angular spectrum (i.e. the average of the 2D periodogram per angular sector), in order to distinguish patterns with parallel bands from other, more isotropic structures (Figure 7). To distinguish between the different isotropic geometries (gaps, spots and labyrinths), we simply used the skewness of the grayscale histogram.

We were thus able to show both in space (Figure 8) and in time (Figure 9) that the modulation of structures by aridity followed the expected succession (holes-labyrinths-spots, cf. Figure 4). The spots were, incidentally, observed for the first time in nature. Parallel strip structures (tiger bushes) appear on steeper slopes ($>0.25\%$) (Figure 10, Figure 11), but the critical slope threshold depends on aridity (Figure 11). Above and below certain levels of aridity, isotropic structures can be maintained even on slopes of 1%. The wavelength of the structures increases overall with aridity, and to a lesser extent with slope.

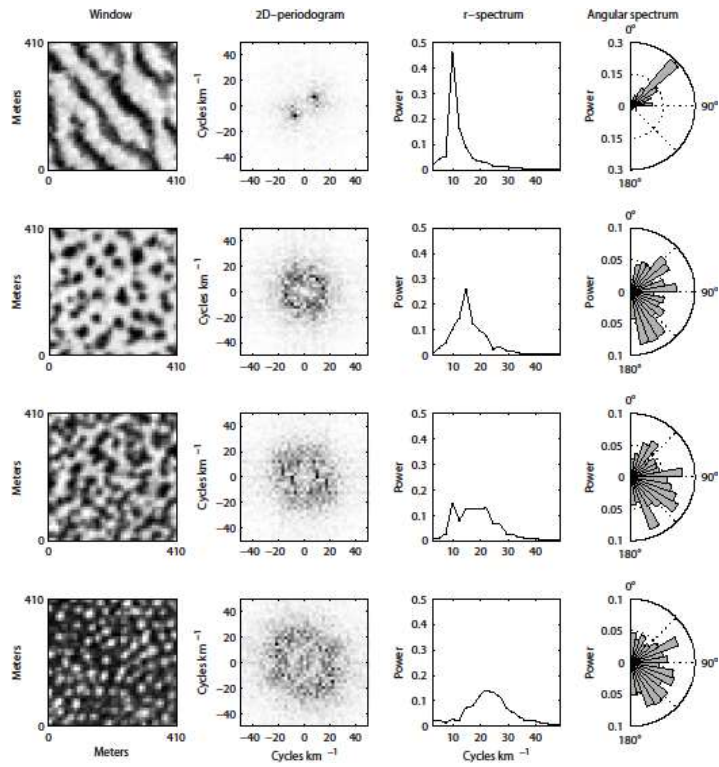


Figure 7. Signatures of the main periodic patterns identified in southern Sudan

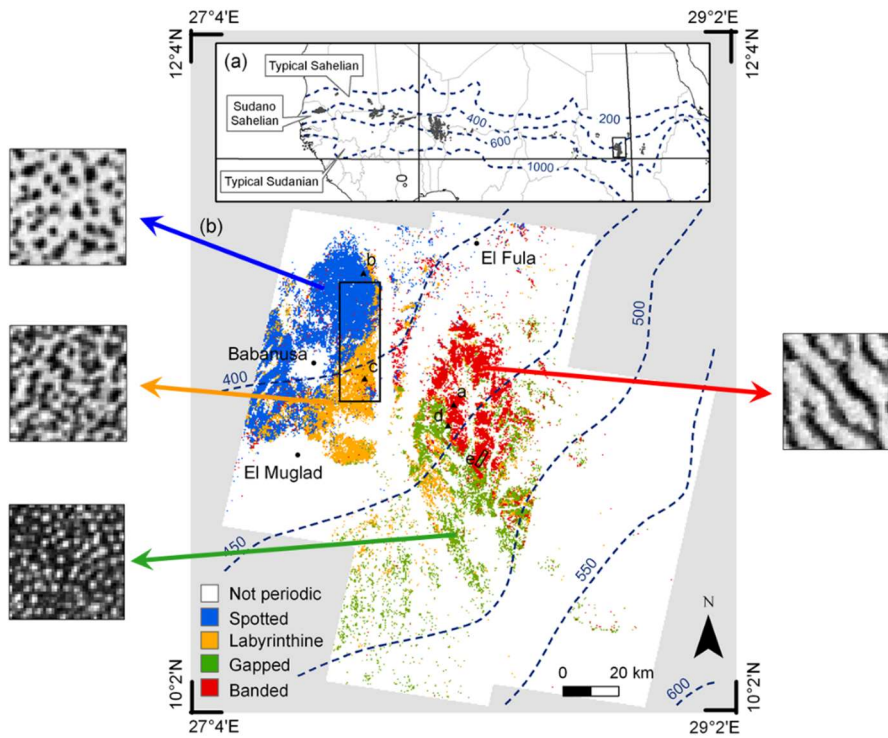


Figure 8. Synchronous modulation of periodic patterns along a gradient of aridity and slope.

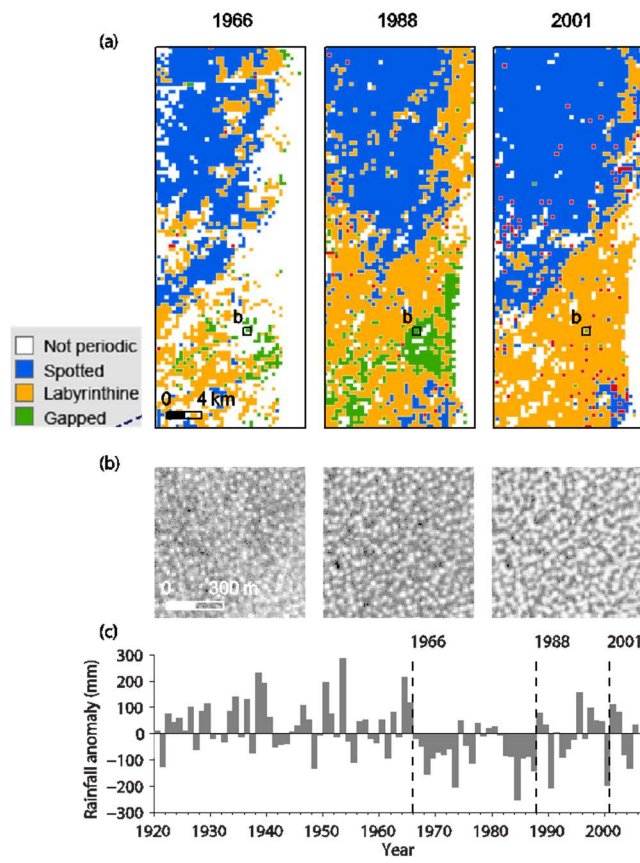


Figure 9. Diachronic modulation of periodic patterns in southern Sudan.

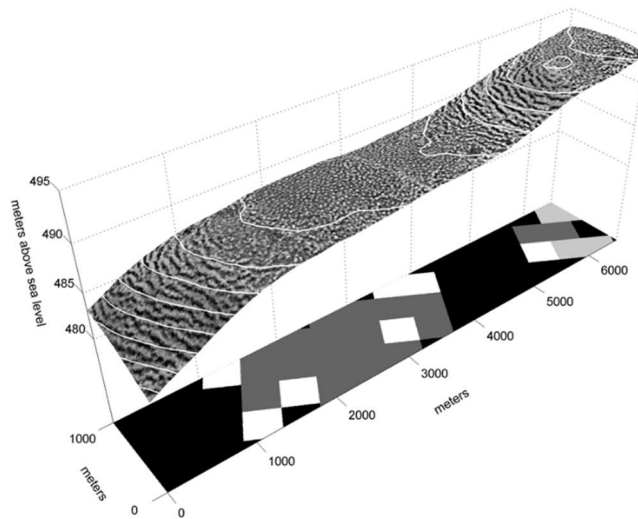


Figure 10. Modulation of anisotropy (parallel bands) by slope.

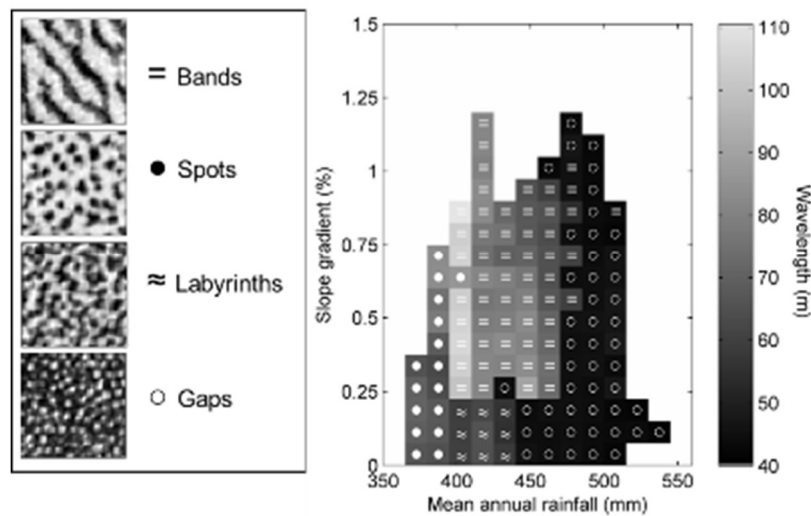


Figure 11. Summary of the modulation of periodic structures in southern Sudan by aridity and slope. The types of symmetry and the wavelength of the periodic structures are shown.

We were unable to demonstrate the presence of hysteresis, and in a few cases even observed the reappearance of spots in abandoned fields. Although this point requires further study, we can already conjecture that self-organization models, which focus on vegetation/resource interactions, fail to take into account the full complexity of the system. Improvements in the soil's structural properties and organic matter content may have a certain memory, and be maintained for some time after clearing. Biological activity, particularly termite activity, can also lead to variations in soil textural classes that can persist indefinitely. There are, moreover, spot and gap patterns entirely induced by the presence of nests. So it's not always easy to distinguish a priori between endogenous vegetation structures and those induced by social insects. I thus spent several weeks in Zambia in 2007 visiting dozens of sites with potentially interesting periodic patterns, all of which were ultimately directly attributable to the effect of termite nests. To formally test our *a priori assumption* that the gap structures of SW Niger were indeed endogenous to the vegetation, I supervised a Niger doctoral student, Abdoulaye Diouf, with whom we mapped (Figure 12) topography and ligneous vegetation on a hectare of spotted bush (Diouf et al., 2010). I then used cross-spectral analysis to study the co-structure between signals. The analysis identifies both correlation and phase shift between structures, taking into account the spatial scale (Nicolas Barbier et al., 2010). We were thus able to demonstrate an absence of correlation between vegetation pattern and topography (including topographic moisture indices), confirming the endogenous nature of the emerging periodic structure at this site. The limits of what is humanly feasible with a theodolite in Niger's extreme temperature conditions explain the small size of the area studied. With today's resources (drones, LiDAR, etc.), it would be possible to go much further in this type of study.

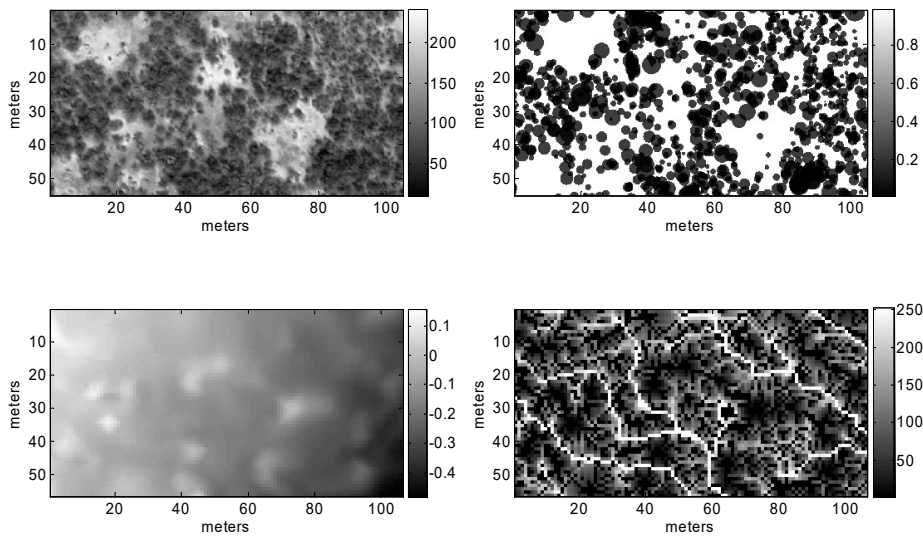


Figure 12. Vegetation and topography maps of a spotted vegetation of the W park in SW Niger. Top: gray levels from ULM photography, crown map measured with theodolite. Bottom: relative soil height and topographic moisture index.

Another interesting phenomenon predicted by self-organization models concerns the upstream migration of bands. Here, with Vincent Deblauwe, we have studied the temporal dynamics of tiger bush at sites on three continents (Deblauwe et al., 2012). Again, we used cross-spectral analysis, in this case between images of different dates, to detect the migration speed (= phase shift) of the bands. For half (3) of the sites studied, band migration is clearly observable, with speeds of up to 1 m per year! The speed of migration is directly proportional to the scale of the pattern (wavelength) (Figure 13), as predicted by certain self-organization models (Sherratt and Lord, 2007). A sequence of aerial photographs of the Chihuahua desert shows, however, that migration is not a continuous process, but intermittent in response to fluctuating weather patterns (Figure 14). The rate at which bands expand upstream and contract downstream is better predicted by the variance of annual precipitation than by its mean level. However, band migration cannot be considered systematic, as in our observations of three other banded systems, migration was undetectable at the resolution of the images available (e.g. Broken Hill, Figure 13). In each of the six sites studied, the modal value of the band orientation axis was verified as being approximately orthogonal to the steepest slope. On some sites, however, Vincent Deblauwe was able to identify a systematic deviation that appeared to be induced by the direction of prevailing winds.

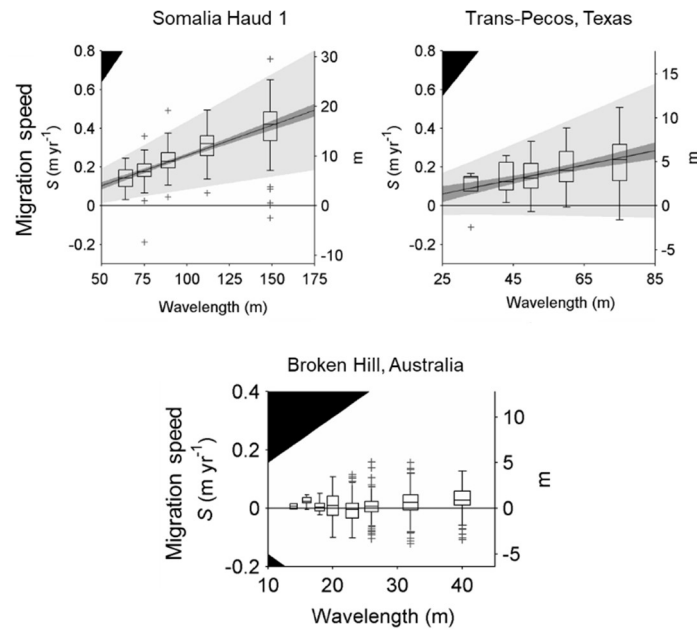


Figure 13. Dependence between band migration speed and wavelength for different sites.

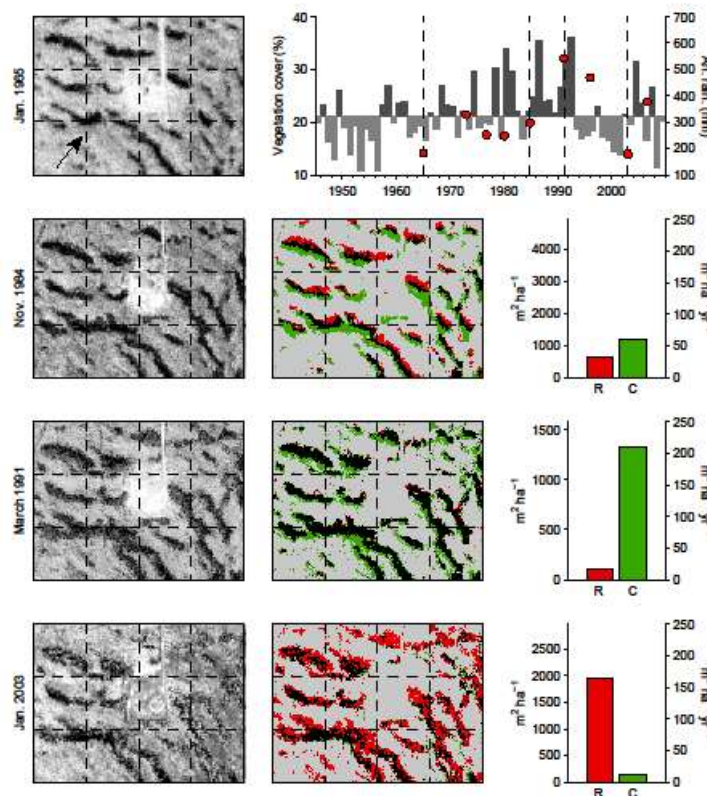


Figure 14. Diachronic dynamics in a strip system in Texas. Red: areas in decline, green: newly colonized areas.

A final major piece of work carried out with Vincent Deblauwe was to produce a potential distribution model for PVPs in hot semi-arid regions, based on the potential distribution model Maxent (Deblauwe et al., 2008). This remarkable work not only enabled us to discover new localities of occurrence, but also to identify the main environmental drivers leading to the

emergence of this type of structure. The moisture index, given by the ratio of mean annual precipitation to mean annual potential evapotranspiration, was the predictor accounting for the largest independent share of the variance explained by the potential distribution model.

As we can see, the detailed study of the spatio-temporal dynamics of self-organizing structures is rich in information, both on determinants and on possible mechanisms. However, it must necessarily be coupled with a theoretical modeling framework, on the one hand, and with the - necessarily more local - study of interaction mechanisms (4.2.3)

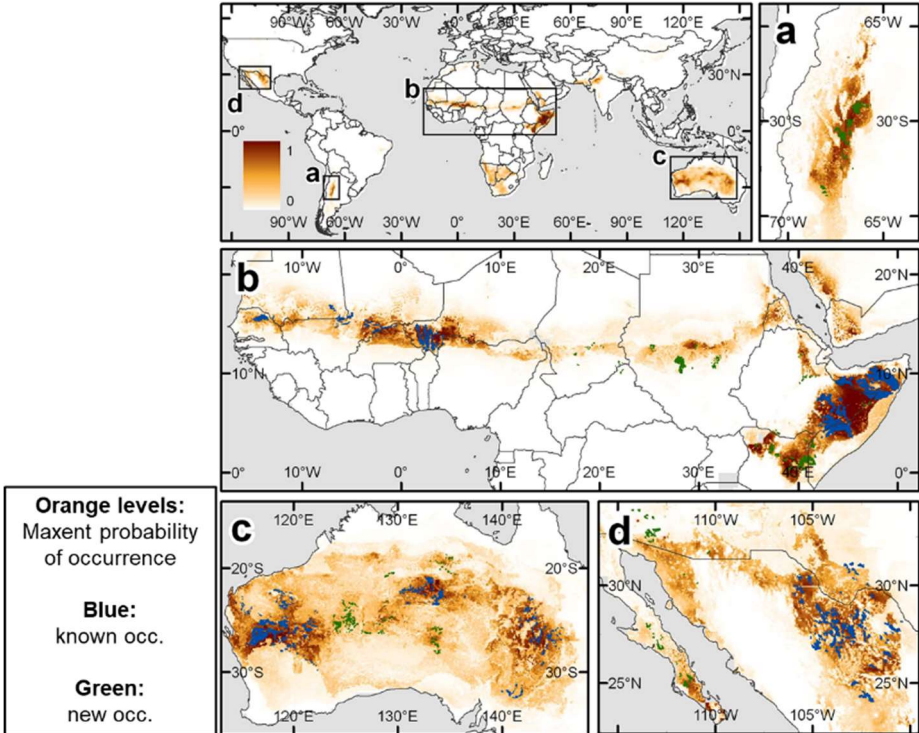


Figure 15. Potential and observed global distribution of periodic patterns in warm semi-arid vegetation.

4.2.3 CROWN/ROOT ALLOMETRY AND PLANT INTERACTIONS

To understand the interaction mechanisms causing the emergence of spatially periodic self-organized structures in semi-arid vegetation (Figure 16), we sought to characterize the spatial interactions between plants, as mediated by their below- and above-ground structures. One possible mechanism explaining the patterns involves local facilitation and longer-distance competition, resulting in a kernel of interaction around each tree (Figure 3). This work began with direct observations of tree morphology at a spotted vegetation site in the W Park in SW Niger (Figure 17). With Pierre Couteron, we patiently excavated and mapped the root systems of several shrubs of the dominant species (*Combretum micranthum*) (Figure 18). The data obtained enabled us to calibrate allometric models linking the lateral extensions of the crowns to those of the roots. We were thus able to observe *in vivo* extension ratios compatible with a kernel that induces the emergence of similar patterns (Barbier, 2006; Barbier et al., 2014a, 2008). However, our observations were limited (due to the technical constraints of excavation with an air spade) to roots with a cross-section greater than 1 mm, and therefore neglected any mycorrhizal interactions.



Figure 16. Study site: gap patterns in the W National Park in SW Niger



Figure 17. Root excavation with an air spade, for some *Combretum micranthum* individuals from a gap pattern vegetation in SW Niger.

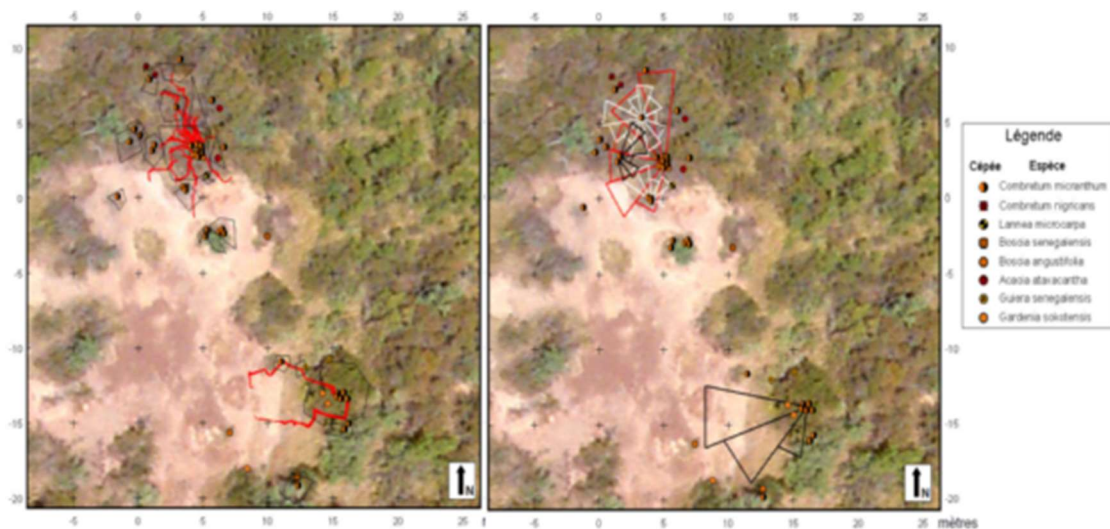


Figure 18. Mapping of main roots and interaction ranges by angular sector for a few *Combretum micranthum* individuals from a gap pattern vegetation in SW Niger.

To go beyond plant morphology and unequivocally establish the functional importance of spatial plant interactions, two questions had to be addressed: (i) do the dynamics of the main limiting resource (soil water) reflect the putative effects of plant kernels, (ii) do roots actually acquire water over large areas, in different vegetation contexts (open/dense).

To answer the first question, the spatial and temporal dynamics of soil water balance in the shallow root zone were monitored over an entire rainy season using a network of soil moisture sensors (gypsum blocks). The observed soil water balance dynamics were clearly compatible with an evaporation attenuation mechanism under tree canopies (Figure 20). However, I was

unable to satisfactorily adjust the range of kernels based on simplified modelling of tree position and dimensions. Another mechanism often advocated, involving differential infiltration and runoff of water (Borgogno et al., 2009) can be rejected on our study site, since we can clearly see that recharge after the main rainfall events of the year is homogeneous in the root zone.

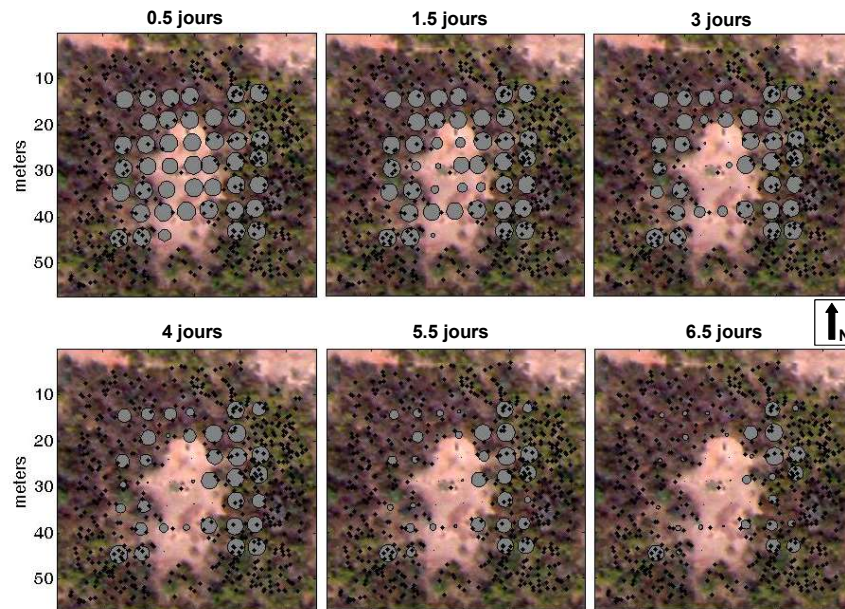


Figure 19. Spatio-temporal dynamics of soil moisture after rain (40 mm), measured with gypsum blocks buried at 20 cm in a gap pattern vegetation in SW Niger.

The second question was addressed using deuterium labelling. I initiated a collaboration with Thierry Bariac at the Bioemco laboratory (Biogeochemistry and Ecology of Continental Environments). I was able to raise funds to bring a thousand pillboxes and three liters of heavy water to Niger. This was used to irrigate the center of a bare area and a dense thicket at the start of the rainy season. Isotopic labeling was then monitored throughout the season, both in the soil and in the xylem of the plants. I then patiently distilled the samples (for weeks on) in the laboratory at Grignon. The initial results were very encouraging (Barbier, 2006) and showed that the tracer had contaminated shrubs up to a distance of 15 m at both sites, before diffusing into the soil matrix (Figure 19). This is therefore a major result, effectively confirming the very significant extent of lateral competition between woody plants in this ecosystem. However, mass spectrometry proved problematic (damage to the spectrometer's reactor), due to too high a level of isotopic labelling in some samples, and the analyses were not completed, depriving me of a key publication from my doctoral thesis.

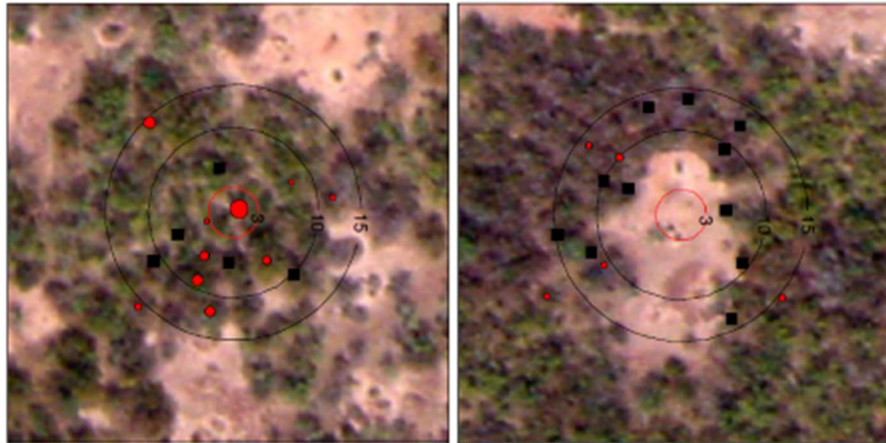


Figure 20. Significant deuterium labeling of woody plants after 1 day. Concentric circles represent marker diffusion in the soil. Red circles indicate a mean significantly higher than the control (t_0). Symbols represent the level of contamination of woody plants: solid squares represent woody plants whose xylemic deuterium level is not significantly higher than the control (t_0); red circles represent significantly marked woody plants. The diameter of the circles is proportional to $\log \delta D$.

For the sake of completeness, I also took part in an experiment in Scotland aimed at testing an electrical impedance approach to measuring root exchange surfaces by angular sectors around Scots pines (Butler et al., 2010). I concluded, however, that application to the question of tiger bush would not be obvious, not least because the spatial resolution was too low.

4.2.4 INCURSIONS INTO PYROPHYLOUS SAVANNAS AND THE QUESTION OF FIRES

During Abdoulaye Diouf's thesis, which I co-directed (Diouf, 2012) we carried out in-depth work on fire regimes in the W Park in Niger, using a time series of MODIS images. A first important observation is that fires almost never penetrate vegetation with periodic structures. Due to the structure and heterogeneity of the grass stratum, these vegetations are 'impervious' to fire. In pyrophilous savannas, we have analyzed the causal links between woody cover structure, soil physico-chemical composition and fire regime, using structural equations (path analysis) (Diouf et al., 2012).

Le Bienfaiteur Sagang's thesis (under my co-direction, Nachtigal project), also enabled us to study the link between fire regimes and the dynamics of forest progression on the savanna (Sagang et al., 2022; Sagang Takougoum, 2022). Based on Landsat archives and algorithms developed in Google Earth Engine, we have been able to measure in relative detail the dynamics and tipping points in fire frequency that may or may not control wood encroachment. In addition to providing management recommendations to a protected area and a dam-building project in its efforts to offset impacts, this study provided input for mathematical modelling of forest-savanna dynamics (theses by Valaire Yatata and Alexis Tchunte, supervised by Pierre Coutron). More recently, through Imma Tcheferi's Silat Master's thesis, we have been able to improve fire scar detection algorithms, which are now

more spatially resolved thanks to the use of Sentinel 2 images, and more robust to radiometric variations between dates.

I'll come back later (cf.4.3.1.2), on the subject of forest fires, to the collaboration with Luis Aragão (Aragao et al., 2008). I also had the opportunity to supervise an Ivorian PhD student (Serge Yedmel) during a study of the post-fire forest dynamics of the Téné site, a unique site monitored since 1978 and partially burnt in 1983 (Yedmel et al., 2010). We were able to show that the silvicultural treatments implemented to promote species of commercial interest may have increased susceptibility to fire, with long-term effects on stand structure and floristic composition.

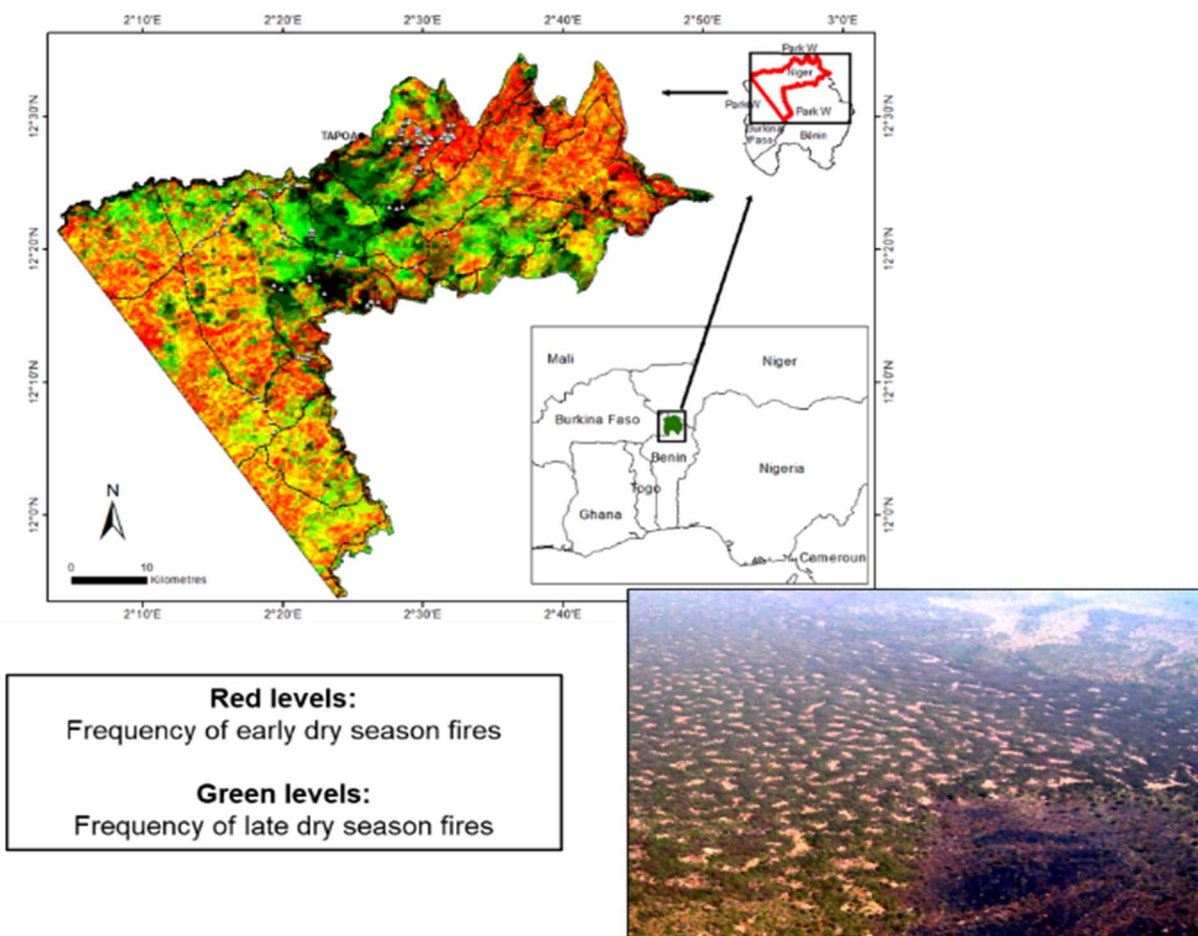


Figure 21. Fire regime mapping with MODIS data over 7 years. Micro-light picture showing the cessation of fire scarring at the edge of my study site (spotted vegetation).

4.3 STUDY OF TROPICAL FORESTS

At the end of my thesis, I had the ambition to turn to a more complicated system, tropical forests, where patterns, vegetation dynamics and processes are more difficult to characterize due to the size and diversity of the plants that make them up, but also to specific technical problems in imaging equatorial zones. Despite the long-standing suggestion of regular spatial patterns emerging in the composition or structure of these forests (Aubréville, 1938) the truth is that these structures have remained elusive. Similarly, temporal variations in the form of seasonal phenological signatures have been reported, including in evergreen forests, showing unexpected peaks of greening during the dry season. One proposed ecological interpretation was that these forests might be light-limited, rather than water-limited, and that the dry season is generally brighter (Huete et al., 2006; Saleska et al., 2003; Wright and Vanschaik, 1994). Initially, therefore, I took advantage of my experience with the Fourier transform to analyze spatial and temporal signals in dense forest, in an attempt to infer patterns that might inform us about the ecological processes at work. However, the very interpretation of the significance of the electromagnetic signal reflected by the forest, and the impact of acquisition conditions, required a constant back-and-forth between detailed field measurements and remote sensing measurements, including through physical models of radiative transfer. To enable detailed measurements on a relevant scale, we increasingly needed to make use of UAVs and 3D imagery (LiDAR and stereophotogrammetry).



Figure 22. False color combination of a GeoEye satellite image of Cameroon

4.3.1 ADAPTING THE SPECTRAL APPROACH TO DENSE FORESTS

4.3.1.1 TEXTURAL ANALYSIS

Pierre Couteron, Raphaël Pélissier and Christophe Proisy had tested a textural ordination approach in French Guiana to predict forest structure from panchromatic aerial photographs or very high spatial resolution (VHR) satellite images (Couteron et al., 2005; Proisy et al., 2007). The Figure 23 illustrates the principle of the approach, which is based solely on r-spectra obtained within windows of around 1ha (cf. 4.2.2). The method was later named FOTO (Fourier Transform Textural Ordination).

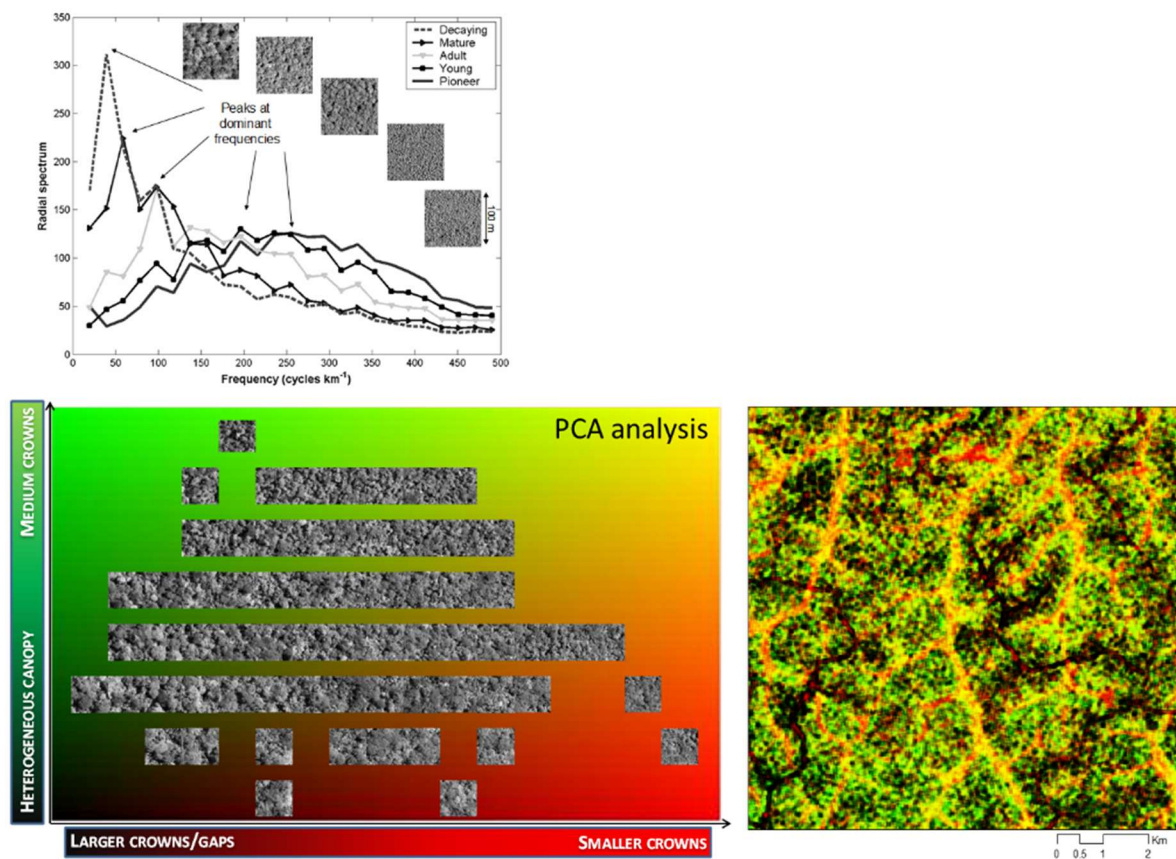


Figure 23. Illustration of the principle of textural ordination in dense forest. The r-spectra of each 100 m window represent the crown size distribution. Ordination enables us to identify the main axes of variation, which can be used for mapping (right) or inversion of structure or forest typology variables. We can see that textural variations follow topography, with fine textures in the lowlands (yellow/red), and degraded/tracked areas at the top of ridges (black).

The FOTO approach seemed promising, in that it was able to predict very high biomass levels without apparent saturation, in contrast to the approaches based on multispectral and radar information used at the time. Several studies on sites in India, notably, have confirmed this fact (Ploton et al., 2013, 2012; Proisy et al., 2012). The challenge was then to attempt an application on a larger scale. During a post-doctoral stay in Oxford, I analyzed a sample of 200 Quickbird VHR optical images available in true-color composition over the Amazon via the Google Earth virtual globe (N. Barbier et al., 2010). As I had no field data to compare with

these images, I used simplified simulations based on artificial stands and the DART radiative transfer model to interpret texture gradients in structural terms (average tree size and canopy heterogeneity). In this study, however, it appeared that the textural signal was partially impacted by the acquisition geometry (sun-scene-sensor angles), although the effect seemed statistically controllable.

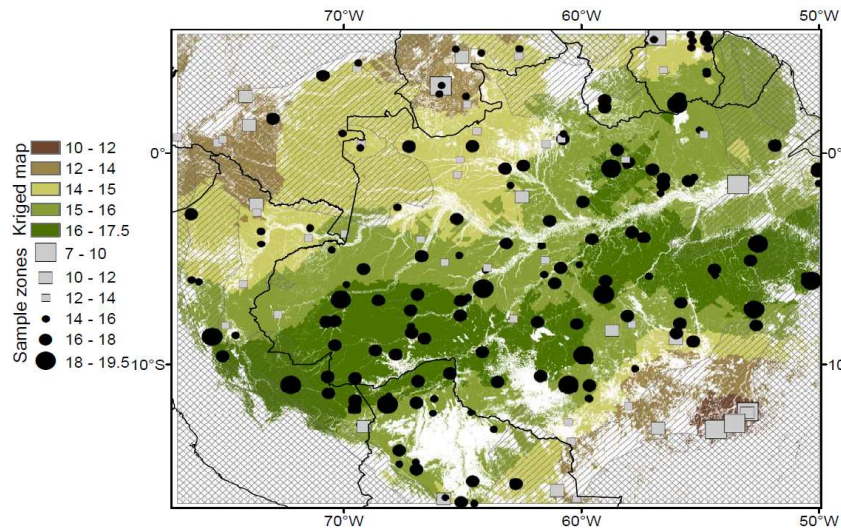


Figure 24. Interpolation to the Amazon basin of average crown sizes inferred from textural properties of Quickbird VHR images obtained in Google Earth.

Having obtained a Marie-Curie grant to pursue this research at AMAP with Pierre C. and Raphaël P., and taking advantage of a collaboration with the FRM consultancy, which had commercial forest inventories on numerous concessions in Central Africa, I had to attempt calibration with real field data. We therefore purchased all available VHR archive images of the inventoried areas, and I naively attempted to cross-reference them with the thousands of plots available. The result was more than disappointing... There was absolutely no signal. First of all, we blamed the precision of the plot location, which was clearly not good enough. The data were collected along compass-based transects, with coordinates taken with entry-level GPS devices every 3 or 4 kilometers.

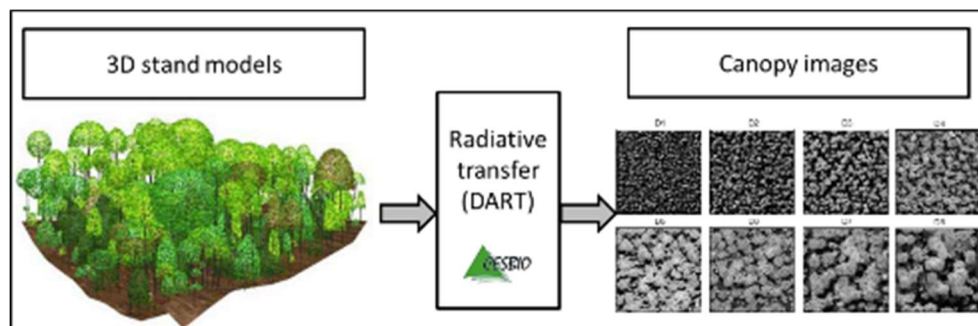
We then embarked on a long quest (which still occupies us today²), that of setting up a network of plots ourselves (4.3.3.3), better localized (see our contribution to Chap. 3 in Duncanson et al., 2021) and stratified along textural gradients.

In the meantime, I had been recruited by IRD as a *signal physicist and/or modeler* (3D structure of tropical rainforests, carbon stock assessment) in the CGRA1 (now CSS5) commission. I began to test the relationship between texture and structure on this new dataset. It soon

² <https://central-african-plot-network.netlify.app>

became apparent that we had also underestimated the instrumental problems (sensor effect and acquisition geometry). Unfortunately, having acquired images here and there, and having (painfully) sprinkled these individual images with a few plots each (three or four at most, i.e. the maximum humanly feasible in a fortnight's forest mission), we had no control over the interaction between forest structure gradients and acquisition parameters.

I therefore set out to study directional effects on the texture of simulated images. The simplest approach was to use canopy surface models derived from airborne LiDAR ³ data available in French Guiana. Shading could be simulated crudely with a hillshade-type model (Barbier et al., 2011b). In particular, this study enabled me to create the concept of the bidirectional texture function (BTF), analogous to the BRDF for reflectance, well known to remote sensors. I then employed a more elaborate approach, simulating forests in 3D from parameters measured in the field (Barbier et al., 2011a) to integrate them into the DART radiative transfer model (Barbier and Coueron, 2015). In parallel, I obtained Ikonos archive images repeated over the same forest area to analyze BTF on real images.



These studies have shown us that, in the end, directional effects on texture can be of the same order of magnitude as the textural gradients induced by the variability of the forests studied. It is therefore essential to take them into account. The problem is that the shape of the BTF depends on forest structure (Figure 25). However, angular ranges far from the hotspot configuration (= sun behind the sensor) are less affected. It is also possible to obtain linear r-spectral correction coefficients directly on areas of overlap between images, where these exist.

³ LiDAR = Light Detection and Ranging: 3D imaging method (active remote sensing) based on scanning the scene with laser pulses.

Bidirectional variation
($D_{max} = 70$ cm, $\theta_s = 20^\circ$)

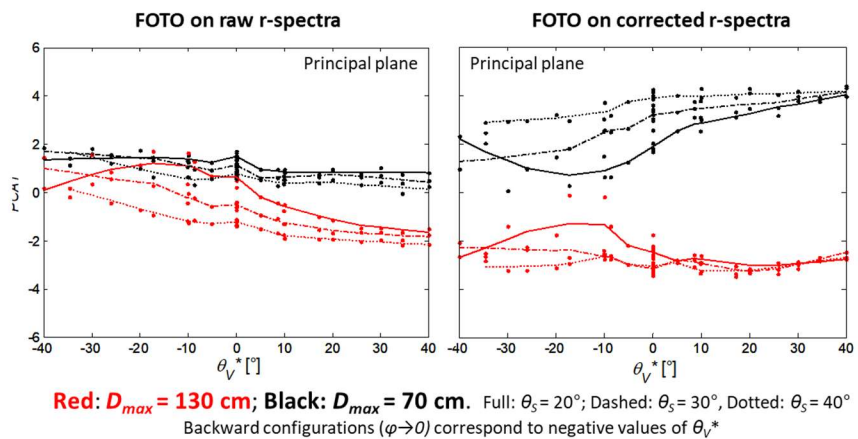
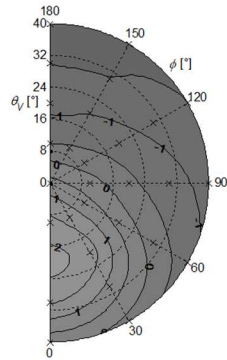


Figure 25. BTF (= bidirectional variation of r-spectra PCA axis 1) of DART-simulated images of forests with contrasting textures (D_{max} =max stem diameter). In configurations far from the hotspot (sun behind the sensor), the textural signal is relatively unaffected by angular variations. Standardization by class of acquisition geometry increases the signal-to-noise ratio. θ_s = zenithal angle of the sun, ϑ_v = zenithal angle of the sensor, ϕ = azimuthal angle sun-sensor.

Thanks to these correction/intercalibration methods, I was able to prove the concept of a diachronic method for monitoring canopy texture change (Barbier and Coutron, 2015). These textural changes make it possible to detect fairly subtle modifications, such as the appearance of felling gaps, the opening of tracks, or even tree growth. Initial tests with commercial felling data from Cameroon (Société Alpicam) and Congo (Société CIB) have shown that it is possible to estimate volumes felled per 25 ha inventory cell ($R^2=0.44$, RMSE: 16%) (Barbier et al., 2016). At last, therefore, we had a tool that could potentially enable the hitherto extremely difficult monitoring and quantification of forest degradation. However, radar-based methods that are less sensitive to cloud cover have meanwhile been developed, enabling near-real-time monitoring with free data, where we could at best hope for annual detection of changes (Aquino et al., 2022; Mercier et al., in prep; Reiche et al., 2021).

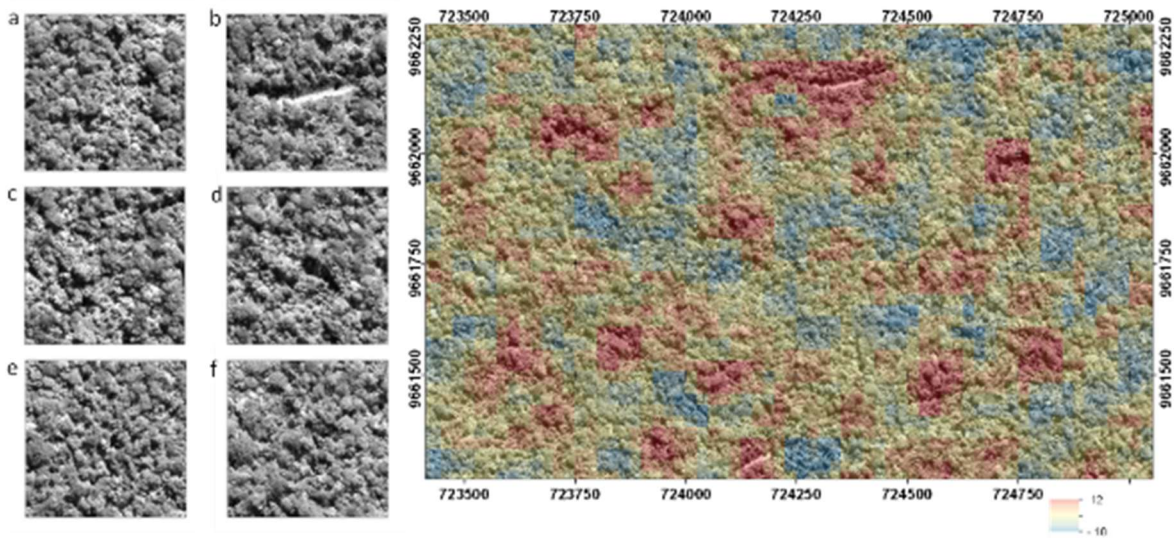


Figure 26. Textural change mapping (PCA axis 1 on r-spectra). In red, areas that have undergone textural magnification (gap, road, crown growth, see examples on left).

In a collaboration with Jean-François Bastin, then a PhD student, we were also able to combine images from different sensors, in contrasting geometric configurations, and obtain highly consistent biomass predictions (Bastin et al., 2015). However, we had to overcome another pitfall: texture-structure relationships varied significantly between forest types (e.g. monodominant forests or Marantaceae forest). During Pierre Ploton's PhD thesis, we continued to refine the search for a biomass inversion model that could be generalized to all tropical forests, based on complementary textural indices (Ploton, 2017; Ploton et al., 2017).

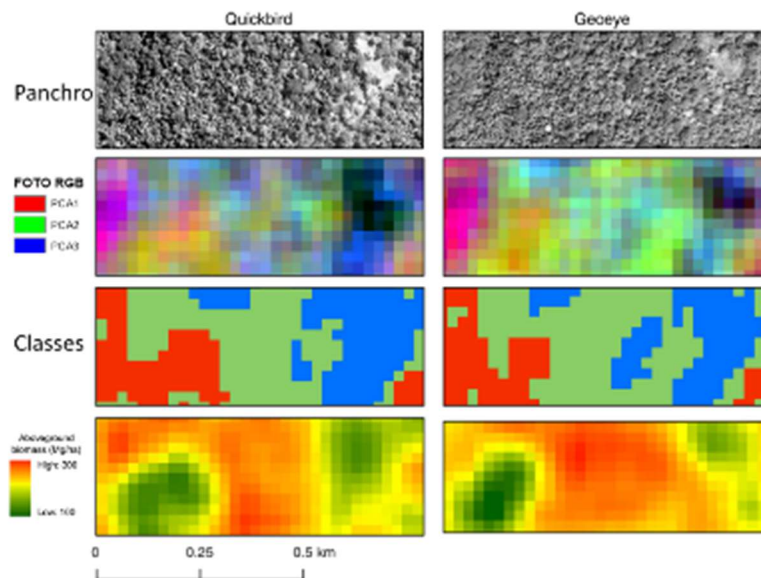


Figure 27. Image intercalibration and biomass inversion using the FOTO method, Bandundu, DRC

Textural intercalibration has enabled us to generate texture mosaics over large areas (several dozen SPOT 6 and 7 images), as tested in Cameroon and Gabon (Figure 28) (Barbier et al.,

2016; Viennois et al., 2017). The textural signal from these images unfortunately proved insufficient to invert biomass, despite the relatively dense network of calibration plots. Nevertheless, these mosaics enable relatively good discrimination of forest types, even if we have since preferred the use of Sentinel 2 images for this kind of exercise. Their free availability, temporal frequency and spectral richness more than compensate for the relatively modest gain in spatial resolution offered by SPOT 6 and 7 images.

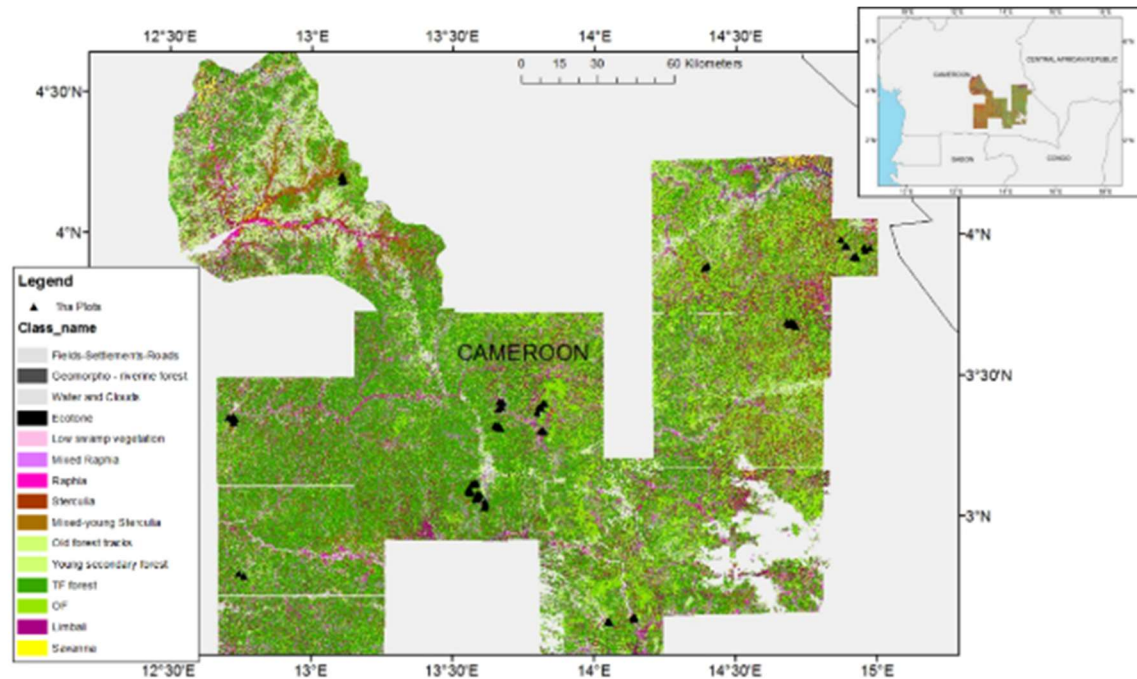


Figure 28. Large-scale vegetation type mapping based on textural axis intercalibration of Spot6 and 7 images in southern Cameroon.

This work benefited in particular from the funding of a European innovation support project (Climate KIC *Forest*), led by Airbus DS, in which I was heavily involved. In addition to data collection (around fifty 1ha plots) and VHR image analysis, I was also able to collaborate on the development of marketable cartographic products (typology, carbon, degradation) and market research. With this in mind, we registered the FOTO method codes with the Agence de Protection de Programmes. However, the conclusion of the project was that the price of carbon on the voluntary market at the time did not allow us to make qualitative, profitable products. This project also resulted in an article (Joetzjer et al., 2017) carried by the LSCE lab (project partner) in which the stand height estimated by FOTO was to be used as the basis for a high-resolution inversion of the different carbon pools by the mechanistic model (DGVM) Orchidée .

4.3.1.2 TIME SIGNAL AND PHENOLOGY

Spectral and cross-spectral analysis are, of course, well-suited to the analysis of temporal signals, particularly seasonal ones. During my time at Oxford, I had the opportunity to apply them to several themes. The first involved the analysis of correlations between cycles of

deforestation, forest fires and rainfall in the Amazon. The resulting article has been widely cited and referenced (Aragao et al., 2008). A second landmark collaboration involved the study of the determinants of the seasonal signal of apparent greening of Amazonian forests observed using MODIS optical data. In this study, we went quite far in the statistical processing to detect significant cross-correlations (in a context of 'red noise'). We found that the EVI vegetation index was almost in phase with downward radiation over the whole forest, whereas the phase shifts with rainfall were much more spatially variable. These results refined/confirmed a long-debated observation (Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007; Saleska et al., 2003) which will be discussed in greater detail in my research project (5). Indeed, the apparent greening of forests on dry-season satellite images could be more prosaically caused by imperfect atmospheric or directional corrections (Morton et al., 2014).

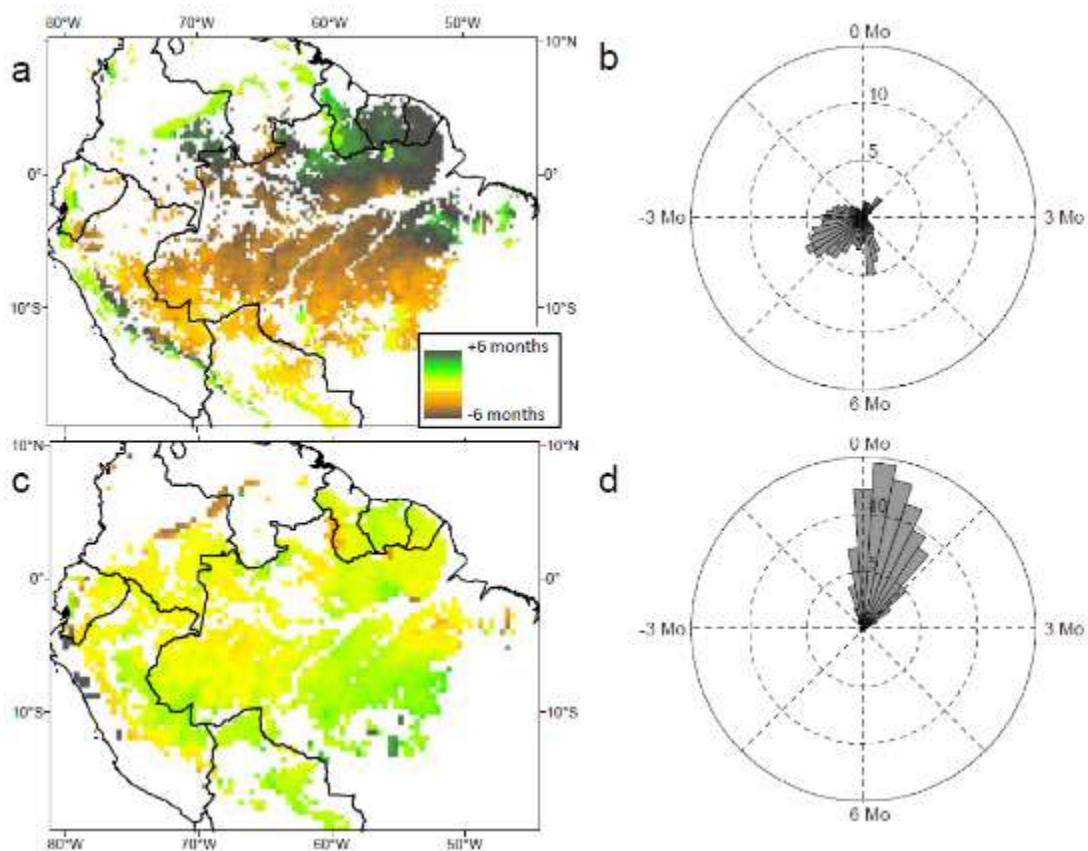


Figure 29. Phase shift between EVI and downwelling radiation (a, b) or rainfall (c, d) measured by satellite (MODIS, TRMM, GOES)

During the Biodiversa *CoforChange* project, supported by CIRAD, we sought to transpose this work on phenology to Central African forests. However, it soon became apparent that the quality of the standard MODIS data pre-processing was problematic and had a significant impact on the seasonal signal. In fact, the most frequently clouded and foggy areas of the Guinea coast showed a visibly polluted signal. Another effect of frequent clouding was that the usual BRDF corrections were not available. After many months of trying to improve these corrections, we changed our approach, and attempted a multi-scale (spatial) analysis, focusing

on dry-season data and based on the VHR archives at our disposal (Figure 30) (Viennois et al., 2013). This was also an opportunity to supervise the mobility of Gaëlle Viennois, who was joining AMAP and training in remote sensing (Viennois, 2011).

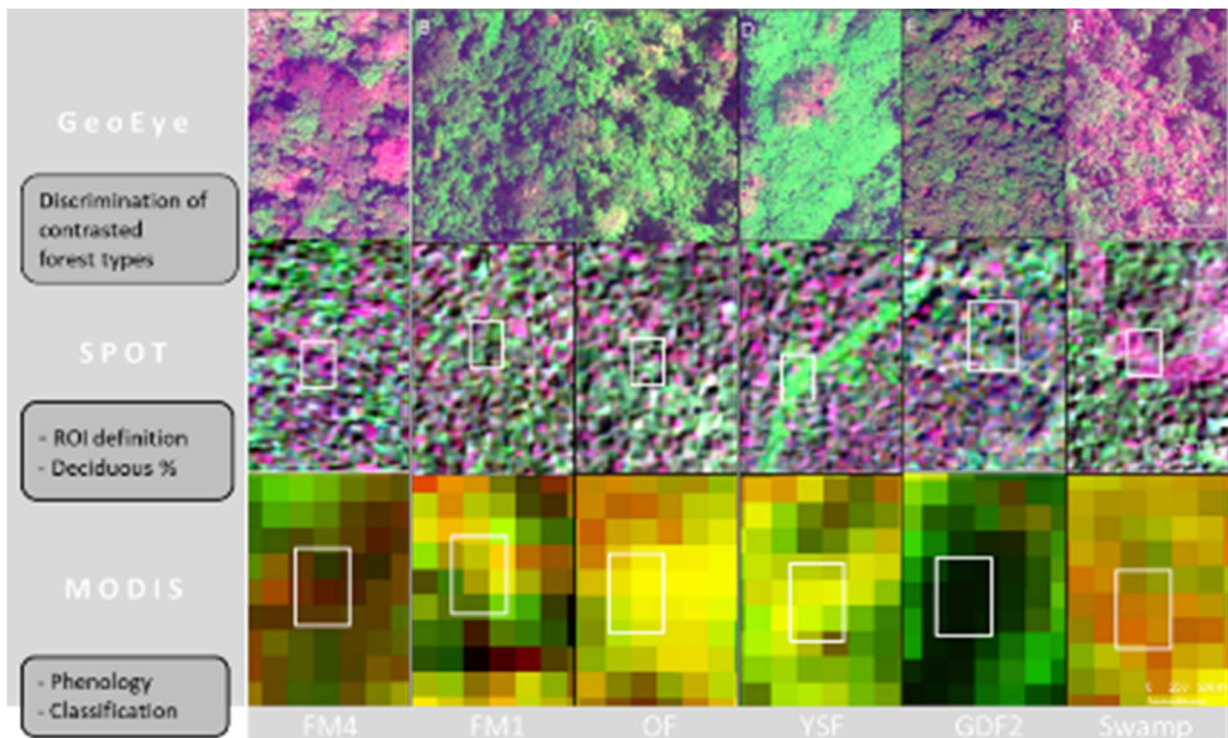


Figure 30. Analysis of the forest canopy signal at several spatial resolutions during the dry season. NIR-R-G compositions. Deciduous trees are shown in pink, and pioneer species or new flushes in bright green.

In particular, we were able to show that the EVI signal was linearly correlated with what we had interpreted as the proportion of trees in leaf on the more resolved images (Figure 31). With hindsight, I think that the phenological state of the foliage (young leaves) had a strong influence on this result, and that more than trees in leaf, it was the flushes that we were mapping with the EVI. We'll come back to this point in the research project (5). In any case, the map produced presents a very granular description of both qualitative (forest types) and quantitative (deciduousness) patterns in the study region straddling the borders of Congo, Gabon and Cameroon (Figure 32)⁴.

Later, a collaboration with Alexei Lyapustin (NASA) enabled us to obtain improved corrections of MODIS data using the MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) algorithm. Figure 33 shows a mosaic we were able to produce over Central Africa. However,

⁴ We've since improved on this effort on the same area with Pierre Ploton by extrapolating the proportion of deciduous trees in the forest inventory plots using dry season Sentinel 2 data (unpublished result, see 5).

even with this product, and using the infrared bands least impacted by atmospheric water, we can still make out the effect of fog near the Atlantic Ocean to the west.

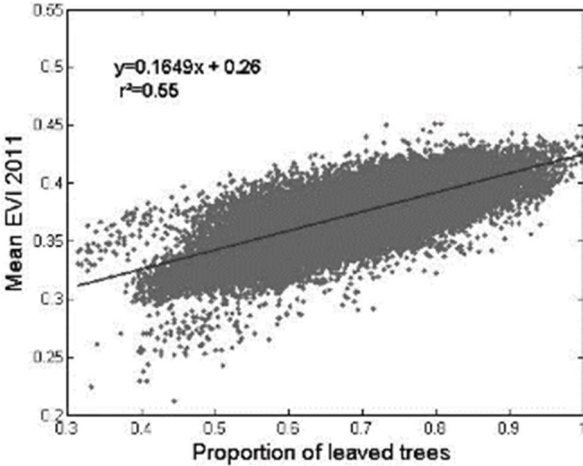


Figure 31. Dry-season correlation between Modis EVI and proportion of pixels identified as leafy crowns on SPOT 5 images.

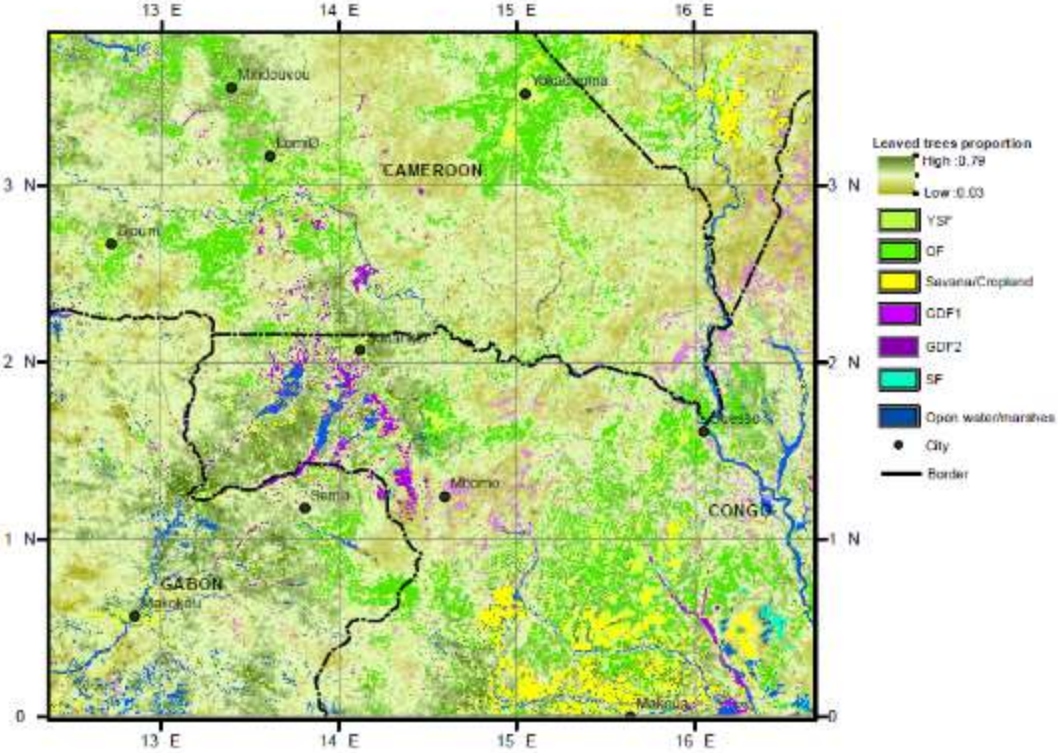


Figure 32. Map of forest types and proportion of leafy trees in the dry season, from MODIS data.

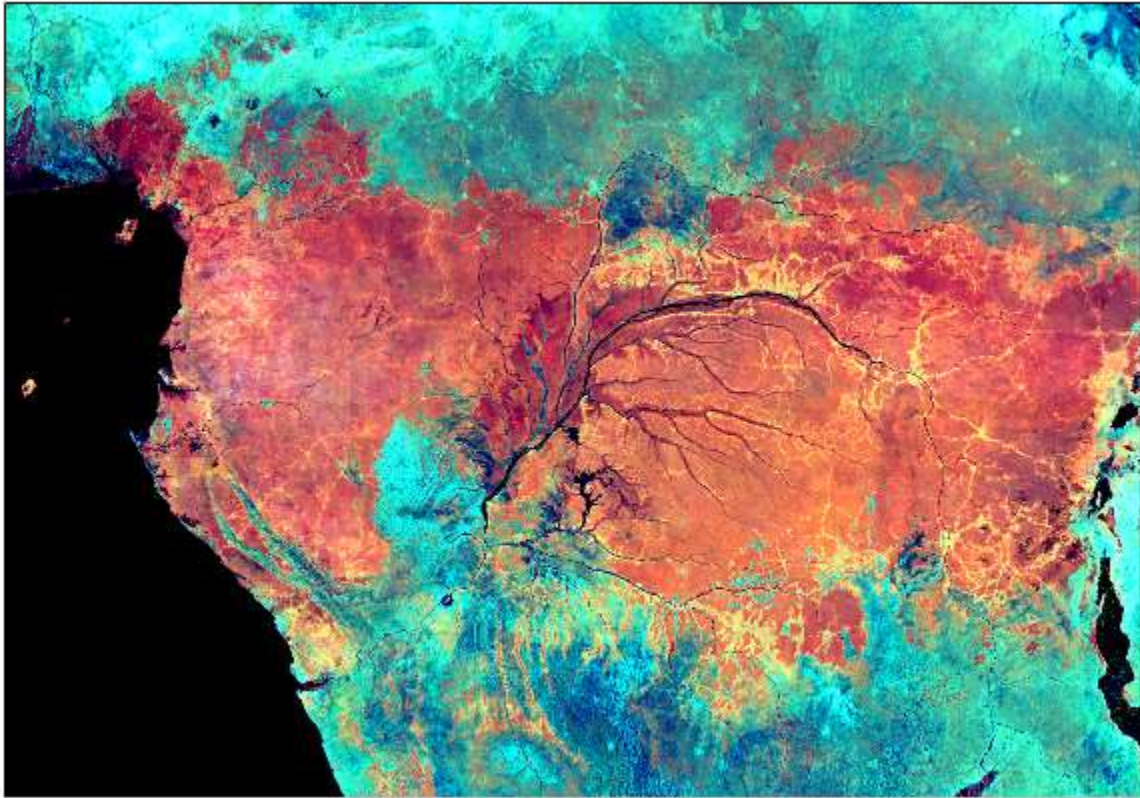


Figure 33. Decadal mosaic of MODIS data corrected by the MAIAC algorithm (SWIR1-SWIR2-NIR) over Central Africa.

4.3.2 EXTRAPOLATION AND SAMPLING STRATEGIES

Following the *CoforChange* project, we were able to combine MODIS images pre-processed with MAIAC with a unique field dataset patiently gathered by CIRAD, and more particularly by the late Sylvie Gourlet Fleury. These are commercial inventory data from private forest concessions, totalling 11.8 million trees. These data are in themselves extremely valuable for spatializing biomass and composition gradients in Central African forests (Ploton et al., 2020a; Réjou-Méchain et al., 2021). With Pierre Ploton, we used them to attempt a new biomass extrapolation, hoping to benefit from the combination of this unique ground-truth set, and state-of-the-art corrected images. In this way, we were able to pinpoint a major methodological problem that taints most large-scale maps published in the ecological literature, including biomass maps (Ploton et al., 2020b). These maps generally extrapolate local measurements using environmental or satellite variables with low predictive power. The level of accuracy is very often grossly overestimated due to a lack of statistical independence between validation and calibration data, induced by their spatial proximity (auto-correlation). In most cases, validation and calibration data come from the same initial dataset, which is randomly divided into two groups and not from truly distinct datasets. Another conclusion to be drawn from this analysis is that, even with the best radiometric corrections, the spectral data do not allow us to extrapolate biomass to more than a few kilometers from the training

plots, once these statistical problems are properly taken into account (Figure 34); in any case with traditional *machine learning* methods.

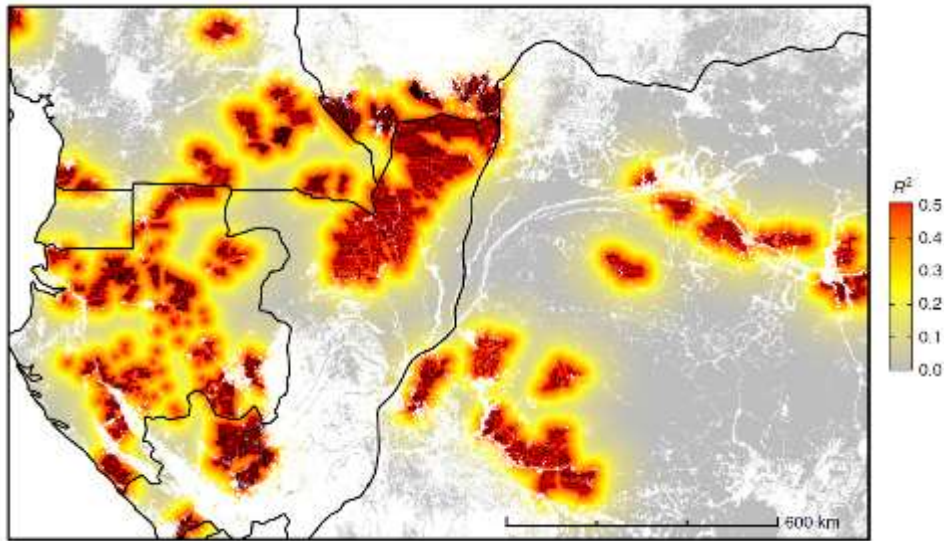


Figure 34. Spatialization of the coefficient of determination (R^2) showing a decrease as a function of the distance of the validation data from the calibration data.

In another study, conducted in Cameroon with Le Bienfaiteur Sagang (Sagang et al., 2020) we tested different calibration scenarios using nested sampling of field plots, airborne LiDAR data (ALS) and Sentinel 2 imagery. Although the predictive power of multispectral data in terms of biomass is limited - as we have just seen - the fact that we can produce a stratification (typology) of vegetation types means that stratified sampling can be envisaged, enabling an unbiased estimate per stratum. In the debate on model-based vs. design-based sampling (McRoberts et al., 2015) when the predictive power of satellite data is insufficient, it is therefore possible to adopt a hybrid strategy.

4.3.3 UNDERSTANDING FORESTS AND TREES TO UNDERSTAND THE SIGNAL

4.3.3.3 SETTING UP A NETWORK OF INVENTORY PLOTS

As explained above, as early as 2009, we felt the need to set up a network of forest inventory plots dedicated to the calibration of satellite approaches and a better understanding of forest structure gradients. This effort was made possible thanks to the unflinching collaboration of Bonaventure Sonké and his team in Cameroon, and with the help of Vincent Droissart, then later Pierre Ploton and Nicolas Texier, in 'VI's in Yaoundé. Other partnerships (F. Boyemba and John Katembo at the University of Kisangani, Tariq Stevart at the MBG), also enabled us to

⁵ Volontaire International: a kind of temporary contract for young graduates.

collect data in Gabon and the DRC. We set out to establish 1 ha plots in relatively undisturbed areas of natural forest on *terra firme*, where we could acquire images. We have since extended the surveys to all types of vegetation (including degraded, swampy or savanna). Access to these remote areas can be extremely demanding, and it often takes several days to reach the areas of interest.

In the plots, diameter at breast height (DBH) is measured for all trees over 10 cm DBH. The measurement protocol also includes other relevant structural measurements, such as tree height and crown dimensions, for a sample of trees. During the very first missions, we thought it best to omit tree identification and marking. We soon realized, however, that it doesn't take much longer to follow international scientific standards (adopted in the RAINFOR and Afritrion networks, for example). It only requires coordinating a team of sufficient size to mark, number, identify and take herbarium, DNA and soil samples. In this way, the plots set up enable synergies with multiple other questions of interest relating to community ecology, systematic botany, evolution, functional ecology, pedology, forest dynamics, etc.

4.3.3.4 SOME RESULTS IN COMMUNITY ECOLOGY

This has led to a number of interesting studies in community ecology. In his thesis, Moses Libalah showed that climatic and edaphic determinants acted at different spatial scales, and respectively marked the abundance patterns of abundant and rare species (Libalah Bakonck et al., 2020). In the DRC, I co-directed John Katembo's thesis, which focused both on biomass mapping and on the determinants of the dynamics of monodominant *Gilbertiodendron* and *Julbenardia* forests (Katembo, 2021; Katembo et al., 2020). In a recent meta-analysis (Declan et al., 2024), the pooling of plot data from three continents revealed that the proportions of hyperdominant species were exactly the same between continents. Our dataset doubled the sample available from Africa for this study.



Figure 35. Diameter measurement in Cameroon. Photo © Vincent Droissart.

4.3.3.5 ALLOMETRIES, ARCHITECTURE AND FUNCTION

The structural data collected in our forest inventory plots have been used in a number of studies on allometric relationships. The aim is to study the relationships linking different dimensions or parts of the plant. Our data have thus been used to construct allometric equations specific to remote sensing approaches, taking into account tree height and crown dimensions (Jucker et al., 2022, 2017), that are dimensions potentially measurable by remote sensing methods (aerial LiDAR), to predict other dimensions not visible from above (such as DBH, wood volume or aerial mass). With Moses Libalah, we have also studied the determinants of the relationship between DBH and height (Libalah et al. In prep), which turns out to be shaped above all by stand structure (basal area), more than by climatic and edaphic determinants. We have also contributed to the study of the relationship between DBH and crown size (Blanchard et al., 2016) which is remarkably stable across the tropical belt. Another strategy has been to take into account and capitalize on the disproportionate contribution of large trees and hyper-dominant species to develop a simplified approach to estimating aerial carbon in plots (Bastin et al., 2015b, 2018).

To convert tree diameters (and heights), as measured in forest inventory plots, into biomass estimates, allometric equations calibrated on the basis of felled and weighed trees are traditionally used. This is known as the 'destructive' approach. However, given the logistics involved in weighing trees with more than 150 tonnes of fresh material, very few studies can afford local calibration. Allometric equations therefore often come from a completely different region, or are calibrated across the tropics (Chave et al., 2014). The problem of the

representativeness of the equations used for a given vegetation type, set of environmental conditions or biogeographical region, and their potential biases, is therefore a recurring one.

To remedy this, Raphaël Pélissier, Pierre Ploton and I launched a research project ten years ago on allometrics and LiDAR. The idea was to use a laser scanner (terrestrial LiDAR) to provide a detailed description of tree volume (Figure 36) and calibrate allometric equations non-destructively. With Stéphane Momo, whom we supervised from the Master's years through to the thesis and post-docs, we established a partnership with a private logging company (Alpicam-Grumcam) in eastern Cameroon.



Figure 36. Trees scanned with terrestrial LiDAR. From left to right, *Triplochytton scleroxylon*, *Terminalia superba*, *Piptadeniastrum africanum*.

Initially, we used the felled trees in the normal course of the operator's business. We therefore had to adapt to the site so as not to interfere. We had to follow the harvesting plan, find the identification tags normally placed at the foot of each trunk by the inventory teams, go and scan the trees of interest in advance, wait for felling and then hurry up cubing and weighing (Figure 37) the tree on the ground before the log was hauled away. However, this protocol posed a number of problems: (i) the trees were almost all of comparable size (above the minimum operating diameter), whereas calibration of an allometry requires sampling the whole size gradient; (ii) many tags were missing, and it wasn't always the tree we had scanned that was chosen to be felled. These initial trials and tribulations nevertheless enabled us to build up an interesting first destructive dataset, with some of the largest cubed/weighed trees in the world! We thus contributed to the revision of Chave's pantropical allometry (Chave et al., 2014). The exercise also enabled us to familiarize ourselves with the shortcomings and qualities of various scanners (Riegl VZ400, Faro 300, Leica C10), get our hands into specialized processing chains, and initiate collaborations with leading research teams around terrestrial LiDAR. It was also an opportunity to taste for the first time the joys of public procurement administration, with a European call for tenders for the purchase of a terrestrial LiDAR

scanner, accompanied by an agreement between two institutions (CIRAD and INRA) who had co-financed it.



Figure 37. Destructive protocol and weighing of the various compartments.

Thanks to this experience, we were able to join a very ambitious project (PRE-REDD) of the Central African Forest Commission (COMIFAC), aimed at calibrating biomass allometric equations in six countries of the region, using the traditional (destructive) method. I supported Bonaventure Sonké's laboratory in sampling the Cameroonian site (at Alpicam), and Stéphane Momo and Libalah Moses received specific funding to enable them to work on the non-destructive method on the one hand, and on the establishment of plots and the study of height-diameter allometries on the other. By combining the three protocols (plots, LiDAR, destructive), I had initially hoped to assemble a dataset like almost none exists (Clark and Kellner, 2012) : a direct measurement of biomass at plot level, by weighing all the trees. I had even consulted specialist pruners with a view to a dismantling project in which the larger trees

would have been used as supports to suspend/weigh the smaller ones. However, as I was not in charge of drafting the destructive sampling protocol, I was unable to guide it in this direction. The COMIFAC consultant felt it more appropriate to recommend strict sampling by species and diameter class. However, we rarely found all the trees we were looking for in the plots we surveyed, and we had to scour the entire network of tracks in the annual cuttings to find the trees we wanted. Fortunately, this time we had the opportunity to sample all diameter classes, and to have our own felling team, correcting the logistical problems we had encountered previously.

The data obtained through destructive protocols have enabled us to explore avenues for improving allometric equation models, particularly by taking into account structural changes in trees during ontogeny (Ploton et al., 2015). Indeed, the crown of adult reiterated trees can exceed 60% of tree mass. As Leonardo da Vinci had already noted, the cylindrical approximation is globally valid ⁶, and the total cross-sectional area is on average preserved at each fork. However, by taking into account the dimensions of the tree crowns, we were able to reduce the significant biases observed in the estimated biomasses, particularly for the largest trees. These data were also used to produce the first regional allometric equations for the Congo Basin (Fayolle et al., 2018).

But above all, we have demonstrated the validity of the non-destructive approach based on terrestrial LiDAR (Momo Takoudjou, 2019; Takoudjou et al., 2018). The volume estimates obtained through quantitative structural models (QSMs), which fit interconnected cylinders to the entire branched woody structure, does indeed enable an unbiased estimate of wood volume. However, it is essential to manually correct major errors that may appear in the reconstructed model, due to the presence of occlusions in particular. For this purpose, we have designed a tool, AMAPscan, integrated into the Amapstudio suite and developed at AMAP by Sébastien Griffon and François de Coligny. To estimate wood density (and *ultimately* tree mass), we were able to identify systematic patterns of vertical variation in wood density within the tree. We proposed a simple equation to deduce the average density of the tree from the basal density (Momo et al., 2020; Sagang Takougoum et al., 2018).

To take this further, we set up the Biodiversa 3DForMod project, led by AMAP (P.I.: R. Pélissier), in partnership with Passi Raumonon in Finland and Wageningen University (Martin Herold). The aim of the project was to pool data, improve processing chains for estimating biomass at different scales, and pass on methodological advances to decision-makers. On this last point, for example, Martin Herold was able to have the use of terrestrial LiDAR included in the IPCC guidelines (Buendia et al., 2019) which provide the official recommendations for

⁶ The total volume of the tree generally follows the relationship $V=DBH*H$

greenhouse gas inventories. I have also contributed to several synthesis publications summarizing best practices for biomass estimation, from field to large-scale mapping (Duncanson et al., 2021; Réjou-Méchain et al., 2019). With the help of Olivier Martin, a post-doc on the project, we were able to test a semi-automatic processing chain for terrestrial LiDAR data (Martin-Ducup et al., 2021) and evaluate the stages where human intervention was most crucial (mostly the individual tree segmentation stage). We then recruited a team of specialized technicians in Cameroon to apply this processing chain to several thousand trees scanned (in full) in plots in Cameroon (forest and savanna), Gabon, DRC (Miombo), and French Guiana.

In addition to biomass estimates, the destructive and non-destructive data collected at the scale of individual trees has enabled us to make progress in the study of tree architecture and growth strategies. For example, we have been able to analyze patterns of variability in wood structure and density between species and ontogenetic stages. Two very interesting results emerge, showing that during crown development in canopy trees, both the structure (topology, geometry and proportions) of the tree and wood density in the crown converge towards similar values, irrespective of the functional type or life strategy of the species (Martin-Ducup et al., 2020; Momo et al., 2020). Thus, canopy trees show less apical dominance, have more forks and a more spreading crown, and come closer to the fractal expectations of metabolic theory (Enquist et al., 2009). The biomechanical constraints of a spreading habit impose a narrower range of wood densities. This convergence of metamorphosed trees in the canopy shows that some of the functional and architectural diversity observed in the understory eventually fades. To study functional strategies in the canopy, we need to move away from the usual syndromes (acquisitive vs. competitive species) and look for traits that reflect resistance to limiting factors in the canopy, such as extreme temperatures, seasonal drought, or even lack of seasonal light in very cloudy areas. Particular attention should be paid to phenology.

4.3.3.6 IN-SITU MEASUREMENTS OF FOLIAGE AND PHENOLOGY

To understand the temporal signal from satellite data, and more generally the interaction between the electromagnetic signal and the forest, plot data and biomass allometries are not enough. We need to characterize the foliage and its seasonal dynamics. Leaves are the interface between plants, the atmosphere and radiation. Yet very little is known about the surface area, spatial and angular distribution, phenology and optical properties of foliage in tropical forests.

Taking advantage of COMIFAC's destructive sampling in Cameroon, we calibrated allometric models for predicting leaf area. To this end, I supervised Nelly Sirry during her Master's degree in Yaoundé, working on the conversion of weighed leaf masses into leaf area (Sirri et al., 2019). Her protocol involved counting leaves on several branches per tree before weighing them, and scanning a certain number, in order to have for each tree a precise conversion factor from

total leaf mass (available to us) to surface area. With a small team, she counted nearly 2 million leaves! We then used allometric equations calibrated on the basis of these data to estimate LAI in 21 one-hectare forest inventory plots surveyed in the same locality. We found that LAI could be as high as 14 (m^2 of leaves per m^2 of soil) when all trees in a plot were assumed to be in leaf. A single *Triplochyton scleroxylon* tree even totalled more than one ha of leaf area! These values are much higher than the usual estimates for tropical forests, which are generally obtained by indirect methods based on hemispherical photographs (Bréda, 2003; Vincent et al., 2017). This underlines the importance of using direct observations or unbiased indirect estimates. LiDAR-based approaches have shown good potential (Vincent et al., 2017) particularly on the basis of voxelization approaches that take into account variations in sampling intensity and occlusions in the scanned scene. This is the purpose of the AMAPVox software. We began by using our destructive, TLS-scanning African sample as a reference to test the potential of AMAPVox for quantifying not only leaf area, but also leaf angle distribution and foliage distribution and porosity at the crown level (Momo Takoudjou, 2019). The results, though promising, have unfortunately not yet been published.

We have also begun to acquire the optical properties of leaves using canopy access methods (Figure 38), both in Central Africa and French Guiana (Feret et al., 2016) notably as part of the Hypertropik project (CNES). A major difficulty is to take into account leaf aging and demography, in order to obtain a realistic representation of the rapid evolution of leaf physiological and optical properties, as well as the mixing of leaf age classes in the tree crown (Wu et al., 2016). This will be a central aspect of my research project (cf. 5).



Figure 38. Canopy climbing for optical leaf data collection

4.3.4 DRONES: AN INDISPENSABLE INTERMEDIATE SCALE

Making the link between field measurements and remote sensing data for phenomena as transient as phenology is a challenge, especially when the programmed acquisition of a cloud-free VHR satellite image can take a year or more. What's more, whatever the issue (C dynamics, phenology, forest structure, spatial distribution of tree species, etc.), plots alone rarely provide sufficient sampling. Finally, with an individual surface area of 1ha, plots are small both compared to the crowns of large trees and to the pixels of most satellite sensors. Edge effects are therefore significant, not to mention the fact that GPS location accuracy remains problematic under forest cover (Duncanson et al., 2021).

Airborne LiDAR provides detailed, three-dimensional information that can be used to fill in these gaps by spatializing biomass, but also foliage density or crown boundaries, over tens of thousands of hectares. However, the mobilization of an aircraft is costly and difficult to implement, particularly in Africa.

So the use of drones became essential... Being the first at AMAP to get involved, I had to 'clear the ground' for several years. Taking advantage of a two-year expatriate posting in Cameroon,

I had to test a number of drone models, sensors and software in real field conditions before reaching the level of professionalism required to acquire usable data. The administrative burden cannot be underestimated either. For several years now, I've been in charge of safety for the unit's drones. I'm in charge of monitoring a dozen drones and pilots for the CNRS safety department, which is our official 'operator'. I also have to deal with problems of transport, customs, flight authorization - with different regulations for each country and even each zone - repairs, purchases, incessant updates, software, batteries, and so on. In future, I'll have the good fortune to be assisted in this task by Stéphane Fourtier, Assistant engineer at AMAP.

More affordable, our first drones were equipped with RGB cameras (now also multispectral or thermal infrared). These sensors enable three-dimensional mapping using stereophotogrammetry. By taking several hundred or thousands of photos of the area of interest, we can reconstruct its shape and produce an orthorectified mosaic, as well as a digital surface model (DSM). This is a passive remote sensing method, meaning that the scene is illuminated by the sun (or emits its radiation for thermal), and the light reflected (or emitted) towards the sensor is measured. In the visible spectrum, it is therefore impossible to see objects that are not illuminated, and therefore to describe the undergrowth or the height of the ground beneath the forest. To give an idea of the coverage possible, with a quadricopter drone, we can produce mosaics of 50 ha at 5 cm resolution per 20-minute flight.

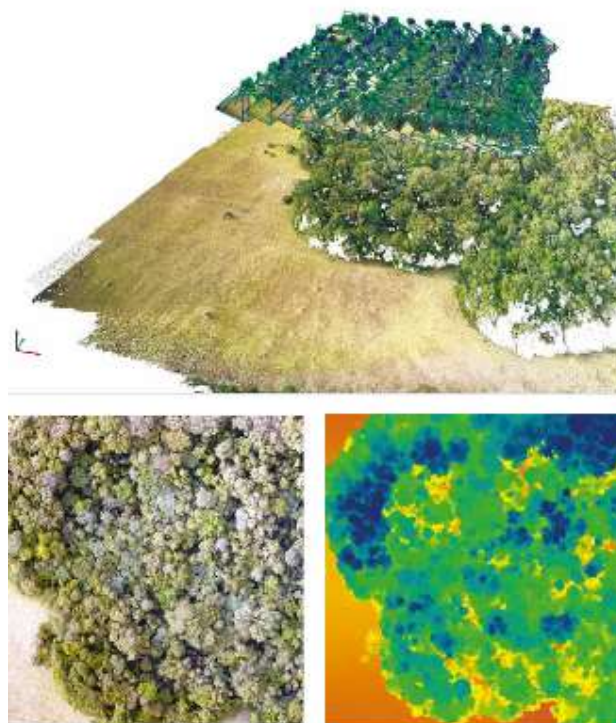


Figure 39. Principle of stereophotogrammetry (by drone). A forest-savanna interface was photographed on a regular grid with a high degree of overlap. Bitter points are automatically recognized between photos, enabling the 3D structure of the object surface to be deduced, following the 'Structure from Motion' principle. The internal and external geometry of the shots is optimized. A digital surface model is produced, onto which the photos are projected to produce an orthomosaic.

We then wanted to acquire a LiDAR scanner for drone (~150 kEur). A new adventure with public contracts and budgets from multiple sources (CIRAD, IRD) spread over two budget years... Figure 40 shows the device and an example of the data acquired. AMAP now has two other (less expensive) systems.

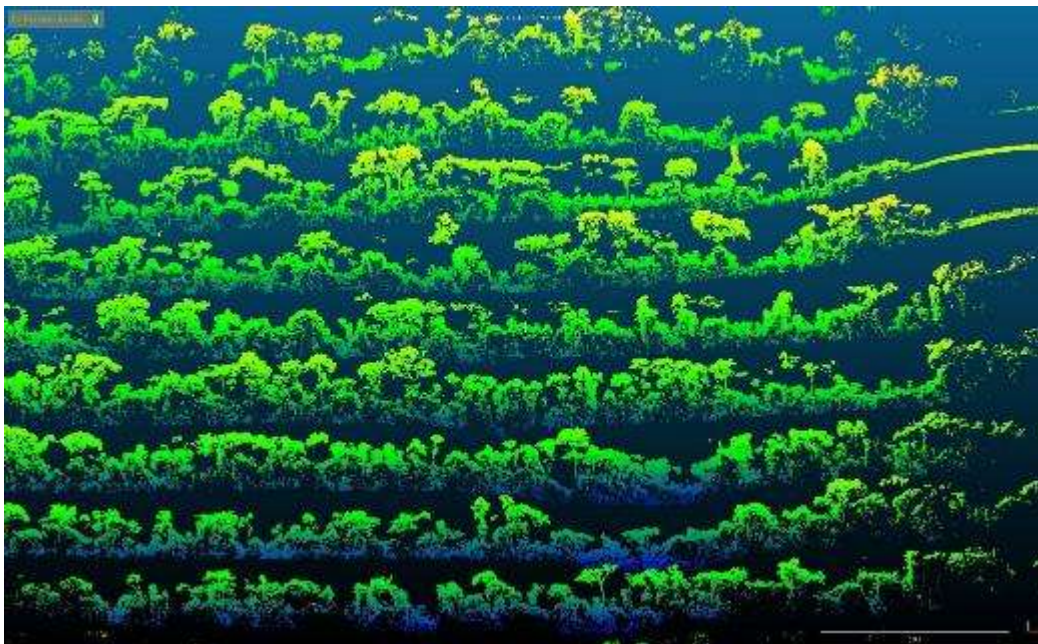


Figure 40. Vx scanner on the Bouamir cocher in the Dja, Cameroon. Bottom: Cross-sections through the point cloud. The edge of the inselberg can be seen at top right.

It was worth it. I was subsequently involved in a number of projects where this new data acquisition capability was a game-changer:

- A first project, funded by Nasa (PIs: Tom Smith, UCLA, Sassan Saatchi, JPL), focuses on the link between habitat structure/phenology and animal movement (birds, bats and antelopes) around the Dja reserve (Cameroon).
- In New Caledonia, I was co-leader of the *Reliques* project (with Philippe Birnbaum), which focused on the effects of forest fragmentation on ultramafic soils. Funded by CNRT-Le Nickel, the project's main aim was to provide recommendations for better preserving or restoring forests around nickel mines. An important result of the project was to establish that the 'edge' effect in forest fragments, and their impact on microclimate and floristic and functional composition, was directly mediated by canopy structure (measured with LiDAR by drone) rather than by distance to the edge as such (Blanchard et al., 2023).
- In the ESA-funded ForestScan project, led by Mat Disney (UCL), we are involved in a collective effort to develop LiDAR-based measurement methods (terrestrial, drone, aerial) to establish reference sites for satellite missions (notably within GeoTree).

But above all, our new drone data acquisition capabilities have enabled me to launch the *Phenobs* project (funded by Labex *CEBA* of the ANR), a phenological observatory in French Guiana, which I'll come back to in more detail in the research project.

4.3.5 SUMMARY

In order to address ecological questions about the mechanisms and determinants of tropical forest dynamics and functioning with the spatial and temporal hindsight promised by satellite remote sensing, we had to embark on a long odyssey.

The promises of textural approaches (FOTO) on VHR images have only been partially fulfilled. The compromise between spatial resolution and the extent covered by individual acquisitions, under the constraint of heavy cloud cover and directional effects to be controlled, makes them an impractical tool. SPOT6-7 images offer satisfactory coverage at a relatively affordable price (1-2 Eur/km²) and the possibility of textural intercalibration between overlapping areas, but the (true) spatial resolution⁷ is not sufficient for biomass prediction. Moreover, the absence of a continuous acquisition program (but only on order) means that there is very little archive available. The Planet constellation, with images of 3-5 m resolution acquired daily over the entire surface of the globe, does not offer sufficient spatial resolution, swath width or consistency of optical quality. Sampling the territory, as we did initially, with images from different VHR sensors in uncontrolled configurations is virtually useless with the FOTO

⁷ Around 3 m for the Panchromatic band, instead of the 1.5 m advertised

approach: directional and sensor effects will be impossible to control. As we shall see in the project section, however, the emergence of deep-learning-type artificial intelligence methods seems to be opening up new avenues, by combining textural characterization with (implicit) consideration of instrumental, atmospheric and other effects.

Beyond this half-success, the fact is that the expertise, partnerships, equipment and datasets put in place have positioned us in the national and global research landscape on the issues of satellite product calibration, biomass upscaling approaches or destructive and non-destructive allometries. One mark of this recognition was to participate in several chapters of the CEOS guidelines, which is an effort by the entire scientific community to establish recommendations for the calibration/validation of biomass satellite missions (Duncanson et al., 2021, 2019). We also provided crucial data to NASA and ESA for the *Afrisar*, *Tropisar* and *Gedi* missions (Duncanson et al., 2022; Fatoyinbo et al., 2021; Labriere et al., 2018). In France, we have participated (as part of laboratory collectives) in numerous CNES-funded projects, focusing on texture (*FOTOFOR*), the preparation of a hyperspectral mission (*Hypxim*), the preparation of a P-band radar mission (*Biomass*), the preparation of a LiDAR mission (*Stem-leaf*), or the use of deep-learning on Sentinel 2 images (*Se2Cool*). We play a key role in the ESA-funded *ForestScan* project to develop tomorrow's methods for calibrating space missions to measure biomass. The *GeoTrees* initiative, which aims to support field research with a view to pooling reference sites for the space community, has asked us to contribute with sites in Central Africa (Rodda et al. 2024). The same applies to national initiatives such as *One Forest Vision* and *PEPR Forestt*. Although in some of these projects, our involvement is limited to providing field data (plots, LiDAR), in others our expertise in ecology, modeling or signal processing, or in calibration/validation strategies, is fully recognized.

Finally, our presence on various tropical worksites, or my own expatriation to Cameroon, have provided us with opportunities for substantial funding or unique data acquisition (aerial LiDAR, destructive sampling) via development projects and public-private partnerships (NHPC, Maboumine, CNRT) or with international public institutions (COMIFAC, FAO). Impact studies on dam projects, railroad or high-voltage line openings, or mining projects, have seen us temporarily take on the role of consultancy to feed our research. Of course, it is also the role of IRD researchers to put the tools and approaches developed by fundamental research to the test in a more applied context in support of sustainable development. As part of the *Nachtigal* project, we have developed a portfolio of *open-source* tools for studying afforestation-deforestation dynamics, monitoring fire regimes and, above all, characterizing "habitat quality", i.e. the state of the vegetation cover in a given area (Sagang et al., 2022). Such tools are essential in development projects, to assess the impact of projects and implement appropriate compensation or restoration measures. Similar approaches have been deployed in New Caledonia to study the effects of forest fragmentation on ultramafic soils (Blanchard et al., 2023, Blanchard et al. in prep).

5.1 A TRANSDISCIPLINARY PROJECT FOCUSING ON FOREST FUNCTIONING

After 15 years of methodological development, I'd like to put the methods I've developed and the experience I've gained to practical use, both in response to ecological issues and to sustainable development needs in the South. In particular, I'd like to take a closer look at the processes and functioning of tropical forests.

It is in this context that I am leading the Phenobs project (Labex CEBA - ANR strategic project) to observe the phenology of Guyana's forests. In this resolutely transdisciplinary project (Figure 41), we are tackling the issue of seasonal greening, and more generally the phenology of Guyanese forests, using an interlocking approach from the leaf to the ecosystem, via regular monitoring by drone over a hundred hectares of the Paracou station.

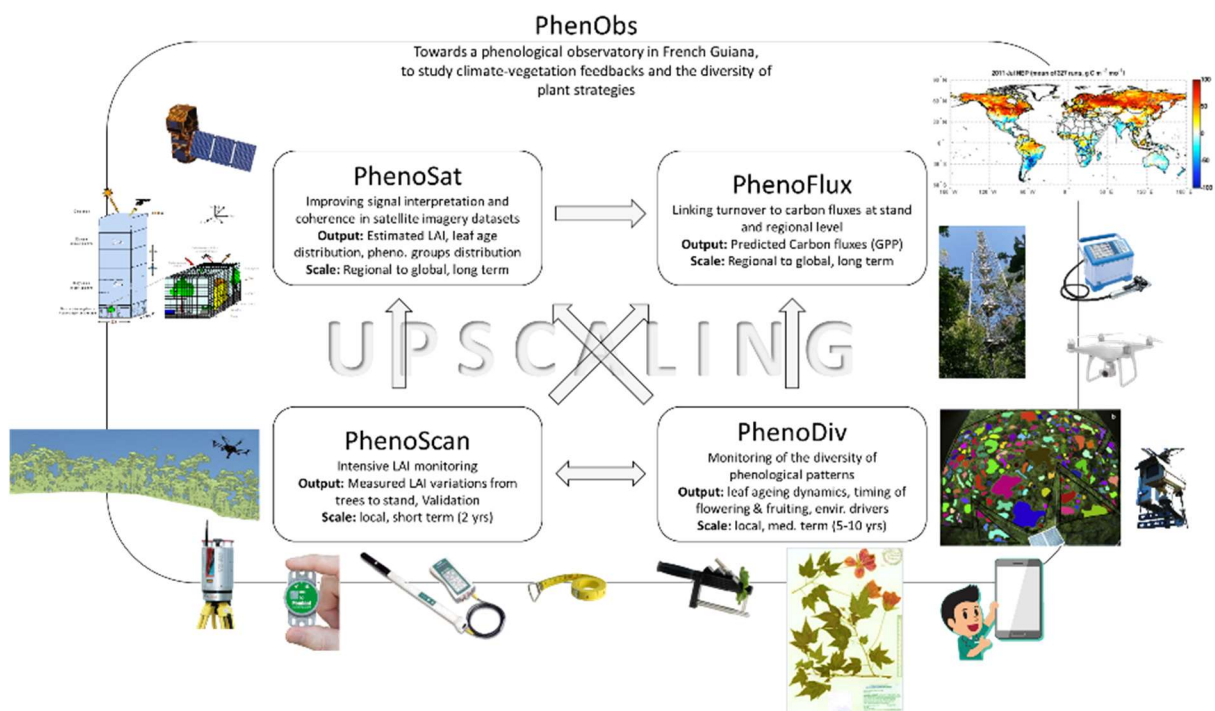


Figure 41 . Conceptual diagram of the Phenobs project

As mentioned above (cf. 4.3.1.2), much has already been written about the apparent greening of evergreen forests during the dry season. Whether observed on optical satellite data with high temporal resolution but low spatial resolution (e.g. MODIS) (Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007) or carbon flux data measured by eddy covariance (Saleska et al., 2003), the mechanisms and determinants of the observed fluctuations remain mysterious. Assuming that these patterns are indeed biological and not purely instrumental in origin (Morton et al., 2014), the complexity of phenological patterns and floristic diversity in these ecosystems make it difficult to study the underlying mechanisms (cryptic phenology, Albert et al., 2019). Few species lose their foliage on a prolonged or even visible basis, and cases of asynchronism

within a species, or even a crown, are frequent (Wright and Vanschaik, 1994). The traditional approach is to observe changes by binoculars on a few trees along phenological paths (Loubry, 1994; Sabatier, 1983). It is understandable that the transition to a landscape scale with this type of approach has not enabled reliable estimation of the mechanisms regulating photosynthetic capacity. As a result, climate-vegetation models (DGVMs) have proved incapable of reproducing seasonal variations in climate-vegetation interactions in tropical forests (Chen et al., 2020; Restrepo-Coupe et al., 2017).

An interesting hypothesis has been proposed that the greening patterns observed in the dry season are not induced by variations in leaf area (LAI), but rather by a globally synchronized renewal of leaf cohorts (Brando et al., 2010; Doughty and Goulden, 2008; Wu et al., 2016). Given the natural variation in leaf physiology with age (maturation cycle followed by aging), this renewal would optimize photosynthetic capacity at the time of peak incident light. The validation of this hypothesis is so far based on very partial observations on a small number of sites in Amazonia, namely :

- phenocam photos showing dozens of tree crowns at varying distances (bird's-eye view from a flux tower),
- indirect LAI estimates using approaches (hemispherical photos, LAI meter, illuminance ratio) that are potentially biased in dense forests (Vincent et al., 2017),
- measurements of the variation of optical and photosynthetic parameters with age on the leaves of no more than two dozen trees (Chavana-Bryant et al., 2017; Wu et al., 2019, 2017).

5.2 THE CONTRIBUTION OF DRONES

Thanks to drones, we will be attempting to be both more precise and spatially more representative in estimating quantitative and qualitative variations in canopy foliage. At the end of 2020, regular monitoring using LiDAR and multispectral drones began in the footprint of the Paracou flux tower (Guyaflux) in French Guiana. After some technical fine-tuning (to guarantee the spatial and spectral coherence of the mosaics, and to ensure the stability of the processing chain and the management of large data flows), the initial results are rather convincing (Barbier et al., 2021). RGB and multispectral data can be used to detect defoliation and foliage renewal events, even highlighting the existence of intra- and inter-individual

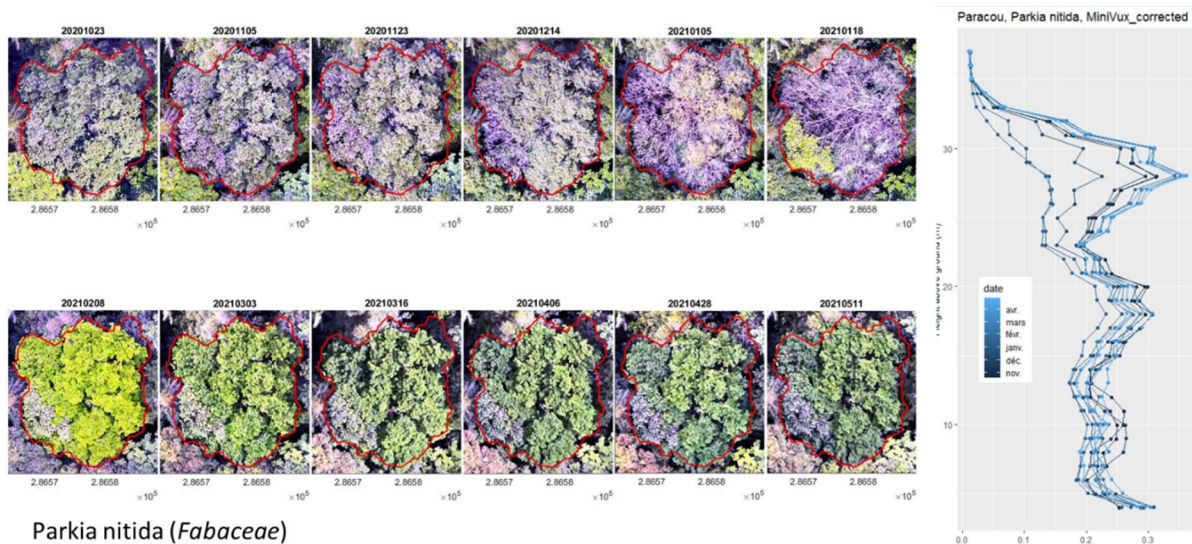


Figure 42 . Multi-date tracking of a tree using mosaicked RGB drone data and voxelized drone LiDAR data to estimate plant density (PAD) by vertical slices from ground to canopy within the crown right-of-way.

Voxelization of LiDAR data (AMAPVox, Vincent et al., 2017) allows us to quantify subtle variations in plant area density (PAD) in the canopy. The PAD decreases on dates corresponding to when the tree appears leafless on the RGB mosaics (Figure 42). With Grégoire Vincent, however, we established that AMAPVox's ability to take account of occlusions and variations in sampling density was not sufficient to correct for the attenuation of the LiDAR beam from light drone scanners. The low power and range (relative to the height of tropical forests) of these scanners induces biases that can result in an overestimation of PAD density in undergrowth. An empirical intercalibration has been proposed, which requires intercomparing data from different scanners on the same site (Delaître, 2019; Vincent et al., 2023).

An important challenge in scaling up is to be able to identify individual tree crowns, and even to identify their species. Working in a ground-based inventory system such as Paracou is obviously a great help. However, establishing the link between marked trunks and crowns seen from above is far from trivial. In dense forest, even less than elsewhere, crowns are rarely vertical and centered on the trunk. To get started with a dataset that can be used to document the diversity of phenological patterns, and then hope to later train automated crown segmentation models (Ball et al., 2023). To achieve this, a manual training dataset had to be set up. Nearly 1,500 crowns were digitized and verified in the field in the study area (work supervised by Grégoire Vincent and James Ball, a Cambridge doctoral student associated with the project). Similarly, 5 to 6 thousand phenophases have already visually interpreted (ongoing work supervised by Patrick Heuret). Whether through time series analysis (breakpoints, auto-correlation, Markov chains) tested in collaboration with Patrick Heuret and Géraldine Derroire, or on the basis of instantaneous spectral and LiDAR signatures, it is already clear that drone data can be used to automate phenophase detection with a good level of

accuracy (8% error with a Random Forest model based on multispectral and LiDAR data). Through the detection of a leafless phase, when present, or flushes of new leaves, it is therefore possible to determine the age of the most exposed leaves (light leaves) for most canopy species and individuals in the area monitored.

At community level, initial results, indicate that foliage renewal (maximum leaf shedding and new flushing) occurs mainly - as expected - towards the start of the long dry season. Litterfall also peaks during the dry season. Overall, PAD shows seasonal variations of almost 10%, with a maximum at the end of the dry season. This means that foliage (which represents the portion of ADP that varies seasonally) must vary -relatively- much more. Thanks to a terrestrial LiDAR dataset manually cleaned by our Cameroonian team (under Olivier Martin's supervision), we'll have a precise assessment of the proportion (at time t) of leaves and wood, over 1ha of forest. It is therefore likely that we will arrive at a much more mixed conclusion as to the relative importance of variations in foliage quantity and quality in the seasonal greening signal.

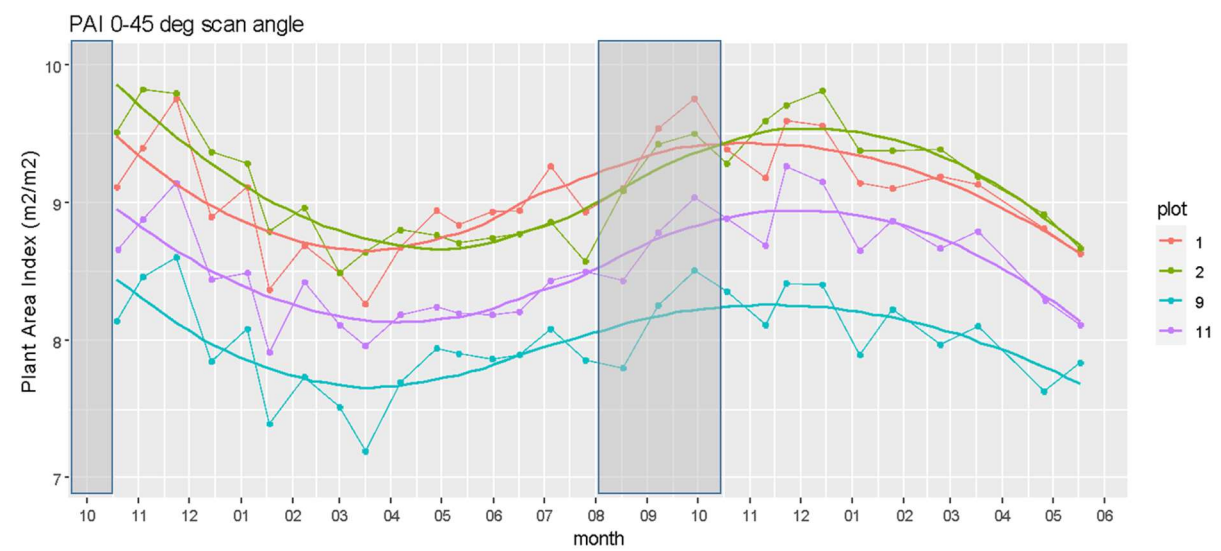


Figure 43. Variation in PAD measured by UAV-LiDAR at the scale of 0.5 ha plots in Paracou. Thicker lines are mobile averages of individual dates.

5.3 FUNCTIONNING AND BIODIVERSITY

With Isabelle Maréchaux, Clément Stahl and Sabrina Costes, we have also launched the acquisition of functional, optical and physiological data at leaf scale, with age control, on around thirty trees climbed regularly. Here, Patrick Heuret was able to provide invaluable insight into the study of plant architecture. Rather than having to mark individual leaves for later dating, we use morpho-anatomical markers to distinguish growth units. Combined with drone tracking, this enables us to date these growth units (by identifying leafing dates). Initial results confirm that photosynthetic parameters ($V_{c,max}$, J_{max}) as well as other traits characterizing drought resistance (thickness, PTLP) vary with leaf age. Spectral properties too, and it is possible, for example, to predict the age of a leaf (of a known species) using only the

relative intensity of green ($R^2=0.86$)! These data will be used to feed mechanistic models, such as TROLL (Maréchaux and Chave, 2017) to analyze in detail the determinants of fluxes observed by the tower, but also to prepare extrapolation to a larger scale (DGVMs).

In addition to quantifying photosynthetic capacity, the thousands of trees monitored provide completely new insights into the diversity of tropical tree adaptations to seasonal and edaphic stresses. We will be able to analyze phenological behavior on an individual scale, to study the genetic and environmental determinants of the timing, frequency and duration of phenophases, as well as the variability of behavior between individuals and species. Species such as *Platonia insignis* (Clusiaceae), for example, have a biannual phenology on an individual scale (flowering every two years, P. Heuret, Comm. Pers.), but an annual phenology on a population scale, with one-year phase shifts between sub-populations. For other species, defoliation occurs during the short dry season for some individuals, and during the long dry season for others. We could, for example, look for a determining factor in the biogeographical origin of sub-populations. Initial analyses show more simply that topographical position and tree size can jointly modulate a tree's propensity to leaf out more or less frequently than its conspecifics. Numerous cases of intra-crown desynchronism have also been observed. Here, as in the Treemutation project, in which we were involved (Labex CEBA, PIs: Myriam Heuertz, Niklas Tysklind), intra-individual genetic diversity could be a causal factor. Furthermore, as phenology is intimately linked to strategies for survival (avoidance of drought or periods of excessive temperature, competition for light, etc.), resource allocation or reproduction, effective characterization of phenological patterns will make it possible to describe previously inaccessible functional components (Albert et al., 2019). These few examples illustrate very succinctly the wealth of questions opened up by this new type of observatory, which, moreover, will necessarily have to be long-term to monitor sensitivity to multi-annual cycles and global climatic trends. Analysis of the inter-individual and inter-annual variability of phenological responses will enable us to address numerous biological and evolutionary questions.

Following on from the success of the Phenobs project in French Guiana (which we are trying to continue via an FEDER funding application, supported by Géraldine Derroires), we have already begun drone monitoring, trait collection and crown digitization at several sites in Africa (Cameroon, Congo). A Biodiversa project has been funded (PI: R. Pélissier, with Gilles Dauby and Pierre Ploton) to support this new African project, and expand partnerships.

5.4 THE SWITCH TO SATELLITES

As regards the use of satellite images to extrapolate functional and phenological data in space or time, I was able to take advantage of the break offered by Covid to get my hands dirty with Google Earth Engine, the cloud computing platform dedicated to cartography. Where, in my dissertation days, downloading and processing a few Landsat images was a research project in itself, processing thousands of them spread over space and time is now instantaneous. Sentinel 2 images provide an interesting compromise between spectral resolution (13 bands), spatial resolution (10 m for some bands) and temporal resolution (5 days). Our first tests in Cameroon and New Caledonia to identify forest types, age or degradation gradients, edge effects, or even phenophase proportions or functional types have been very conclusive.

However, in order to scale up, we need to considerably improve the quality of pre-processing (radiometric corrections). With Jean-Baptiste Féret and his team, we tested the available atmospheric correction algorithms (Chraïbi et al., 2022; Feret and Barbier, 2018) and identified significant differences in treatment quality in tropical forest areas. In particular, our long-standing collaboration with Airbus DS has enabled us to achieve highly satisfactory results with the OVERLAND processing chain. Developed by Hervé Poilvé on the basis of a locally optimized adjustment of the 6S (atmosphere) and SAIL (vegetation) models, Overland provides dehazed images in all spectral bands that appear much cleaner and more temporally stable than other existing products (Sen2Cor in particular). However, correction of directional effects (BRDF) requires specific re-adjustment of the usual kernels (Li-sparse, Ross-thick) describing the volumetric and geometric effects of dense forest canopy on reflectance. The parameters available (Roy et al., 2016, 2016) adjusted for all types of land cover, are clearly unsuitable. These kernels have most often been designed for data with low spatial resolution, and describe, for example, the observed proportion of shadows and illuminated surfaces in scenes containing trees or buildings (in the case of geometric kernels). Volumetric kernels, on the other hand, describe scattering by elements of infinitesimal size (turbid media) and can, for example, describe the effect of foliage, at least as long as the leaves (diffractors) remain small relative to the sensor resolution. In the absence of a specific theoretical framework for high-resolution kernels, their use outside the scale ranges for which they were originally designed is relatively common (Jia et al., 2020). However, to be effective, kernel fitting must be specific to a type or even a state of the canopy, as well as to a specific resolution and wavelength. In fact, we have seen that parameters derived from very generalist kernel fits (fitted for all types of land cover) or directly adapted from MODIS data, as proposed by Roy et al. (2016) are clearly unsuitable for correcting directional effects in dense forest. With Pierre Ploton, we have therefore undertaken a specific calibration for dense forests, and an article is currently being finalized.

Another approach to breaking down the satellite-observed signal into its biological and instrumental components is to use the detailed data acquired in the Phenobs project to model

radiative transfer. The DART model (Gastellu-Etchegorry et al., 2015) which I have already worked with (cf.4.3.1.1), now provides extremely realistic simulations (Ebengo et al., 2021) thanks to the assimilation of voxelized LiDAR data. Based on age-controlled leaf optical properties, we should be able to make further progress. To this end, I will be supervising a post-doctoral researcher with Jean-Baptiste Féret.

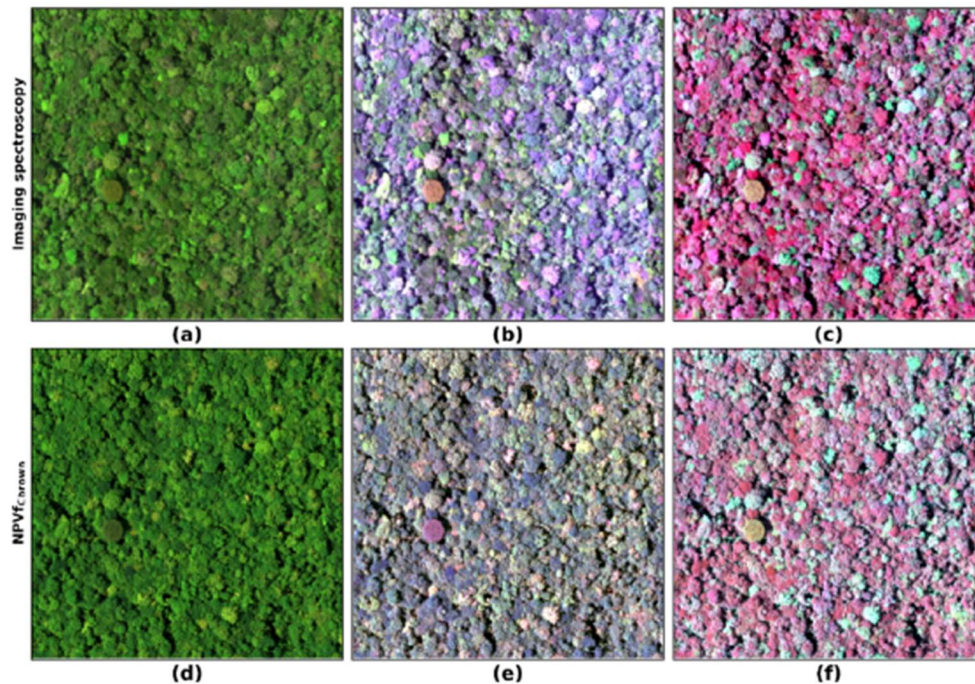


Figure 44. Color composites from real hyperspectral data (top) and simulated with DART (bottom) on Paracou.

Finally, there is a third way forward, which will considerably reduce the investment required in remote sensing image pre-processing. The most recent artificial intelligence (AI) methods make it possible to disregard a large proportion of undesirable atmospheric and directional effects, with the added value of taking into account the spatial context (local texture). With Paul Tresson (newly recruited to IRD), Maxime Réjou-Méchain, Gaëlle Viennois, Pierre Ploton and Pierre Couteron, and Hadrien Tulet (whom I have now recruited on fixed-term contract), we tested both convolutional neural networks and Vision transformer algorithms, notably with a self-learning approach (Dino, self-distillation with no labels). In both cases, the forest typology mappings obtained are highly relevant (even before supervision). However, with Transformers, the mappings appear to be more robust to instrumental effects (Figure 45).

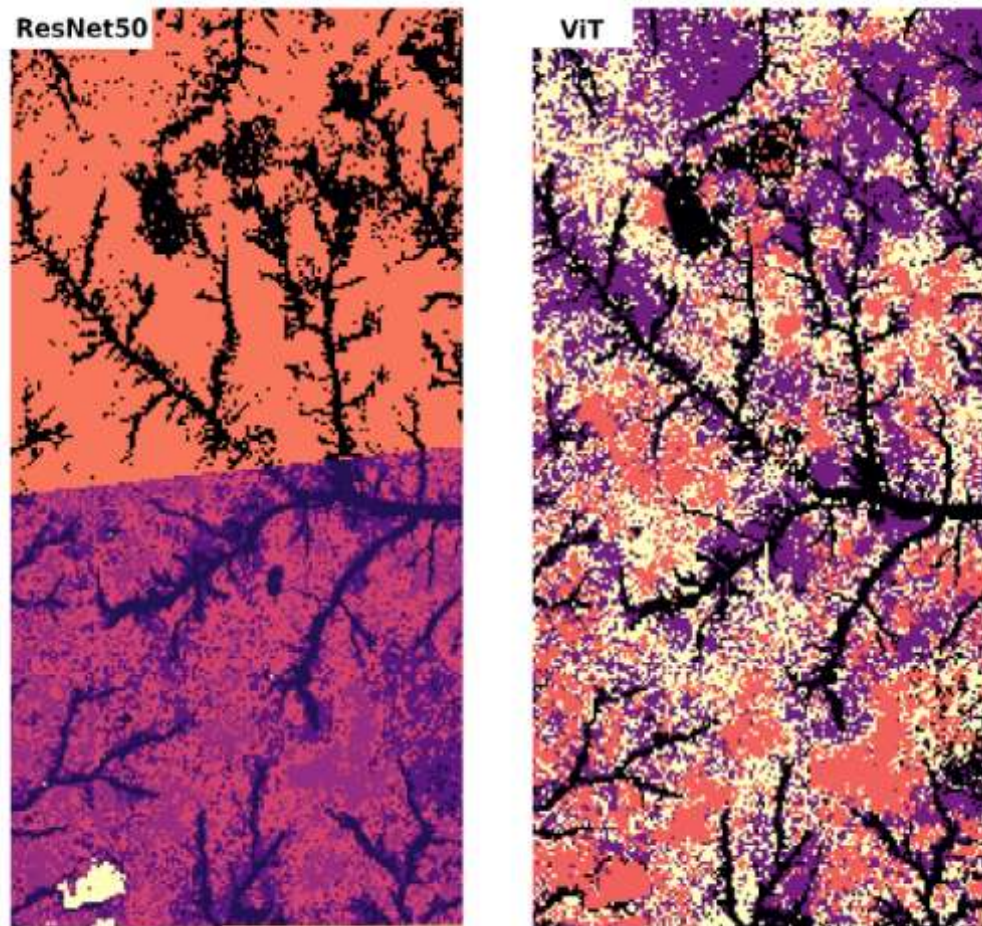


Figure 45. Unsupervised classification (self-learning, DINO) of vegetation types in North Congo from two Pleiades images. The ResNet50 algo (left) is more sensitive to sensor effects than the Vision Transformer algo (right).

5.5 TREE AND STAND ARCHITECTURE

In 2023, during a six-month academic stay at AMAP under my supervision, Adam Chmurzynski, a thesis student supervised by Brian Enquist (Arizona Univ.), was able to observe that the TLS data as processed via our semi-automatic processing chain (cf. 4.3.3.5) was out of all proportion to the datasets he had previously encountered. This was followed almost immediately (Chmurzynski et al., Submitted) by the submission of an article showing that the expectations of metabolic theory in terms of tree structure (Enquist et al., 2009) were indeed verified with terrestrial LiDAR data, provided the data were clean. This anecdote illustrates the value of our approach of rigorous control of data processing, and justifies further exploration of the potential of this indispensable tool for the detailed study of the structure and functioning of large trees and stands. New devices are being launched which are not only quicker to set up, making it possible to dispense with targets for relative positioning of stations, but are also lighter and can be mobilized by drone. SLAM (simultaneous localization and mapping) technology, in particular, makes it possible to scan dense forests from the ground and the sky with a single system, thus considerably reducing occlusion problems,

which until now have greatly limited the completeness of reconstructions. Several AMAP research teams (known as "themes") involved in plant architecture and modelling have expressed a clear desire to go further down this path, if possible by recruiting a dedicated research engineer or researcher. At the same time, this also implies strategic decisions on the acquisition and testing of new equipment, and the continuation of data acquisition in the field.

In addition to describing tree architecture and function, these data will also enable us to resume exploration of plant interactions. For example, in 2023, Alex Shenkin (Northern Arizona Univ.) and I submitted an application to CESAB, of which I am co-PI, for a working group on forest microclimate modeling. The theme has aroused the enthusiasm of the community, with several luminaries (Matt Disney, Jonathan Lenoir, ...) proposing datasets for joint analysis.

5.6 PARTNERSHIP AND INSTITUTIONAL INTEGRATION

In the preceding chapters, I have used the pronoun "we" rather than "I". Indeed, I do not see research as an individual exercise. I am fully aware that everything I have presented in this dissertation was the fruit of a collective effort, in which I was supervised and helped, and in which I myself supervised and helped young researchers, whether through scientific, logistical, administrative or human skills of all kinds. I believe that to obtain an Habilitation to Supervise Research (HDR), it is essential to recognize this state of affairs. To clarify just a little how I position myself scientifically, Figure 46 illustrates how we intend to study scale transfer in tropical forest ecosystems, from tree organs to regional or global ecosystem dynamics. As a researcher, I intend above all to focus on a specific set of scales and parts of the system, while recognizing the need to establish links with objects and models studied by other researchers or laboratories, designated as "externalized" in the figure.

In terms of funding and institutional insertion of this program, our ambitions are in line with large-scale initiatives currently being structured in Central Africa:

- The Congo Basin Science Initiative, launched following a call from environment ministers in Central Africa (White et al., 2021) to refinance ecological research in Central Africa. I was invited to attend the launch meeting ahead of the One Forest Summit in Libreville in 2023, and I intend to continue my involvement in this UN-SDSNsupported initiative, which offers the prospect of a very broad and diversified research partnership in Africa, along the lines of large-scale multidisciplinary projects in the Amazon (LBA). The first steps will be to carry out a scientific synthesis effort covering all key disciplines (climate, human sciences, biology, hydrology, etc.), and to set up an ambitious and coherent research program for the region.
- At the same time, NASA has decided to fund the preparation (scoping) of an ambitious multi-year research campaign in forest ecology on the scale of the entire tropical zone, led by Elsa Ordway (UCLA), with whom I am associated. In fact, we have already started

an active collaboration in Cameroon through the Congo Basin Institute, which is a broad partnership structure led by UCLA, notably around the Bouamir research site in the Dja reserve.

- France also wants to make its contribution, with the announcement of the One Forest Vision initiative by the President of the Republic at the Libreville summit. The aim is to set up a high-performance operational tool for monitoring carbon and biodiversity in Central Africa. Here too, we are involved in both the supply of cal/val data (Pillar 1) and the use of satellite images for mapping forest types (Pillar 3).
- At IRD, we have long initiated a collaborative network in Central Africa, embodied in the LMI Dycofac (Dynamics of Continental Ecosystems in Central Africa), and by the construction of a Center of Excellence in Environmental Biogeosciences (CBE). The aim is to address the issue of biogeochemical cycles in all compartments of the so-called "critical" zone: atmosphere, vegetation, pedosphere, hydrosphere.
- In Cameroon, of course, there's the long-standing partnership with Prof. Sonké's laboratory. Several AMAP colleagues are currently hosted there (Pierre Ploton, Gilles Dauby, Hugo Leblanc). We have also initiated an active collaboration with the Ecole Nationale des Eaux et Forêts, under the direction of Mr Germain Mbock. After many years of waiting, an agreement has also just been signed with the Ministry of Forests, which will enable us to conduct our research in protected areas. This will reinforce the durability of the phenological observatories we have set up.
- Of course, we have a strong partnership with CIRAD (co-supervisor of AMAP), which is very active in forest-related research in Central Africa. Colleagues with whom we have numerous exchanges and co-publications are currently (or soon will be) on expatriation in Congo (Vivien Rossi) and Gabon (Adeline Fayolle).
- Opportunities for collaboration with Gembloux (ULG) professors Jean-Louis Doucet, Jean-François Bastin, Philippe Lejeune and Jan Bogaert will continue to abound.
- At ULB, my Alma Mater, we still work closely with the herbarium (Tariq Stévant, who also wears the MBG hat), and with Olivier Hardy's laboratory.
- Finally, in various Central African countries (Congo, Gabon, DRC), we will continue to develop partnerships, notably through the RIFEAC network (Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale de l'Afrique Centrale).

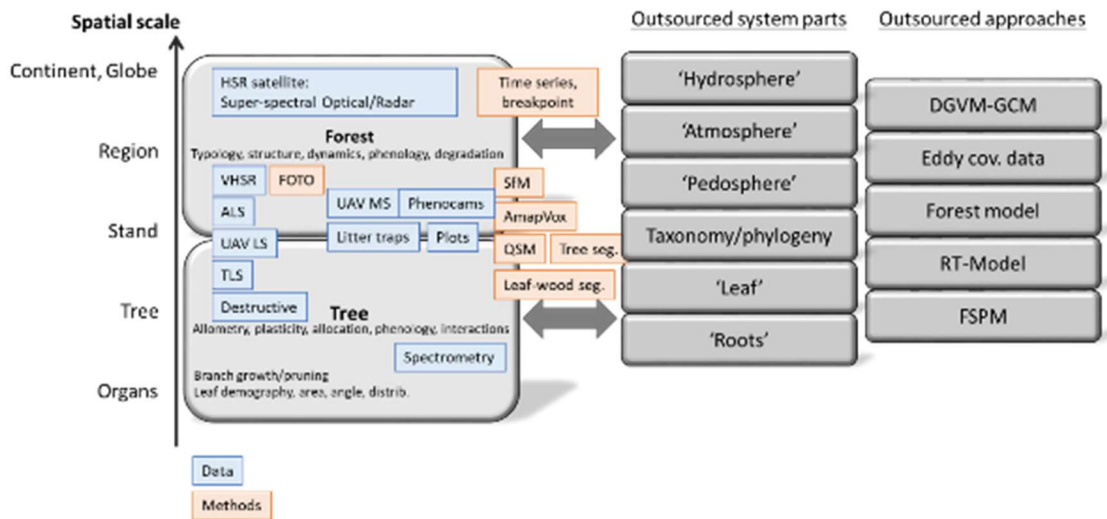


Figure 46. Methods, models and data to cover a significant range of spatial and temporal scales from plant organs to global biogeomechanical cycles. On the right, parts of the biological or physical system or approaches that will largely have to be outsourced through collaborations with other laboratories or researchers.

- Albert, L.P., Restrepo-Coupe, N., Smith, M.N., Wu, J., Chavana-Bryant, C., Prohaska, N., Taylor, T.C., Martins, G.A., Ciais, P., Mao, J., 2019. Cryptic phenology in plants: case studies, implications and recommendations. *Glob. Change Biol.*
- Aquino, C., Mitchard, E.T., McNicol, I.M., Carstairs, H., Burt, A., Puma Vilca, B.L., Obiang Ebanéga, M., Modinga Dikongo, A., Dassi, C., Mayta, S., 2022. Reliably mapping low-intensity forest disturbance using satellite radar data. *Front. For. Glob. Change* 5.
- Aragao, L.E.O.C., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., Saatchi, S., 2008. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.* 363, 1779–1785.
- Aubréville, A., 1938. La forêt coloniale. Les forêts de l’Afrique occidentale française. *Ann. Académie Sci. Colon.* 9.
- Ball, J.G.C., Hickman, S.H.M., Jackson, T.D., Koay, X.J., Hirst, J., Jay, W., Archer, M., Aubry-Kientz, M., Vincent, G., Coomes, D.A., 2023. Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* n/a. <https://doi.org/10.1002/rse2.332>
- Barbier, N., 2006. Auto-organisation et interactions spatiales des végétations semi-arides. PhD, Université Libre de Bruxelles, Brussels.
- Barbier, N., 2001. Caractérisation et cartographie des formations végétales et contribution à l’évaluation de l’impact humain dans le cadre de la gestion participative de la Zone Cynégétique de la Pendjari (Nord Bénin). Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Barbier, N., Ball, J., Clocher, I., Poilvé, H., Verley, P., Vincent, G., 2021. Sensing Tropical Forest Phenology and Productivity from the Field to the Satellite, in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. IEEE, pp. 716–719.
- Barbier, N., Bellot, J., Couteron, P., Parsons, A.J., Mueller, E.N., 2014a. Short-Range Ecogeomorphic Processes in Dryland Systems, in: *Patterns of Land Degradation in Drylands*. Springer, pp. 85–101.
- Barbier, N., Couteron, P., 2015. Attenuating the bidirectional texture variation of satellite images of tropical forest canopies. *Remote Sens. Environ.* 171, 245–260.
- Barbier, N., Couteron, P., Deblauwe, V., 2014b. Case Study of Self-Organized Vegetation Patterning in Dryland Regions of Central Africa, in: *Patterns of Land Degradation in Drylands*. Springer, pp. 347–356.

- Barbier, N., Couteron, P., Gastelly-Etchegorry, J.P., Proisy, C., 2011a. Linking canopy images to forest structural parameters: potential of a modeling framework. *Ann. For. Sci.* 69, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0116-9>
- Barbier, N., Couteron, P., Lefever, R., Deblauwe, V., Lejeune, O., 2008. Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gap vegetation patterns in SW Niger. *Ecology* 89, 1521–1531.
- Barbier, N., Couteron, P., Lejoly, J., Deblauwe, V., Lejeune, O., 2006. Self-organised vegetation patterning as fingerprint of climate and human impact on semiarid ecosystems. *J. Ecol.* 94, 537–547.
- Barbier, Nicolas, Couteron, P., Planchon, O., Diouf, A., 2010. Multiscale comparison of spatial patterns using two-dimensional cross-spectral analysis: application to a semi-arid (gapped) landscape. *Landsc. Ecol.* 25, 889–902. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9466-1>
- Barbier, N., Couteron, P., Proisy, C., Malhi, Y., Gastellu-Etchegorry, J.P., 2010. The variation of apparent crown size and canopy heterogeneity across lowland Amazonian forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 72–84.
- Barbier, N., Ploton, P., Libalah, M., Droissart, V., Texier, N., Houdry, P., Sonke, B., Pelissier, R., Couteron, P., 2016. Regional scale mapping of forest types, biomass and degradation in Cameroon using a groundinventory network and canopy texture on VHR optical imagery. *ATBC Annu. Meet. Trop. Ecol. Soc.*
- Barbier, N., Proisy, C., Véga, C., Sabatier, D., Couteron, P., 2011b. Bidirectional texture function of high resolution optical images of tropical forest: An approach using LiDAR hillshade simulations. *Remote Sens. Environ.* 115, 167–179.
- Bastin, J.-F., Barbier, N., Couteron, P., Adams, B., Shapiro, A., Bogaert, J., De Canniere, C., 2015. Aboveground biomass mapping of African forest mosaics using canopy texture analysis: toward a regional approach (vol 24, pg 1984, 2014). *Ecol. Appl.* 25, 1747–1747.
- Blanchard, E., Birnbaum, P., Ibanez, T., Boutreux, T., Antin, C., Ploton, P., Vincent, G., Pouteau, R., Vandrot, H., Hequet, V., others, 2016. Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees* 30, 1953–1968.
- Blanchard, G., Barbier, N., Vieilledent, G., Ibanez, T., Hequet, V., McCoy, S., Birnbaum, P., 2023. UAV-Lidar reveals that canopy structure mediates the influence of edge effects on forest diversity, function and microclimate. *J. Ecol.*
- Borgogno, F., D’Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., 2009. Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology. *Rev. Geophys.* 47.

Brando, P.M., Goetz, S.J., Baccini, A., Nepstad, D.C., Beck, P.S., Christman, M.C., 2010. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 14685–14690.

Bréda, N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *J. Exp. Bot.* 54, 2403–2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>

Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Jamsranjav, B., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P., Federici, S., 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Butler, A.J., Barbier, N., Cermak, J., Koller, J., Thornily, C., McEvoy, C., Nicoll, B., Perks, M.P., Grace, J., Meir, P., 2010. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. *Tree Physiol.* 30, 705–714.

Chavana-Bryant, C., Malhi, Y., Wu, J., Asner, G.P., Anastasiou, A., Enquist, B.J., Caravasi, E.G.C., Doughty, C.E., Saleska, S.R., Martin, R.E., 2017. Leaf aging of Amazonian canopy trees as revealed by spectral and physiochemical measurements. *New Phytol.* 214, 1049–1063.

Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péliissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

Chen, X., Maignan, F., Viovy, N., Bastos, A., Goll, D., Wu, J., Liu, L., Yue, C., Peng, S., Yuan, W., 2020. Novel representation of leaf phenology improves simulation of Amazonian evergreen forest photosynthesis in a land surface model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 12, e2018MS001565.

Chmurzynski, A., Brummer, A., Shenkin, A., Savagev, V., Malhi, Y., Martin-Ducup, O., Zieminska, K., Barbier, N., Enquist, B., Submitted. Precision TLS models validate Metabolic Scaling Theory across tree forms. *New Phytol.*

Chraibi, E., de Boissieu, F., Barbier, N., Luque, S., Féret, J.-B., 2022. Stability in time and consistency between atmospheric corrections: Assessing the reliability of Sentinel-2 products for biodiversity monitoring in tropical forests. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 112, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102884>

Clark, D.B., Kellner, J.R., 2012. Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *J. Veg. Sci.* 23, 1191–1196.

Couteron, P., 2023. Conservative or dissipative? Two distinct processes for spatial pattern emergence. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 120, e2221117120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2221117120>

Couteron, P., 2002. Quantifying change in patterned semi-arid vegetation by Fourier analysis of digitized aerial photographs. *Int. J. Remote Sens.* 23, 3407–3425. <https://doi.org/10.1080/01431160110107699>

Couteron, P., 1998. Relations spatiales entre individus et structure d'ensemble dans des peuplements ligneux soudano-sahéliens au nord-ouest du Burkina-Faso. Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse.

Couteron, P., Barbier, N., Gautier, D., 2006. Textural Ordination Based on Fourier Spectral Decomposition: A Method to Analyze and Compare Landscape Patterns. *Landsc. Ecol.* 21, 555–567. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-2166-6>

Couteron, P., Lejeune, O., 2001. Periodic spotted patterns in semi-arid vegetation explained by a propagation-inhibition model. *J. Ecol.* 89, 616–628.

Couteron, P., Pelissier, R., Nicolini, E.A., Paget, D., 2005. Predicting tropical forest stand structure parameters from Fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy images. *J. Appl. Ecol.* 42, 1121–1128.

d'Herbès, J.M., Ambouta, J.-M.K., Peltier, R., 1997. Fonctionnement et gestion des écosystèmes contractés sahéliens [WWW Document].

Deblauwe, V., 2010. Modulation des structures de végétation auto-organisées en milieu aride. PhD, Université Libre de Bruxelles.

Deblauwe, V., Barbier, N., Couteron, P., Lejeune, O., Bogaert, J., 2008. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 17, 715–723.

Deblauwe, V., Couteron, P., Bogaert, J., Barbier, N., 2012. Determinants and dynamics of banded vegetation pattern migration in arid climates. *Ecol. Monogr.* 82, 3–21.

Deblauwe, V., Couteron, P., Lejeune, O., Bogaert, J., Barbier, N., 2011. Environmental modulation of self-organized periodic vegetation patterns in Sudan. *Ecography* 34, 990–1001.

Cooper, D.L.M., Lewis, S.L., Sullivan, M.J.P., Prado, P.I., Ter Steege, H., Barbier, N., Slik, F. et al. 2024. Consistent patterns of common species across tropical tree communities. *Nature*: 1-10.

Delaître, G., 2019. Inter-calibrations de capteurs LiDAR pour estimer la densité de végétation en forêt tropicale (Master 2 : Bio-informatique 2018-2019 Développement Logiciel et Analyse de Données). Université Aix-Marseille.

Diouf, A., 2012. Influence du régime des feux d'aménagement sur la structure ligneuse des savanes nord-soudaniennes dans le Parc du W (Sud Ouest NIGER). Prescribed fires regime impacts on the woody structure of North-Sudanian savannas in the W Park (South-Western NIGER). Université Libre de Bruxelles.

Diouf, A., Barbier, N., Lykke, A.M., Couteron, P., Deblauwe, V., Mahamane, A., Saadou, M., Bogaert, J., 2012. Relationships between fire history, edaphic factors and woody vegetation structure and composition in a semi-arid savanna landscape (Niger, West Africa). *Appl. Veg. Sci.* 15, 488–500.

Diouf, A., Barbier, N., Mahamane, A., Lejoly, J., Saadou, M., Bogaert, J., 2010. Characterization of the spatial structure of ligneous entities in a "speckled bushland" to the south-west of Niger. *Can. J. For. Res.-Rev. Can. Rech. For.* 40, 827–835.

D'Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., 2006. A probabilistic analysis of fire-induced tree-grass coexistence in savannas. *Am. Nat.* 167, 79–87.

Doughty, C.E., Goulden, M.L., 2008. Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO₂ exchange. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113.

Duncanson, L., Armston, J., Disney, M., Avitabile, V., Barbier, N., Calders, K., Carter, S., Chave, J., Herold, M., Crowther, T.W., 2019. The importance of consistent global forest aboveground biomass product validation. *Surv. Geophys.* 1–21.

Duncanson, L., Armston, J., Disney, M., Avitabile, V., Barbier, N., Calders, K., Carter, S., Chave, J., Herold, M., MacBean, N., others, 2021. Aboveground Woody Biomass Product Validation Good Practices Protocol.

Duncanson, L., Kellner, J.R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D.M., Hancock, S., Healey, S.P., Patterson, P.L., Saarela, S., Marselis, S., others, 2022. Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sens. Environ.* 270, 112845.

Ebengo, D.M., de Boissieu, F., Vincent, G., Weber, C., Féret, J.-B., 2021. Simulating Imaging Spectroscopy in Tropical Forest with 3D Radiative Transfer Modeling. *Remote Sens.* 13, 2120.

Enquist, B.J., West, G.B., Brown, J.H., 2009. Extensions and evaluations of a general quantitative theory of forest structure and dynamics. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 7046–7051.

Fatoyinbo, T., Armston, J., Simard, M., Saatchi, S., Denbina, M., Laval, M., Hofton, M., Tang, H., Marselis, S., Pinto, N., others, 2021. The NASA AfriSAR campaign: Airborne SAR and lidar measurements of tropical forest structure and biomass in support of current and future space missions. *Remote Sens. Environ.* 264, 112533.

Fayolle, A., Ngomanda, A., Mbasi, M., Barbier, N., Bocko, Y., Boyemba, F., Coutron, P., Fonton, N., Kamdem, N., Katembo, J., 2018. A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling. *For. Ecol. Manag.* 430, 228–240.

Feret, J.-B., Barbier, N., 2018. S2 BOA reflectance in the context of tropical rainforest: preliminary illustration of the challenges for the extraction of vegetation properties.

Feret, J.B., Grau, E., Barbier, N., Berveiller, D., Chave, J., Durrieu, S., Gastellu-Etchegorry, J.P., Hmimina, G., Lefèvre-Fonollosa, M.J., Proisy, C., 2016. Modeling the influence of leaf demography on remotely sensed data using DART and PROSPECT-D, in: AGU Fall Meeting Abstracts.

Gastellu-Etchegorry, J.-P., Yin, T., Lauret, N., Cajgfinger, T., Gregoire, T., Grau, E., Feret, J.-B., Lopes, M., Guilleux, J., Dedieu, G., 2015. Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sens.* 7, 1667–1701.

Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, S.R., Hutya, L.R., Yang, W.Z., Nemani, R.R., Myneni, R., 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophys. Res. Lett.* 33.

Jia, W., Pang, Y., Tortini, R., Schläpfer, D., Li, Z., Roujean, J.-L., 2020. A kernel-driven BRDF approach to correct airborne hyperspectral imagery over forested areas with rugged topography. *Remote Sens.* 12, 432.

Joetzjer, E., Pillet, M., Ciais, P., Barbier, N., Chave, J., Schlund, M., Maignan, F., Barichivich, J., Luyssaert, S., Herault, B., 2017. Assimilating satellite-based canopy height within an ecosystem model to estimate aboveground forest biomass. *Geophys. Res. Lett.* 44, 6823–6832.

Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., Dalponte, M., van Ewijk, K.Y., Forrester, D.I., Haeni, M., 2017. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Glob. Change Biol.* 23, 177–190.

Jucker, T., Fischer, F.J., Chave, J., Coomes, D.A., Caspersen, J., Ali, A., Loubota Panzou, G.J., Feldpausch, T.R., Falster, D., Usoltsev, V.A., Adu-Bredu, S., Alves, L.F., Aminpour, M., Angoboy, I.B., Anten, N.P.R., Antin, C., Askari, Y., Muñoz, R., Ayyappan, N., Balvanera, P., Banin, L., Barbier, N., Battles, J.J., Beeckman, H., Bocko, Y.E., Bond-Lamberty, B., Bongers, F., Bowers, S., Brade, T., van Breugel, M., Chantain, A., Chaudhary, R., Dai, J., Dalponte, M., Dimobe, K.,

Domec, J.-C., Doucet, J.-L., Duursma, R.A., Enríquez, M., van Ewijk, K.Y., Farfán-Rios, W., Fayolle, A., Forni, E., Forrester, D.I., Gilani, H., Godlee, J.L., Gourlet-Fleury, S., Haeni, M., Hall, J.S., He, J.-K., Hemp, A., Hernández-Stefanoni, J.L., Higgins, S.I., Holdaway, R.J., Hussain, K., Hutley, L.B., Ichie, T., Iida, Y., Jiang, H., Joshi, P.R., Kaboli, H., Larsary, M.K., Kenzo, T., Kloepfel, B.D., Kohyama, T., Kunwar, S., Kuyah, S., Kvasnica, J., Lin, S., Lines, E.R., Liu, H., Lorimer, C., Loumeto, J.-J., Malhi, Y., Marshall, P.L., Mattsson, E., Matula, R., Meave, J.A., Mensah, S., Mi, X., Momo, S., Moncrieff, G.R., Mora, F., Nissanka, S.P., O'Hara, K.L., Pearce, S., Pelissier, R., Peri, P.L., Ploton, P., Poorter, L., Pour, M.J., Pourbabaie, H., Dupuy-Rada, J.M., Ribeiro, S.C., Ryan, C., Sanaei, A., Sanger, J., Schlund, M., Sellan, G., Shenkin, A., Sonké, B., Sterck, F.J., Svátek, M., Takagi, K., Trugman, A.T., Ullah, F., Vadeboncoeur, M.A., Valipour, A., Vanderwel, M.C., Vovides, A.G., Wang, W., Wang, L.-Q., Wirth, C., Woods, M., Xiang, W., Ximenes, F. de A., Xu, Y., Yamada, T., Zavala, M.A., 2022. Tallo: A global tree allometry and crown architecture database. *Glob. Change Biol.* 28, 5254–5268. <https://doi.org/10.1111/gcb.16302>

Katembo, J., 2021. Déterminants de la composition floristique et estimations des stocks de carbone des peuplements forestiers matures de Uma (Tshopo, RDC). Université de Kisangani.

Katembo, J.M., Libalah, M.B., Boyemba, F.B., Dauby, G., Barbier, N., 2020. Multiple Stable Dominance States in the Congo Basin Forests. *Forests* 11, 553.

Klausmeier, C.A., 1999. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation. *Science* 284, 1826–1828.

Labriere, N., Tao, S., Chave, J., Scipal, K., Le Toan, T., Abernethy, K., Alonso, A., Barbier, N., Bissengou, P., Casal, T., 2018. In situ reference datasets from the TropiSAR and AfriSAR campaigns in support of upcoming spaceborne biomass missions. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 1–11.

Lefever, R., Barbier, N., Couteron, P., Lejeune, O., 2009. Deeply gapped vegetation patterns: on crown/root-allometry, vegetation critical point and desertification. *J. Theor. Biol.* 261, 194–209.

Lejeune, O., 1999. Une théorie champ moyen de l'organisation spatio-temporelle des écosystèmes végétaux. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

Levin, S.A., 1992. The problem of pattern and scale in Ecology. *Ecology* 73, 1943–1967.

Libalah Bakonck, M., Droissart, V., Sonké, B., Barbier, N., Dauby, G., FORTUNEL, C., Kamdem, G., Kamdem, N., Lewis, S., Il Mofack, G., others, 2020. Additive influences of soil and climate gradients drive tree community composition of Central African rainforests.

Loubry, D., 1994. La phénologie des arbres caducifoliés en forêt guyanaise (5° de latitude nord): illustration d'un déterminisme à composantes endogène et exogène. *Can. J. Bot.* 72, 1843–1857.

Maréchaux, I., Chave, J., 2017. An individual-based forest model to jointly simulate carbon and tree diversity in Amazonia: description and applications. *Ecol. Monogr.* 87, 632–664.

Martin-Ducup, O., Mofack, G., Wang, D., Raumonon, P., Ploton, P., Sonké, B., Barbier, N., Couteron, P., Pélissier, R., 2021. Evaluation of automated pipelines for tree and plot metric estimation from TLS data in tropical forest areas. *Ann. Bot.* 128, 753–766.

Martin-Ducup, O., Ploton, P., Barbier, N., Momo Takoudjou, S., Mofack, G., Kamdem, N.G., Fourcaud, T., Sonké, B., Couteron, P., Pélissier, R., 2020. Terrestrial laser scanning reveals convergence of tree architecture with increasingly dominant crown canopy position. *Funct. Ecol.* 34, 2442–2452.

McRoberts, R.E., Tomppo, E.O., Czaplewski, R.L., 2015. Sampling designs for national forest assessments. *Knowl. Ref. Natl. For. Assess.* FAO Rome Italy 23–40.

Mercier, A., Betbeder, J., Mortier, F., Barbier, N., Ploton, P., Cornu, G., Couteron, P., in prep. Small-scale forest disturbance mapping using dense SAR Sentinel-1 time series: A large dataset approach in informal and certified logging areas.

Momo, S.T., Ploton, P., Martin-Ducup, O., Lehnebach, R., Fortunel, C., Boyemba, F., Couteron, P., Fayolle, A., Libalah, M., Loumeto, J., 2020. Leveraging Signatures of plant functional Strategies in Wood Density Profiles of African Trees to correct Mass estimations from terrestrial Laser Data. *Sci. Rep.* 10, 1–11.

Momo Takoudjou, S., 2019. Utilisation de l'imagerie 3D pour l'estimation indirecte de la biomasse aérienne des arbres de la forêt semi-décidue du sud-est du Cameroun. Université de Yaoundé I, Yaoundé.

Morton, D.C., Nagol, J., Carabajal, C.C., Rosette, J., Palace, M., Cook, B.D., Vermote, E.F., Harding, D.J., North, P.R.J., 2014. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. *Nature* 506, 221–224. <https://doi.org/10.1038/nature13006>

Myneni, R.B., Yang, W., Nemani, R.R., Huete, A.R., Dickinson, R.E., Knyazikhin, Y., Didan, K., Fu, R., Negrón Juárez, R.I., Saatchi, S.S., Hashimoto, H., Ichii, K., Shabanov, N.V., Tan, B., Ratana, P., Privette, J.L., Morisette, J.T., Vermote, E.F., Roy, D.P., Wolfe, R.E., Friedl, M.A., Running, S.W., Votava, P., El-Saleous, N., Devadiga, S., Su, Y., Salomonson, V.V., 2007. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 4820–4823. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611338104>

Ploton, P., 2017. Improving tropical forest aboveground biomass estimations: insights from canopy trees structure and spatial organization. AgroParisTech.

Ploton, P., Barbier, N., Couteron, P., Antin, C.M., Ayyappan, N., Balachandran, N., Barathan, N., Bastin, J.-F., Chuyong, G., Dauby, G., Droissart, V., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Kamdem, N.G., Kenfack, D., Libalah, M., Mofack, G., Momo, S.T., Pargal, S., Petronelli, P., Proisy, C., Réjou-Méchain, M., Sonké, B., Texier, N., Thomas, D., Verley, P., Zebaze Dongmo, D., Berger, U., Pélissier, R., 2017. Toward a general tropical forest biomass prediction model from very high resolution optical satellite images. *Remote Sens. Environ.* 200, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.001>

Ploton, P., Barbier, N., Momo, S.T., Réjou-Méchain, M., Boyemba Bosela, F., Chuyong, G., Dauby, G., Droissart, V., Fayolle, A., Goodman, R.C., Henry, M., Kamdem, N.G., Katembo Mukirania, J., Kenfack, D., Libalah, M., Ngomanda, A., Rossi, V., Sonké, B., Texier, N., Thomas, D., Zebaze, D., Couteron, P., Berger, U., Pélissier, R., 2015. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: accounting for crown mass variation in pantropical allometries. *Biogeosciences Discuss.* 12, 19711–19750. <https://doi.org/10.5194/bgd-12-19711-2015>

Ploton, P., Mortier, F., Barbier, N., Cornu, G., Réjou-Méchain, M., Rossi, V., Alonso, A., Bastin, J.-F., Bayol, N., Benedet, F., others, 2020a. A map of African humid tropical forest aboveground biomass derived from management inventories. *Sci. Data* 7, 1–13.

Ploton, P., Mortier, F., Réjou-Méchain, M., Barbier, N., Picard, N., Rossi, V., Dormann, C., Cornu, G., Viennois, G., Bayol, N., 2020b. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. *Nat. Commun.* 11, 1–11.

Ploton, P., Pélissier, R., Barbier, N., Proisy, C., Ramesh, B., Couteron, P., 2013. Canopy texture analysis for large-scale assessments of tropical forest stand structure and biomass, in: *Treetops at Risk*. Springer New York, pp. 237–245.

Ploton, P., Pélissier, R., Proisy, C., Flavenot, T., Barbier, N., Rai, S.N., Couteron, P., 2012. Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images. *Ecol. Appl.* 22, 993–1003.

Proisy, C., Barbier, N., Gastellu-Etchegorry, J.P., Guérault, M., Grau, E., Pélissier, R., Couteron, P., 2012. Biomass Prediction in Tropical Forests: the Canopy Grain Approach, in: In: Temilola, D, Fatoyindo, E. (Eds). *Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications / Book 1*. Intech, Shangai, pp. 59–76.

Proisy, C., Couteron, P., Fromard, F., 2007. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images. *Remote Sens. Environ.* 109, 379–392.

Reiche, J., Mullissa, A., Slagter, B., Gou, Y., Tsendbazar, N.-E., Odongo-Braun, C., Vollrath, A., Weisse, M.J., Stolle, F., Pickens, A., 2021. Forest disturbance alerts for the Congo Basin using Sentinel-1. *Environ. Res. Lett.* 16, 024005.

Réjou-Méchain, M., Barbier, N., Couteron, P., Ploton, P., Vincent, G., Herold, M., Mermoz, S., Saatchi, S., Chave, J., de Boissieu, F., 2019. Upscaling forest biomass from field to satellite measurements: Sources of errors and ways to reduce them. *Surv. Geophys.* 40, 881–911.

Réjou-Méchain, M., Mortier, F., Bastin, J.-F., Cornu, G., Barbier, N., Bayol, N., Bénédet, F., Bry, X., Dauby, G., Deblauwe, V., others, 2021. Unveiling African rainforest composition and vulnerability to global change. *Nature* 593, 90–94.

Restrepo-Coupe, N., Levine, N.M., Christoffersen, B.O., Albert, L.P., Wu, J., Costa, M.H., Galbraith, D., Imbuzeiro, H., Martins, G., da Araujo, A.C., 2017. Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison. *Glob. Change Biol.* 23, 191–208.

Rietkerk, M., Dekker, S.C., de Ruiter, P.C., van de Koppel, J., 2004. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science* 305, 1926–1929.

Roy, D.P., Zhang, H.K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Sun, Q., Li, J., Huang, H., Kovalskyy, V., 2016. A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sens. Environ.* 176, 255–271.

Rodda, S.R., Fararoda, R., Gopalakrishnan, R., Jha, N., Réjou-Méchain, M., Couteron, P., Barbier, N., Alfonso, A., Bako, O., Bassama, P., 2024. LiDAR-based reference aboveground biomass maps for tropical forests of South Asia and Central Africa. *Scientific Data* 11, 334.

Sabatier, D., 1983. Fructification et dissémination en forêt guyanaise. L'exemple Quelques Espèces Ligneuses These Dr. L'Université USTL Fr.

Sagang, L.B.T., Ploton, P., Sonké, B., Poilvé, H., Couteron, P., Barbier, N., 2020. Airborne lidar sampling pivotal for accurate regional agb predictions from multispectral images in forest-savanna landscapes. *Remote Sens.* 12, 1637.

Sagang, L.B.T., Ploton, P., Viennois, G., Féret, J.-B., Sonké, B., Couteron, P., Barbier, N., 2022. Monitoring vegetation dynamics with open earth observation tools: the case of fire-modulated savanna to forest transitions in Central Africa. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 188, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.04.008>

Sagang Takougoum, L.B., 2022. Monitoring forest-savanna dynamics in the Guineo-Congolian transition area of the Central Region of Cameroon (PhD in Plant Biology). Yaoundé 1.

- Sagang Takougoum, L.B., Momo Takoudjou, S., Libalah, M.B., Rossi, V., Fonton, N., Mofack, G.I., Kamdem, N.G., Nguetsop, V.F., Sonké, B., Ploton, P., Barbier, N., 2018. Using volume-weighted average wood specific gravity of trees reduces bias in aboveground biomass predictions from forest volume data. *For. Ecol. Manag.* 424, 519–528.
- Saleska, S.R., Miller, S.D., Matross, D.M., Goulden, M.L., Wofsy, S.C., Da Rocha, H.R., De Camargo, P.B., Crill, P., Daube, B.C., De Freitas, H.C., 2003. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science* 302, 1554–1557.
- Sherratt, J.A., Lord, G.J., 2007. Nonlinear dynamics and pattern bifurcations in a model for vegetation stripes in semi-arid environments. *Theor. Popul. Biol.* 71, 1–11.
- Sirri, N.F., Libalah, M.B., Momo, S.T., Ploton, P., Medjibe, V., Kamdem, N.G., Mofack, G., Sonké, B., Barbier, N., 2019. Allometric Models to Estimate Leaf Area for Tropical African Broadleaved Forests [WWW Document]. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2019GL083514>
- Takoudjou, S.M., Ploton, P., Sonké, B., Hackenberg, J., Griffon, S., De Coligny, F., Kamdem, N.G., Libalah, M., Mofack, G.I., Le Moguédec, G., Pelissier, R., Barbier, N., 2018. Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods Ecol. Evol.* 9, 905–916.
- Tongway, D.J., Valentin, C., Seghieri, J., 2001. *Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments*. Springer-Verlag, New York.
- Viennois, G., 2011. *Cartographie de la phénologie des forêts tropicales humides en Afrique centrale*. CEA AgroParisTech en Géomatique, Montpellier.
- Viennois, G., Barbier, N., Fabre, I., Couteron, P., 2013. Multiresolution quantification of deciduousness in West-Central African forests. *Biogeosciences* 10, 6957–6967. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6957-2013>
- Viennois, G., Stévant, T., Weghe, J.P.V., Saatchi, S., Schill, S., Aldous, A., Paiz, M.-C., Boupoya, A., Barbier, N., 2017. Cartographie de la végétation, in: *Le Delta de l’Ogooué*. Agence Nationale des Parcs Nationaux.
- Vincent, G., Antin, C., Laurans, M., Heurtebize, J., Durrieu, S., Lavalley, C., Dauzat, J., 2017. Mapping plant area index of tropical evergreen forest by airborne laser scanning. A cross-validation study using LAI2200 optical sensor. *Remote Sens. Environ.* 198, 254–266.
- Vincent, G., Verley, P., Brede, B., Delaitre, G., Maurent, E., Ball, J., Clocher, I., Barbier, N., 2023. Multi-sensor airborne lidar requires intercalibration for consistent estimation of light attenuation and plant area density. *Remote Sens. Environ.* 286, 113442. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113442>

White, L.J.T., Masudi, E.B., Ndongu, J.D., Matondo, R., Soudan-Nonault, A., Ngomanda, A., Averti, I.S., Ewango, C.E.N., Sonké, B., Lewis, S.L., 2021. Congo Basin rainforest — invest US\$150 million in science. *Nature* 598, 411–414. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02818-7>

Wright, S.J., Vanschaik, C.P., 1994. Light and the Phenology of Tropical Trees. *Am. Nat.* 143, 192–199.

Wu, J., Albert, L.P., Lopes, A.P., Restrepo-Coupe, N., Hayek, M., Wiedemann, K.T., Guan, K., Stark, S.C., Christoffersen, B., Prohaska, N., others, 2016. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. *Science* 351, 972–976.

Wu, J., Chavana-Bryant, C., Prohaska, N., Serbin, S.P., Guan, K., Albert, L.P., Yang, X., van Leeuwen, W.J., Garnello, A.J., Martins, G., 2017. Convergence in relationships between leaf traits, spectra and age across diverse canopy environments and two contrasting tropical forests. *New Phytol.* 214, 1033–1048.

Wu, J., Rogers, A., Albert, L.P., Ely, K., Prohaska, N., Wolfe, B.T., Oliveira Jr, R.C., Saleska, S.R., Serbin, S.P., 2019. Leaf reflectance spectroscopy captures variation in carboxylation capacity across species, canopy environment and leaf age in lowland moist tropical forests. *New Phytol.* 224, 663–674.

Yedmel, M.S.C., Kadio, A.A., Hardy, O.J., Kouame, N.G.F., Barbier, N.S., 2010. Impact du feu sur la structure et la composition floristique dun peuplement forestier de Cote d'Ivoire et interaction avec les traitements sylvicoles. *Can. J. For. Res.* 40, 1904–1913.

THESE EN FRANÇAIS (SANS FIGURES)

7 RECHERCHES ANTÉRIEURES

7.1 CADRE GENERAL

L'objectif principal de mes recherches est de comprendre la dynamique de la végétation à des échelles spatiales (paysage, région...) et temporelles (saison-décennie) pertinentes pour la gestion, la conservation et la modélisation mécaniste de ces systèmes sous l'effet des forçages climatiques et anthropiques. Le lien entre l'architecture et le fonctionnement des plantes et la structure et la dynamique de la végétation est central dans mon questionnement. Comprendre comment la structure, le fonctionnement des plantes et les interactions entre plantes génèrent des dynamiques émergentes à large échelle peut nécessiter de recourir à des modèles biophysiques pour saisir les mécanismes souvent non linéaires qui sont en jeu.

Je m'attelle également à l'amélioration des approches de télédétection (principalement optique active et passive), pour le potentiel qu'elles offrent pour le passage à l'échelle, bien que la sensibilité et la propagation des erreurs, les effets instrumentaux et les indicateurs pertinents nécessitent d'être considérées avec soin, ce qui peut aussi impliquer d'employer des approches statistiques spatialement explicites ou à la modélisation du transfert radiatif.

Dans les sections suivantes, je résumerai mes recherches passées et en cours sur des écosystèmes tropicaux contrastés, avant de synthétiser l'originalité de ma contribution en tant que chercheur et directeur de recherche.

7.2 ETUDE DES SYSTEMES SEMI-ARIDES

Au cours de mon mémoire de fin d'études sur la caractérisation des végétations du Nord Bénin avec Jean Lejoly et Brice Sinsin (Barbier, 2001), puis de missions de cartographie dans l'ensemble protégé transfrontalier du WAP au Niger, Burkina Faso et Bénin en compagnie de Gérard de Wispelaere, j'ai été frappé par le degré d'hétérogénéité locale du couvert végétal des savanes soudano-sahéliennes. Les plages de sol nu contrastaient fortement avec des zones de graminées denses ou des fourrés ligneux. L'intérêt de lier l'écologie spatiale et fonctionnelle pour construire un sujet de thèse de doctorat a tout de suite paru évident. Marqués par les concepts classiques de la phytosociologie, nous recherchions a priori les origines de cette hétérogénéité dans des variations nécessairement édaphiques : affleurements de cuirasse (bowé), termitières, microtopographie, caténas, variations de texture du sol, etc.

La rencontre avec Pierre Couteron, qui avait depuis peu terminé sa thèse sur les « Relations spatiales entre individus et structure d'ensemble dans des peuplements ligneux soudano-sahéliens au nord-ouest du Burkina-Faso » (Couteron, 1998) a permis d'orienter ma thèse vers

l'étude des mécanismes endogènes de structuration de la végétation. Après avoir obtenu des photos aériennes de la zone d'étude (le parc du W au Niger), nous avons en effet réalisé que l'ensemble était parsemé de structures régulières tachetées et tigrées. Ces structures de végétation que l'on trouve dans la plupart des zones semi-arides chaudes présentent des motifs en bandes, labyrinthes ou taches, dans lesquels des bosquets de végétation dense contrastent avec une matrice de sol nu, à des échelles spatiales s'étendant sur des dizaines ou des centaines de mètres. Ces structures sont donc clairement visibles depuis le ciel, ce qui explique leur découverte dans les années 1950 lors des premières campagnes de photographies aériennes. Même si ce n'est pas leur dénomination la plus commune, je les appellerai dans la suite de ce document les patrons de végétation périodiques (PVPs).

L'essentiel des recherches menées sur les PVPs depuis leur découverte avait été porté par deux disciplines distinctes. D'un côté des hydrologues de terrain (d'Herbès et al., 1997; Tongway et al., 2001), et de l'autre des mathématiciens ou physiciens modélisateurs (Borgogno et al., 2009). Ces disciplines n'avaient de fait qu'assez peu échangé. Par chance, l'équipe de René Lefever, et en particulier Olivier Lejeune –tout juste docteur (Lejeune, 1999), travaillait à l'ULB sur la modélisation mathématique de la morphogénèse de ces végétations semi-arides. Pierre Couteron avait déjà initié la collaboration (Couteron and Lejeune, 2001). Il avait par ailleurs adapté des outils d'analyse d'image basés sur la transformée de Fourier, qui permettaient d'extraire des indicateurs quantitatifs sur les structures et leur dynamique (Couteron, 2002). Nous avons un accès unique au terrain nigérien via à l'appui et les compétences du laboratoire de Mahamane Saadou et Ali Mahamane d'une part, et le soutien logistique du projet ECOPAS (UE) d'autre part. En milieu de thèse, j'ai également eu la chance de pouvoir co-encadrer Vincent Deblauwe, qui démarrait sa thèse à l'ULB (Deblauwe, 2010). Je me trouvais ainsi à la conjonction entre un site de terrain extraordinaire, un partenariat dynamique, un entourage d'experts de premier plan dans des disciplines complémentaires (écologie/botanique de terrain, télédétection, modélisation mathématique) et un cadre théorique stimulant.

Pour résumer notre étude de l'émergence des PVPs, j'ai positionné les différentes approches utilisées au cours de ma recherche doctorale et de celle de Vincent Deblauwe, le long des deux axes des échelles spatiales et temporelles (Figure 2). Ce graphique montre en un coup d'œil l'imbrication des études à l'échelle locale, qui fournissent des informations sur les processus biologiques, et la dynamique des écosystèmes à grande échelle et à long terme, qui peut être caractérisée par des approches de télédétection. Le transfert d'échelle a été permis par les modèles théoriques.

7.2.1 MODELISATION MECANISTE

Des modèles mathématiques sont fréquemment utilisés pour représenter la dynamique de structures spatiales auto-organisées dissipatives⁸ (Couteron, 2023). Les plus connus sont les modèles de réaction-diffusion de Turing, mais ce ne sont pas les seuls. Plus généralement, on utilise un système d'équations (intégré-)différentielles partielles pour représenter l'évolution des variables d'intérêt en prenant en compte des effets spatiaux. Un certain nombre de modèles de ce type ont été publiés pour étudier le phénomène des PVPs (Borgogno et al., 2009; Klausmeier, 1999). Dans ces modèles continus, la biomasse végétale est généralement approximée par une densité locale, tout comme la ressource limitante – habituellement l'eau. Ces modèles permettent de relier un large éventail de patrons spatialement périodiques observés dans la nature dans un cadre théorique simple. Ils offrent qui plus est une explication mécaniste intéressante, dans laquelle les motifs émergent de processus endogènes, au lieu de refléter l'hétérogénéité pré-existante du substrat.

Les mécanismes précis en jeu sont encore débattus et varient peut-être entre sites, mais le fait qu'ils impliquent des interactions entre les plantes et se produisent à une échelle locale par le biais du bilan hydrique du sol fait globalement consensus. Indépendamment du mécanisme et des choix de modélisation, deux ingrédients sont nécessaires à l'émergence de patrons périodiques : (i) la portée d'activation (e.g. facilitation ou diffusion d'un activateur) doit être moins grande que la portée d'inhibition (compétition) et (ii) les mécanismes doivent induire des boucles de rétroaction. Dans le modèle développé à l'ULB, le ruissellement et la diffusion de l'eau ne sont pas directement pris en compte à la différence d'autres modèles existants (Couteron and Lejeune, 2001; Lefever et al., 2009). On suppose que la plante (plus précisément la densité de biomasse en un point) interagit spatialement avec son voisinage via un kernel dont l'effet est positif à courte portée et négatif à une distance plus importante (Figure 3). Ces effets sont supposés être induits par les structure épigées (ombrage, litière, activité biologique) sous la couronne pour la facilitation, et par les racines traçantes au-delà pour la compétition.

L'émergence de motifs périodiques et leurs caractéristiques (symétrie, échelle spatiale, migration des bandes vers le haut de la pente, etc.) sont modulés par la productivité et/ou la mortalité des plantes, dont la variation peut représenter l'effet d'un stress climatique ou d'une pression d'extraction (pâturage, bois de chauffe). Certains modèles représentent explicitement l'effet de perturbations stochastiques (feux) ou un stress induit par une distribution irrégulière des apports en eau (D'Odorico et al., 2006). Dans ce cadre, la géométrie des formes peut être utilisée comme un indicateur de l'état du système, et

⁸ Dissipatives = se produisant loin de l'équilibre dans des systèmes thermodynamiques ouverts

notamment du risque de passage imminent d'un état stable à un autre (Rietkerk et al., 2004), comme l'effondrement tant redouté d'un état végétalisé vers le désert. L'existence d'hystérèses, avec des transitions difficilement réversibles entre certains états (notamment l'état désertique), est en effet une prédiction forte. Au sein de l'état végétalisé, la plupart des modèles prédisent pour une aridité croissante (sur terrain plat et homogène) une séquence progressive passant par des structures périodiques présentant des trous, puis des labyrinthes et enfin des bosses. En cas d'anisotropie du milieu, comme une légère pente topographique, les différentes structures se réorganisent en bandes perpendiculaires à la pente, et qui se déplacent vers l'amont (Figure 4).

Il est évidemment essentiel de pouvoir faire le lien entre modèles et réalité, à la fois pour la construction/calibration et pour la vérification des prédictions, que ce soit au niveau des mécanismes sous-jacents ou des dynamiques du système. J'ai eu la chance de pouvoir participer activement à cet effort, et d'être associé ainsi à des articles de modélisation (D'Odorico et al., 2006; Lefever et al., 2009), co-publiés avec de modélisateurs (Barbier et al., 2008) ou de façon plus générale, d'envisager l'ensemble des actions de recherche dans l'optique du cadre théorique offert par les modèles d'auto-organisation. Les sections qui suivent résument nos efforts pour tester les hypothèses constitutives de ce cadre théorique à différentes échelles, via des approches de télédétection et de terrain.

7.2.2 TELEDETECTION ET ANALYSE SPATIALE

Pour comparer les dynamiques spatiales et temporelles observées avec les prédictions des modèles d'auto-organisation, nous avons besoin d'une méthode d'analyse d'images permettant de caractériser des patrons spatiaux en termes de longueur d'onde, d'orientation et d'anisotropie. La nature spatialement périodique des patrons se prêtait tout naturellement à l'utilisation d'une approche basée sur la transformée de Fourier, qui vise précisément à caractériser des structures sur base d'une décomposition en fonctions périodiques sinusoïdales. Afin d'extraire les propriétés de la structure à l'échelle du peuplement et en comparer les variations dans le paysage, nous avons opté pour une analyse localisée par fenêtres glissantes (analogue en deux dimensions à la short-time Fourier transform, ou à la transformée de Gabor).

Dans une première étude diachronique au SW Niger (Barbier et al., 2006, 2014b), nous nous sommes intéressés à l'apparition de patrons périodiques, sans distinguer les structure selon leur niveau d'anisotropie. Nous avons pu bénéficier de photographies aériennes anciennes (datant de 1956, 1976 et 1996) mais également d'images panchromatiques Spot d'archive couvrant la zone protégée du parc du W et les zones environnantes. Nous avons ainsi pu étudier l'effet du changement climatique et des pressions anthropiques grandissantes sur l'apparition de structures. La signature de la structuration spatiale du couvert a été caractérisée via le r-spectre (moyenne azimutale du périodogramme 2D pour des intervalles

de fréquence) de fenêtres de 300 m de côté. La méthode d'ordination texturale par transformée de Fourier (que nous avons plus tard appelée FOTO) (Couteron, 2002; Couteron et al., 2006), et des classifications non-supervisées ont permis d'extraire l'essentiel des informations contenues dans le tableau multi-date des r-spectres (Figure 5, Figure 1).

Un résultat marquant a été de mettre en évidence le doublement des superficies couvertes par des structures spatialement périodiques, en lien avec la pluviométrie des années antérieures, et ce de manière plus marquée dans les zones non-protégées hors du parc national (Figure 6). Du fait de la tendance quasi-continue (à la hausse) du phénomène, il n'a pas été possible d'identifier de durée optimale d'intégration temporelle des données pluviométriques pour expliquer l'abondance des patrons tachetés dans le paysage. On voit en effet que le R^2 du modèle reliant la proportion de zones tachetées à la moyenne de la pluviométrie ne fait qu'augmenter avec la durée d'intégration.

Dans une autre étude diachronique (Barbier et al., 2014b; Deblauwe et al., 2011), menée au Sud Soudan avec Vincent Deblauwe, nous sommes allés plus loin en distinguant différents niveaux d'anisotropie des patrons. En plus du r-spectre, nous avons pour cela analysé le spectre angulaire (i.e. la moyenne du périodogramme 2D par secteur angulaire), afin de distinguer les patrons à bandes parallèles des autres structures plus isotropes (Figure 7). Pour opérer la distinction entre les différentes géométries isotropes (bosses, trous et labyrinthes), nous nous sommes simplement basés sur la skewness de l'histogramme des niveaux de gris.

Nous avons ainsi pu montrer à la fois dans l'espace (Figure 8) et dans le temps (Figure 9) que la modulation des structures par l'aridité suivait bien la succession attendue (trous-labyrinthes-bosses, cf. Figure 4). Les bosses étaient, soit dit en passant, observées pour la première fois dans la nature. Les structures en bandes parallèles (brousses tigrées) apparaissent sur des pentes plus marquées ($>0.25\%$) (Figure 10, Figure 11), mais le seuil critique de pente dépend de l'aridité (Figure 11). Au-delà et en-deçà de certains niveaux d'aridité, les structures isotropes peuvent se maintenir même sur des pentes de 1%. La longueur d'onde des structures augmente globalement avec l'aridité, et dans une moindre mesure avec la pente.

Nous n'avons pas pu démontrer la présence d'hystérèse, et même pu observer dans quelques cas des réapparitions de bosses dans des champs abandonnés. Même si ce point nécessiterait une étude plus approfondie, on peut d'ores et déjà conjecturer sur le fait que les modèles d'auto-organisation, qui se focalisent sur les interactions végétation/ressources, ne prennent de fait pas en compte toute la complexité du système. L'amélioration des propriétés structurelles et du contenu en matière organique du sol peut présenter une certaine mémoire, et se maintenir quelques temps après défrichement. L'activité biologique, notamment des termites, peut de plus mener à des variations des classes texturales du sol qui peuvent subsister indéfiniment. Il existe d'ailleurs des patrons en bosses et en trous entièrement

induits par la présence de nids. Il n'est donc pas toujours aisé de distinguer a priori les structures endogènes de la végétation de celles induites par les insectes sociaux. J'ai ainsi passé plusieurs semaines en Zambie en 2007 à visiter des dizaines de sites de patrons périodiques potentiellement intéressants, qui au final étaient tous directement attribuables à l'effet de nids de termites. Pour tester formellement notre *a priori* que les structures à trous du SW Niger étaient bien endogènes à la végétation, j'ai encadré un doctorant nigérien, Abdoulaye Diouf, avec qui nous avons cartographié (Figure 12) la topographie et les ligneux sur un hectare de brousse tachetée (Diouf et al., 2010). J'ai alors utilisé des analyses cross-spectrales qui permettent d'étudier la co-structure entre des signaux. L'analyse permet d'identifier à la fois la corrélation mais aussi le déphasage entre structures, en tenant compte de l'échelle spatiale (Nicolas Barbier et al., 2010). Nous avons ainsi pu démontrer une absence de corrélation entre le patron de végétation et la topographie (y compris des indices d'humidité topographiques), confirmant ainsi la nature endogène de la structure périodique émergente pour ce site. Les limites de ce qui est humainement faisable avec un théodolite dans les conditions de température extrêmes du Niger expliquent la faible superficie de la zone étudiée. Avec les moyens d'aujourd'hui (drones, LiDAR, etc), il serait possible d'aller beaucoup plus loin dans ce type d'étude.

Un autre phénomène intéressant prédit par les modèles d'auto-organisation concerne la migration des bandes vers l'amont. Ici, avec Vincent Deblauwe, nous avons étudié les dynamiques temporelles de brousses tigrées sur des sites localisés sur trois continents (Deblauwe et al., 2012). Nous avons encore employé l'analyse cross-spectrale, dans ce cas-ci entre images de dates différentes, pour détecter la vitesse de migration (= déphasage) des bandes. Pour la moitié (3) des sites étudiés, une migration des bandes est clairement observable, avec des vitesses allant jusqu'à 1 m par an ! La vitesse de migration est directement proportionnelle à l'échelle du motif (longueur d'onde) (Figure 13), tel que prédit par certains modèles d'auto-organisation (Sherratt and Lord, 2007). Une séquence de photographies aériennes du désert de Chihuahua montre cependant que la migration n'est pas un processus continu, mais intermittent en réponse à des régimes climatiques fluctuants (Figure 14). La vitesse à laquelle les bandes s'étendent en amont et se contractent en aval est mieux prédite par la variance des précipitations annuelles que par leur niveau moyen. Cependant, la migration des bandes ne peut pas être considérée comme systématique, car dans nos observations de trois autres systèmes en bandes, la migration était indétectable à la résolution des images disponibles (e.g. Broken Hill, Figure 13). Dans chacun des six sites étudiés, la valeur modale des axes d'orientation des bandes a été vérifiée comme étant approximativement orthogonale à la pente la plus raide. Vincent Deblauwe a cependant pu identifier sur certains sites une déviation systématique semblant induite par la direction des vents dominants.

Un dernier travail majeur effectué avec Vincent Deblauwe a été de produire un modèle de distribution potentielle des PVPs des régions semi-arides chaudes, basé sur le modèle de

distribution potentielle Maxent (Deblauwe et al., 2008). Ce travail remarqué nous a notamment permis de découvrir de nouvelles localités d'occurrence, mais aussi d'identifier les principaux drivers environnementaux conduisant à l'émergence de ce type de structures. L'indice d'humidité, donné par le rapport entre les précipitations annuelles moyennes sur l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne, était le prédicteur représentant la plus grande part indépendante de la variance expliquée par le modèle de distribution potentielle.

Comme on peut le voir, l'étude détaillée de la dynamique spatio-temporelle des structures auto-organisées est riche en enseignements, à la fois sur les déterminants et sur les mécanismes possibles. Il faut cependant nécessairement la coupler à un cadre de modélisation théorique d'une part, et à l'étude -forcément plus locale- des mécanismes d'interactions (1.2.3)

7.2.3 ALLOMETRIE COURONNE/RACINES ET INTERACTIONS ENTRE PLANTES

Pour comprendre les mécanismes d'interaction provoquant l'émergence de structures auto-organisées spatialement périodiques dans les végétations semi-arides (Figure 16), nous avons cherché à caractériser les interactions spatiales entre plantes, telles que médiées par leurs structures souterraines et aériennes. Un mécanisme possible expliquant les patrons suppose en effet une facilitation locale et une compétition à plus longue distance, ce qui se traduit par un noyau d'interaction autour de chaque arbre (Figure 3). Ce travail a commencé par des observations directes de la morphologie des arbres sur un site de végétation tachetée dans le parc du W au SW Niger (Figure 17). Nous avons, avec Pierre Couteron, patiemment excavé et cartographié les systèmes racinaires de plusieurs arbustes de l'espèce dominante (*Combretum micranthum*) (Figure 18). Les données obtenues ont permis de calibrer des modèles allométriques reliant les extensions latérales des couronnes à celles des racines. Nous avons ainsi pu observer *in vivo* des ratios d'extension compatibles avec un noyau permettant d'induire l'émergence de patrons similaires (Barbier, 2006; Barbier et al., 2014a, 2008). Les observations ont cependant été limitées (en raison de contraintes techniques d'excavation avec une lance à air comprimé) aux racines d'une section supérieure à 1 mm et ont donc négligé les éventuelles interactions mycorhiziennes.

Pour aller au-delà de la morphologie des plantes et établir sans équivoque l'importance fonctionnelle des interactions spatiales des plantes, deux questions ont dû être abordées : (i) la dynamique de la principale ressource limitante (l'eau du sol) reflète-t-elle les effets supposés des kernels des plantes, (ii) les racines acquièrent-elles effectivement de l'eau sur de grandes étendues, dans différents contextes de végétation (ouverte/dense).

Pour répondre à la première question, la dynamique spatiale et temporelle du bilan hydrique du sol dans la zone racinaire (peu profonde) a été suivie pendant toute une saison des pluies sur la base d'un réseau de capteurs d'humidité du sol (blocs de gypse). La dynamique observée du bilan hydrique du sol était clairement compatible avec un mécanisme d'atténuation de

l'évaporation sous les canopées des arbres (Figure 20). Cependant je n'ai pas réussi à ajuster de façon satisfaisante la portée des kernels sur base d'une modélisation simplifiée de la position et des dimensions des arbres. Un autre mécanisme souvent préconisé, qui implique l'infiltration différentielle et le ruissellement de l'eau (Borgogno et al., 2009), peut être rejeté sur notre site d'étude, puisque l'on voit clairement que la recharge après les principaux épisodes pluvieux de l'année est homogène dans la zone racinaire.

La deuxième question a été abordée en utilisant un marquage au deutérium. J'ai en effet initié une collaboration avec Thierry Bariac au laboratoire Bioemco (Biogéochimie et écologie des milieux continentaux). J'ai pu mobiliser des fonds pour amener un millier de piluliers et trois litres d'eau lourde au Niger. Celle-ci a été utilisée pour irriguer le centre d'une zone nue et d'un fourré dense en début de saison des pluies. Le marquage isotopique a ensuite été suivi tout au long de la saison, à la fois dans le sol et dans le xylème des plantes. J'ai ensuite patiemment distillé les échantillons (pendant des semaines) au laboratoire à Grignon. Les premiers résultats, très encourageants (Barbier, 2006), ont montré que le traceur avait contaminé les arbustes jusqu'à une distance de 15 m, sur les deux sites, avant sa diffusion dans la matrice du sol (Figure 19). Il s'agit donc d'un résultat majeur confirmant de manière effective la portée très importante de la compétition latérale entre ligneux dans cet écosystème. Cependant, à cause d'un taux trop élevé des marquages isotopiques dans certains échantillons, la spectrométrie de masse s'est avérée problématique (endommagement du réacteur du spectromètre), et les analyses n'ont pas été menées à terme, me privant d'une publication clé de ma thèse de doctorat.

Pour être complet sur la question des portées d'interaction racinaires, j'ai également participé à une expérimentation en Ecosse visant à tester une approche par impédance électrique pour mesurer les surfaces d'échange racinaire par secteurs angulaires autour de pins sylvestres (Butler et al., 2010). J'en ai néanmoins conclu que l'application à la question des brousses tigrées ne serait pas évidente, notamment parce que la résolution spatiale était trop faible.

7.2.4 INCURSIONS DANS LES SAVANES PYROPHILES ET LA QUESTION DES FEUX

Au cours de la thèse d'Abdoulaye Diouf, que j'ai co-dirigée (Diouf, 2012), nous avons mené un travail approfondi sur les régimes de feux dans le parc du W au Niger à l'aide d'une série temporelle d'images MODIS. Une première observation importante est que les feux ne pénètrent quasiment jamais dans les végétations à structures périodiques. De par la structuration et l'hétérogénéité de la strate graminéenne, ces végétations sont donc 'étanches' au feu. Dans les savanes pyrophiles, nous avons analysé, à l'aide d'équations structurelles (path analysis) les liens de causalité entre la structure du couvert ligneux, la composition physico-chimique des sols, et le régime d'incendies (Diouf et al., 2012).

La thèse de Le Bienfaiteur Sagang (sous ma co-direction, projet Nachtigal), nous a également permis d'étudier le lien entre le régime des feux et la dynamique de progression de forêts sur

la savane (Sagang et al., 2022; Sagang Takougoum, 2022). Sur base d'archives Landsat et d'algorithmes développés dans Google Earth Engine, nous avons pu mesurer relativement finement les dynamiques et points de bascule dans la fréquence des feux permettant ou non de contrôler l'envahissement ligneux (wood encroachment). En plus de fournir des recommandations de gestion à une aire protégée et à un projet de construction de barrage dans ses efforts de compensation d'impacts, cette étude a permis d'alimenter la modélisation mathématique des dynamiques forêt-savanes (thèses de Valaire Yatat et Alexis Tchunte, supervisées par Pierre Couteron). Plus récemment, au travers du mémoire de Mastère Silat de Imma Tcheferi, nous avons pu améliorer les algorithmes de détection des cicatrices de feux, qui sont à présent plus résolus spatialement grâce à l'utilisation d'images Sentinel 2, et plus robustes aux variations radiométriques entre dates.

J'évoquerai plus loin (cf.1.3.1.2), sur la question des feux de forêt, la collaboration avec Luis Aragão (Aragao et al., 2008). J'ai également eu l'occasion de superviser un doctorant ivoirien (Serge Yedmel) au cours d'une étude de la dynamique forestière post-incendie du site de la Téné, un site unique suivi depuis 1978 et partiellement brûlé en 1983 (Yedmel et al., 2010). Nous avons pu montrer que les modalités de traitements sylvicoles mises en place pour favoriser les espèces d'intérêt commercial avaient pu favoriser la susceptibilité au feu et ainsi entraîné des effets à long terme sur la structure et la composition floristique du peuplement.

7.3 ETUDE DES FORETS TROPICALES

A l'issue de ma thèse, j'ai eu l'ambition de me tourner vers un système plus compliqué, les forêts tropicales, où les patrons, la dynamique de la végétation et les processus sont plus difficiles à caractériser en raison de la taille et de la diversité des plantes qui les composent, mais aussi de problèmes techniques spécifiques pour imager les zones équatoriales. Malgré la suggestion ancienne de patrons spatiaux réguliers émergents dans la composition ou la structure de ces forêts (Aubréville, 1938), la vérité est que ces structures sont restées insaisissables. De même, des variations temporelles sous la forme de signatures phénologiques saisonnières ont été signalées, y compris dans les forêts sempervirentes, montrant des pics inattendus de verdissement pendant la saison sèche. Une interprétation écologique proposée était que ces forêts pourraient être limitée en lumière, plus qu'en eau, et que la saison sèche est généralement plus lumineuse (Huete et al., 2006; Saleska et al., 2003; Wright and Vanschaik, 1994). J'ai donc, dans un premier temps profité de mon expérience avec la transformée de Fourier pour analyser des signaux spatiaux et temporels en forêt dense pour tenter d'en inférer des structurations, pouvant éventuellement nous informer sur les processus écologiques à l'œuvre. Cependant, l'interprétation même de la signification du signal électromagnétique réfléchi par la forêt, et de l'impact des conditions d'acquisition a nécessité un aller-retour constant entre des mesures détaillées sur le terrain et les mesures de télédétection, y compris au travers de modèles physiques de transfert radiatif. Pour permettre des mesures détaillées à une échelle pertinente, nous avons de plus

en plus eu besoin de recourir à l'usage de drones et d'imagerie 3D (LiDAR et stéréophotogrammétrie).

7.3.1 ADAPTATION DE L'APPROCHE SPECTRALE AUX FORETS DENSES

7.3.1.1 ANALYSE TEXTURALE

Pierre Couteron, Raphaël Pélissier et Christophe Proisy avaient testé une approche par ordination texturale en Guyane pour prédire la structure forestière à partir de photographies aériennes panchromatiques ou d'images satellites à très haute résolution spatiale (THR) (Couteron et al., 2005; Proisy et al., 2007). La Figure 23 illustre le principe de l'approche, qui se base uniquement sur les r -spectres obtenus dans des fenêtres d'1ha environ (cf. 1.2.2). La méthode a plus tard été appelée FOTO (Fourier Transform Textural Ordination).

L'approche FOTO semblait prometteuse, en ce qu'elle permettait de prédire des niveaux de biomasse très élevés sans saturation apparente, contrairement aux approches basées sur l'information multispectrale et radar utilisées à l'époque. Plusieurs études sur des sites localisés en Inde, notamment, ont confirmé ce fait (Ploton et al., 2013, 2012; Proisy et al., 2012). L'enjeu était alors de tenter une application à plus large échelle. Au cours d'un séjour post-doctoral à Oxford, j'ai donc analysé un échantillon de 200 images optiques THR Quickbird disponibles en composition vraies-couleurs sur l'Amazonie via le globe virtuel Google Earth (N. Barbier et al., 2010). N'ayant pas de données de terrain à confronter à ces images, j'ai utilisé des simulations simplifiées basées sur des peuplements artificiels et le modèle de transfert radiatif DART pour interpréter les gradients de texture en terme structuraux (taille moyenne des arbres et hétérogénéité de la canopée). Il est cependant apparu dans cette étude que le signal textural était partiellement impacté par la géométrie d'acquisition (angles soleil-scène-capteur), même si l'effet semblait statistiquement contrôlable.

Ayant obtenu une bourse Marie-Curie pour poursuivre ces recherches à AMAP avec Pierre C. et Raphaël P., et profitant d'une collaboration avec le bureau d'étude FRM, qui disposait d'inventaires forestiers commerciaux sur de nombreuses concessions d'Afrique Centrale, je devais tenter la calibration avec de vraies données de terrain. Nous avons donc acheté toutes les images d'archive THR disponibles sur les zones inventoriées, et j'ai naïvement tenté le croisement avec les milliers de parcelles disponibles. Le résultat a été plus que décevant... Il n'y avait absolument aucun signal. Nous avons d'abord incriminé la précision dans la localisation des parcelles, qui n'était clairement pas suffisante. Les données étaient en effet collectées le long de transects levés à la boussole, avec des coordonnées prises avec des GPS d'entrée de gamme tous les 3 ou 4 kilomètres.

Nous avons alors entamé une longue quête (qui nous occupe encore aujourd'hui⁹), celle d'installer nous même un réseau de parcelles (1.3.3.1), mieux localisées (voir notre contribution au Chap. 3 dans Duncanson et al., 2021) et stratifiées le long de gradients de texture.

Entretemps, j'avais été recruté à l'IRD sur un profil *Physicien du signal et/ou modélisateur* (structure 3D des forêts tropicales humides, évaluation des stocks de carbone) dans la commission CGRA1 (devenue CSS5). Je commençais à tester la relation entre texture et structure sur ce nouveau jeu de données. Il s'avéra rapidement que nous avons aussi sous-estimé les problèmes instrumentaux (effet capteur et géométrie d'acquisition). Malheureusement, ayant acquis des images de ci de là, et ayant (douloureusement) saupoudré ces images individuelles de quelques parcelles (trois ou quatre tout au plus, c'est-à-dire le maximum humainement faisable en une mission de quinze jours en forêts), nous n'avons aucun contrôle sur l'interaction entre les gradients de structure forestière et les paramètres d'acquisition.

J'ai donc entrepris d'étudier les effets directionnels sur la texture d'images simulées. Le plus simple était de se baser sur des modèles de surface de canopée issus de données LiDAR¹⁰ aéroportées dont nous disposons en Guyane. L'ombrage pouvait être simulé crument avec un modèle de type *hillshade* (Barbier et al., 2011b). Cette étude m'a notamment permis de créer le concept de fonction bidirectionnelle de texture (BTF), analogue à la BRDF pour la réflectance, bien connue des télédéTECTEURS. J'ai par après employé une approche plus élaborée, en simulant des forêts en 3D à partir des paramètres mesurés sur le terrain (Barbier et al., 2011a), pour les intégrer dans le modèle de transfert radiatif DART (Barbier and Coueron, 2015). En parallèle, j'ai obtenu des images d'archive Ikonos répétées sur une même zone de forêt pour analyser la BTF sur des images réelles.

Ces études nous ont montré qu'au final les effets directionnels sur la texture peuvent être du même ordre de grandeur que les gradients texturaux induits par la variabilité des forêts étudiées. Il est donc indispensable de les prendre en compte. Le problème est que la forme de la fonction dépend de la structure forestière (Figure 25). Des plages angulaires éloignées de la configuration 'hotspot' (= soleil derrière le capteur) sont cependant moins impactées. Il est aussi possible d'obtenir directement des coefficients linéaires de correction des r-spectres sur des zones de recouvrement entre images, quand il y en a.

⁹ <https://central-african-plot-network.netlify.app>

¹⁰ LiDAR = Light Detection and Ranging : méthode d'imagerie 3D (télédétection active) basée sur un balayage de la scène par des impulsions laser.

Grâce à ces méthodes de correction/intercalibration, j'ai pu faire la preuve de concept d'une méthode diachronique de suivi des changements de texture de la canopée (Barbier and Coueron, 2015). Ces changements texturaux permettent de détecter des modifications assez subtiles, comme l'apparition de trouées d'abattage, l'ouverture de pistes, ou même la croissance des arbres. De premiers tests avec des données commerciales d'abattage au Cameroun (Société Alpicam) et au Congo (société CIB) ont montré qu'il était possible d'estimer les volumes exploités par cellule d'inventaire de 25 ha ($R^2=0.44$, RMSE : 16%) (Barbier et al., 2016). Nous tenions donc enfin un outil permettant potentiellement le suivi et la quantification, jusque-là extrêmement difficiles, de la dégradation forestière. Cependant, des méthodes basées sur le radar, moins sensibles à la nébulosité ont entretemps été développées, qui permettent un suivi en quasi temps réel avec des données gratuites, là où nous pouvions au mieux espérer une détection annuelle des changements (Aquino et al., 2022; Mercier et al., in prep; Reiche et al., 2021).

Lors d'une collaboration avec Jean-François Bastin, alors en thèse, nous avons également pu combiner des images de capteurs différents, dans des configurations géométriques contrastées, et obtenir des prédictions de biomasse très cohérentes (Bastin et al., 2015). Cependant nous avons dû surmonter un autre écueil : les relations texture-structure variaient notablement entre types forestiers (par exemple : forêts monodominantes ou forêt à Marantaceae). Au cours de la thèse de Pierre Ploton, nous avons continué à raffiner la recherche d'un modèle d'inversion de la biomasse généralisable à l'ensemble des forêts tropicales, basée sur des indices texturaux complémentaires (Ploton, 2017; Ploton et al., 2017).

L'intercalibration texturale nous a permis de générer des mosaïques de texture sur des zones importantes (plusieurs dizaines d'images SPOT 6 et 7), comme nous avons pu le tester au Cameroun et au Gabon (Figure 28) (Barbier et al., 2016; Viennois et al., 2017). Le signal textural de ces images ne s'est malheureusement pas avéré suffisant pour inverser la biomasse, malgré le réseau relativement dense de parcelles de calibration. Ces mosaïques permettent néanmoins une relativement bonne discrimination des types forestiers, même si nous avons depuis préféré l'utilisation d'images Sentinel 2 pour ce genre d'exercice. La gratuité, la fréquence temporelle et la richesse spectrale compensent en effet largement le gain de résolution spatiale relativement modeste offert par les images SPOT 6 et 7.

Ce travail a notamment bénéficié du financement d'un projet européen d'aide à l'innovation (Climate KIC *Forest*), porté par Airbus DS, dans lequel je me suis fortement investi. En plus de la collecte de données (une cinquantaine de parcelles d'1ha) et de l'analyse d'images THR, j'ai aussi pu collaborer à la mise au point de produits cartographiques (typologie, carbone, dégradation) commercialisables ainsi qu'à l'étude de marché. Dans cette optique, nous avons fait inscrire les codes de la méthode FOTO à l'Agence de Protection de Programmes. La conclusion du projet fut néanmoins que le prix du carbone sur le marché volontaire ne

permettait pas à l'époque de rentabiliser des produits qualitatifs et payants. Ce projet a également débouché sur un article (Joetzjer et al., 2017) porté par le LSCE (partenaire du projet) dans lequel la hauteur du peuplement estimée par FOTO devait servir de base à une inversion à haute résolution des différents pools de carbone par le modèle mécaniste (DGVM) Orchidée.

7.3.1.2 SIGNAL TEMPOREL ET PHENOLOGIE

Les analyse spectrales et cross-spectrales se prêtent bien évidemment à l'analyse de signaux temporels, notamment saisonniers. Lors de mon passage à Oxford, j'ai eu l'occasion de les appliquer à plusieurs thématiques. Une première analyse portait sur l'analyse des corrélations entre cycles de déforestation, de feux de forêt et de pluviométrie en Amazonie. L'article qui en a résulté est abondamment cité et a fait référence (Aragao et al., 2008). Une seconde collaboration marquante a porté sur l'étude des déterminants du signal saisonnier de verdissement apparent des forêts amazoniennes observé à l'aide de données optiques MODIS. Dans cette étude, nous sommes allés assez loin dans le traitement statistique pour la détection des cross-corrélations significatives (dans un contexte de 'bruit rouge'). Nous avons ainsi mis en évidence que l'indice de végétation EVI était presque en phase avec la radiation descendante sur l'ensemble des forêts, alors que les déphasages avec la pluviométrie étaient beaucoup plus variables spatialement. Ces résultats venaient affiner/confirmer une observation ornement débattue (Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007; Saleska et al., 2003), et qui sera plus amplement détaillée dans mon projet de recherche (2). En effet, le verdissement apparent des forêts sur les images satellite de saison sèche pourrait être plus prosaïquement causé par des corrections atmosphériques ou directionnelles imparfaites (Morton et al., 2014).

Au cours du projet Biodiversa *CoforChange*, porté par le CIRAD, nous avons cherché à transposer ces travaux sur la phénologie aux forêts d'Afrique Centrale. Cependant, il est rapidement apparu que la qualité des pré-traitements standards des données MODIS posait problème et impactait significativement le signal saisonnier. En effet les zones les plus fréquemment ennuagées et embrumées de la côte de Guinée présentaient un signal visiblement pollué. Un autre effet de l'ennuage fréquent était que les corrections des effets BRDF habituelles n'étaient pas disponibles. Après de longs mois à tenter d'améliorer ces corrections, nous avons changé d'approche, et tenté une analyse multi-échelles (spatiales) en nous focalisant sur les données de saison sèche et en nous basant sur les archives THR dont nous disposions (Figure 30) (Viennois et al., 2013). Ce fut d'ailleurs l'occasion de superviser la mobilité de Gaëlle Viennois, qui rejoignait AMAP et se formait à la télédétection (Viennois, 2011).

Nous avons notamment pu montrer que le signal EVI était linéairement corrélé à ce que nous avons interprété comme la proportion des arbres en feuilles sur les images plus résolues (Figure 31). Avec le recul, je pense que l'état phénologique du feuillage (jeunes feuilles) a

fortement joué sur ce résultat, et que plus que les arbres en feuilles, ce sont les flushes que nous cartographions avec l'EVI. Nous reviendrons sur ce point dans le projet de recherches (2). En tout état de cause, la carte produite présente une description très granulaire des schémas qualitatifs (types de forêts) et quantitatifs (proportion de décidus) dans la région étudiée, à cheval sur les frontières du Congo, du Gabon et du Cameroun (Figure 32) ¹¹. Plus tard, une collaboration avec Alexei Lyapustin (NASA) nous a permis d'obtenir des corrections améliorées des données MODIS grâce à l'algorithme MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction). La Figure 33 illustre une mosaïque que nous avons ainsi pu produire sur l'Afrique Centrale. Cependant, même avec ce produit, et en utilisant les bandes infrarouges les moins impactées par l'eau atmosphérique, on peut encore deviner l'effet des brumes à proximité de l'océan Atlantique vers l'Ouest.

7.3.2 STRATEGIES D'EXTRAPOLATION ET D'ECHANTILLONNAGE

A la suite du projet *CoforChange*, nous avons pu combiner les images MODIS pré-traitées avec MAIAC avec un jeu de données de terrain unique patiemment rassemblé par le CIRAD, et plus particulièrement par feu Sylvie Gourlet Fleury. Il s'agit de données d'inventaires commerciaux provenant de concessions forestières privées, et totalisant 11.8 millions d'arbres. Ces données sont en elles-mêmes extrêmement précieuses pour spatialiser les gradients de biomasse et de composition des forêts d'Afrique Centrale (Ploton et al., 2020a; Réjou-Méchain et al., 2021). Avec Pierre Ploton, nous les avons utilisées pour tenter une nouvelle extrapolation de la biomasse, espérant profiter de la combinaison de ce jeu unique de vérité-terrain, et d'images corrigées au mieux de l'état de l'art. C'est ainsi que nous avons pu mettre le doigt sur un problème méthodologique majeur qui entache la plupart des cartes à large échelle publiées dans la littérature écologique, y compris les cartes de biomasse (Ploton et al., 2020b). En effet, ces cartes extrapolent généralement des mesures locales à l'aide de variables environnementales ou satellites ayant un faible pouvoir prédictif. Le niveau de précision est très souvent grossièrement surestimé du fait d'un manque d'indépendance statistique entre données de validation et de calibration, induit par leur proximité spatiale (auto-corrélation). Le plus souvent en effet, les données de validation et de calibration proviennent d'un même jeu de données initial qui est réparti aléatoirement en deux groupes, et non pas de jeux de données réellement distincts. Une autre conclusion à tirer de cette analyse est que, même avec les meilleures corrections radiométriques, les données spectrales ne permettent pas d'extrapoler la biomasse à plus de quelques kilomètres des parcelles d'entraînement, une fois

¹¹ Nous avons depuis amélioré cet effort sur la même zone avec Pierre Ploton en extrapolant la proportion de d'arbre décidus dans les parcelles d'inventaire forestier à l'aide des données Sentinel 2 de saison sèche (résultat non publié, voir 2).

que ces problèmes statistiques sont correctement pris en compte (Figure 34) ; En tout cas avec des méthodes de *machine learning* traditionnelles.

Figure 34. Spatialisation du coefficient de détermination (R^2) montrant une décroissance en fonction de la distance des données de validation par rapport aux données de calibration.

Dans une autre étude, menée au Cameroun avec Le Bienfaiteur Sagang (Sagang et al., 2020), nous avons testé différents scénarios de calibration à l'aide d'un échantillonnage emboîté de parcelles de terrain, de données LiDAR aéroportées (ALS) et d'images Sentinel 2. Même si le pouvoir prédictif des données multispectrales en matière de biomasse est limité –comme nous venons de le voir– le fait de pouvoir produire une stratification (typologie) des types de végétation permet d'envisager un échantillonnage stratifié permettant une estimation par strate qui soit non-biaisée. Dans le débat sur l'échantillonnage model-based vs. design-based (McRoberts et al., 2015), lorsque le pouvoir prédictif des données satellite n'est pas suffisant, il est donc possible d'adopter une stratégie hybride.

7.3.3 MIEUX CONNAITRE LES FORETS ET LES ARBRES POUR COMPRENDRE LE SIGNAL

7.3.3.1 MISE EN PLACE D'UN RESEAU DE PARCELLES D'INVENTAIRE

Comme expliqué plus haut, nous avons -dès 2009- éprouvé le besoin de mettre en place un réseau de parcelles d'inventaire forestier dédié à la calibration des approches satellites et à une meilleure compréhension des gradients de structure forestière. Cet effort a été rendu possible grâce à la collaboration sans faille de Bonaventure Sonké et toute son équipe au Cameroun, et avec l'aide de Vincent Droissart, puis plus tard de Pierre Ploton puis Nicolas Texier, en VI à Yaoundé. D'autres partenariats (F. Boyemba et John Katembo à l'université de Kisangani, Tariq Stevart au MBG), nous ont aussi permis de collecter des données au Gabon et en RDC. Nous avons ainsi entrepris d'installer des parcelles de 1 ha dans des zones de forêts naturelles de terre ferme relativement intactes où nous pouvions acquérir des images. Nous avons depuis élargi les inventaires à tous types de végétations (y compris dégradées, marécageuses ou savaniques). L'accès à ces zones reculées peut s'avérer extrêmement éprouvant, et il faut souvent plusieurs jours pour arriver aux zones d'intérêt.

Dans les parcelles, le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) est mesuré pour tous les arbres de plus de 10 cm de DBH. Le protocole de mesure comprend également d'autres mesures structurales pertinentes comme la hauteur des arbres ou les dimensions de houppiers, pour un échantillon d'arbres. Durant les toutes premières missions, nous avons cru bon de faire l'impasse sur l'identification et le marquage des arbres. Nous avons cependant rapidement pris conscience que cela ne prenait pas beaucoup plus de temps de suivre les standards scientifiques internationaux (repris dans les réseaux RAINFOR et Afritrion par exemples). Cela nécessite seulement de coordonner une équipe de taille suffisante pour marquer, numéroter,

identifier et prendre des échantillons d'herbier, d'ADN, et de sol. Ainsi, les parcelles mises en place permettent des synergies avec de multiples autres questions d'intérêt portant sur l'écologies des communautés, la botanique systématique, l'évolution, l'écologie fonctionnelle, la pédologie, la dynamique forestière, etc.

7.3.3.2 QUELQUES RESULTATS EN ECOLOGIE DES COMMUNAUTES

Plusieurs études intéressantes ont ainsi vu le jour en écologie des communautés. Moses Libalah a pu montrer au cours de sa thèse que les déterminants climatiques et édaphiques agissaient à des échelles spatiales différentes, et marquaient respectivement les patrons d'abondance des espèces abondantes et rares (Libalah Bakonck et al., 2020). En RDC, j'ai co-dirigé la thèse de John Katembo, qui portait à la fois sur la cartographie de la biomasse et sur les déterminants de la dynamique des forêts monodominantes à *Gilbertiodendron* et *Julbenardia* (Katembo, 2021; Katembo et al., 2020). Dans un article de méta-analyse (Declan et al 2024), la mise en commun de données de parcelles sur trois continents a permis de mettre en évidence que les proportions d'espèces hyperdominantes était exactement identiques entre continents. Notre jeu de données a permis de doubler l'échantillon disponible sur l'Afrique pour cette étude.

7.3.3.3 ALLOMETRIES, ARCHITECTURE ET FONCTION

Les données de structure collectées dans nos parcelles d'inventaire forestier ont servi dans un certain nombre d'études portant sur les relations allométriques. Il s'agit d'étudier les relations reliant différentes dimensions ou parties de la plante. Nos données ont ainsi servi à l'édification d'équations allométriques spécifiques aux approches de télédétection, prenant en compte la hauteur des arbres et les dimensions de couronnes (Jucker et al., 2022, 2017), c'est-à-dire des dimensions potentiellement mesurables par télédétection (LiDAR aérien), pour prédire d'autres dimensions non visibles depuis le haut (comme le DBH, le volume de bois ou la masse aérienne). Avec Moses Libalah, nous avons aussi étudié les déterminants des relations entre DBH et hauteur (Libalah et al. In prep) qui s'avèrent avant tout façonnées par la structure du peuplement (surface terrière), plus que par les déterminants climatiques et édaphiques. Nous avons également contribué à l'étude de la relation entre le DBH et la taille du houppier (Blanchard et al., 2016), qui s'avère remarquablement stable à travers la ceinture tropicale. Une autre stratégie a consisté à prendre en compte et à tirer parti de la contribution disproportionnée des grands arbres et des espèces hyper-dominantes pour développer une approche simplifiée de l'estimation du carbone aérien dans les parcelles (Bastin et al., 2015b, 2018).

Pour convertir les diamètres (et hauteurs) d'arbres, tels que mesurés dans les parcelles d'inventaire forestier, en estimations de biomasse, on utilise traditionnellement des équations allométriques calibrées sur base d'arbres abattus et pesés. Il s'agit de l'approche dite 'destructive'. Vu la logistique à mettre en œuvre, notamment pour peser des arbres de

plus de 150 tonnes de matière fraîche, très peu d'études peuvent se permettre une calibration locale. Les équations allométriques proviennent donc souvent d'une toute autre région, ou sont calibrée sur l'ensemble des tropiques (Chave et al., 2014). Le problème de la représentativité des équations utilisées pour un type de végétation, un ensemble de conditions environnementales ou une région biogéographique donnés, et de leurs biais potentiels, est donc récurrent.

Pour y remédier, nous avons, avec Raphaël Pélissier et Pierre Ploton, initié il y a dix ans un axe de recherche sur les allométries et le LiDAR. L'idée était d'employer un scanner laser (LiDAR terrestre) pour décrire finement le volume des arbres (Figure 36) et calibrer des équations allométriques de façon non-destructive. Avec Stéphane Momo, que nous avons encadré depuis les années de master jusqu'à la thèse et les post-docs, nous avons établi un partenariat avec un exploitant forestier privé (Alpicam-Grumcam) à l'Est du Cameroun.

Dans un premier temps, nous avons utilisé les arbres abattus suivant le cours normal des activités de l'exploitant. Nous devions donc nous adapter pour ne pas gêner le chantier. Il fallait suivre le plan d'exploitation, trouver les étiquettes d'identification normalement positionnées au pied de chaque tronc par les équipes d'inventaire, aller scanner à l'avance les arbres d'intérêt, attendre l'abattage puis se dépêcher de cuber et peser (Figure 37) l'arbre au sol avant que la grume ne soit emportée. Ce protocole a néanmoins posé plusieurs problèmes : (i) les arbres étaient à peu près tous de taille comparable (au-dessus du diamètre minimum d'exploitation), alors que la calibration d'une allométrie requiert d'échantillonner tout le gradient de taille. (ii) Beaucoup d'étiquettes manquaient, et ce n'était pas toujours l'arbre que nous avons scanné qui était abattu. Ces premiers tâtonnements nous ont néanmoins permis de constituer un premier jeu de données destructif intéressant, avec certains des plus grands arbres cubés/pesés au monde ! Nous avons ainsi contribué à la révision de l'allométrie pantropicale de Chave (Chave et al., 2014). L'exercice nous a également permis de nous familiariser avec les défauts et qualités de différents scanners (Riegl VZ400, Faro 300, Leica C10), de mettre les mains dans les chaînes de traitement spécialisées, et d'initier des collaborations avec les principales équipes de recherche autour du LiDAR terrestre. Ce fut aussi l'occasion de goûter pour la première fois aux joies de l'administration des marchés publics avec appel d'offre européen pour l'achat d'un scanner LiDAR terrestre, assorti d'une convention entre deux tutelles (CIRAD et INRA) qui l'avaient co-financé.

Grâce à cette expérience, nous avons pu être associés à un très ambitieux projet (PRE-REDD) de la Commission des Forêts d'Afrique Centrale (COMIFAC), qui visait à calibrer des équations allométriques de biomasse dans six pays de la région, via la méthode traditionnelle (destructive). J'ai appuyé le laboratoire de Bonaventure Sonké pour l'échantillonnage du site camerounais (chez Alpicam), et Stéphane Momo et Libalah Moses ont bénéficié d'un financement spécifique pour leur permettre de travailler sur la méthode non-destructive

d'une part, et sur la mise en place de parcelles et l'étude des allométries hauteur-diamètre d'autre part. En combinant les trois protocoles (parcelles, LiDAR, destructif), j'avais initialement espéré rassembler un jeu de données comme il n'en existe quasiment aucun (Clark and Kellner, 2012): une mesure directe de la biomasse à l'échelle de la parcelle, via la pesée de l'ensemble des arbres. J'avais même consulté des élagueurs spécialisés en vue d'un démontage dans lequel les grands arbres auraient servi de support pour suspendre/peser les plus petits. Cependant, n'étant pas en charge de rédiger le protocole de l'échantillonnage destructif, je n'ai pas pu l'orienter dans ce sens. Le consultant de la COMIFAC a en effet jugé plus pertinent de recommander un échantillonnage strict par espèces et classes de diamètres. Or nous n'avons que rarement trouvé tout l'effectif recherché dans les parcelles inventoriées, et il a fallu parcourir tout le réseau de pistes de l'assiette annuelle de coupe pour trouver les arbres voulus. Heureusement, cette fois, nous avons la possibilité d'échantillonner l'ensemble des classes de diamètre, et d'avoir notre propre équipe d'abattage, corrigeant les problèmes de logistique que nous avons rencontrés précédemment.

Les données obtenues au travers des protocoles destructifs nous ont permis d'étudier des pistes pour l'amélioration des modèles d'équations allométriques, notamment en prenant en compte les changements structurels des arbres au cours de l'ontogénie (Ploton et al., 2015). En effet, la couronne des arbres réitérés adultes peut dépasser 60% de la masse des arbres. Comme Léonard de Vinci l'avait déjà noté, l'approximation cylindrique¹² est globalement valide, et la surface totale des sections est en moyenne conservée à chaque fourche. Cependant, la prise en compte des dimensions du houppier permet de diminuer des biais conséquents observés dans les biomasses estimées, en particulier sur les arbres les plus grands. Ces données ont également servi à produire les premières équations allométriques régionales pour le bassin du Congo (Fayolle et al., 2018).

Mais nous avons surtout démontré la validité de l'approche non-destructive basée sur le LiDAR terrestre (Momo Takoudjou, 2019; Takoudjou et al., 2018). L'estimation des volumes obtenue au travers des modèles quantitatifs structuraux (QSMs), qui ajustent des cylindres interconnectés à l'ensemble de la structure ligneuse ramifiée, permet en effet une estimation non-biaisée du volume de bois. Il est cependant primordial de corriger manuellement les erreurs qui peuvent apparaître dans le modèle reconstruit, suite à la présence d'occlusions notamment. Nous avons pour cela conçu un outil, AMAPscan, intégré à la suite Amapstudio et développé à AMAP par Sébastien Griffon et François de Coligny. Pour l'estimation de la densité du bois (et *in fine* de la masse de l'arbre), nous avons pu identifier des patrons systématiques de variation verticale de la densité du bois dans l'arbre. Nous avons proposé

¹² Le volume total de l'arbre suit globalement la relation $V=DBH*H$

une équation simple permettant de déduire la densité moyenne de l'arbre à partir de la densité basale (Momo et al., 2020; Sagang Takougoum et al., 2018).

Pour poursuivre plus avant, nous avons monté le projet Biodiversa 3DForMod, porté par AMAP (P.I. : R. Péliissier), en partenariat avec Passi Raumonon en Finlande et l'université de Wageningen (Martin Herold). Ce projet visait à la fois à la mise en commun des données, à l'amélioration des chaînes de traitements pour l'estimation de la biomasse à différentes échelles, et à la transmission des avancées méthodologiques aux décideurs. Pour ce dernier point, Martin Herold a par exemple pu faire inscrire l'utilisation du LiDAR terrestre dans les guidelines de l'IPCC (Buendia et al., 2019), qui fournissent les lignes directrices officielles pour les méthodologies d'inventaire des gaz à effet de serre. J'ai également participé à plusieurs publications de synthèse récapitulant les meilleures pratiques pour l'estimation de la biomasse, depuis le terrain jusqu'aux cartographies à large échelle (Duncanson et al., 2021; Réjou-Méchain et al., 2019). Avec l'aide d'Olivier Martin, en post-doc sur le projet, nous avons pu tester une chaîne de traitement semi-automatique des données LiDAR terrestre (Martin-Ducup et al., 2021), et évaluer les étapes où l'intervention humaine était la plus cruciale (principalement la segmentation des arbres individuels). Nous avons alors recruté une équipe de techniciennes spécialisées au Cameroun pour appliquer cette chaîne de traitement à plusieurs milliers d'arbres scannés (en plein) dans des parcelles au Cameroun (forêt et savane), Gabon, RDC (Miombo), et en Guyane.

Outre les estimations de biomasse, les données destructives et non-destructives collectées à l'échelle des arbres individuels nous ont permis de progresser dans l'étude de l'architecture des arbres et des stratégies de croissance. Par exemple, nous avons pu analyser les modèles de variabilité de la structure et de la densité du bois entre les espèces et les stades ontogénétiques. Deux résultats très intéressants émergent, montrant qu'au cours du développement de la couronne chez les arbres de la canopée, tant la structure (topologie, géométrie et proportions) de l'arbre que la densité du bois dans la couronne convergent vers des valeurs similaires, indépendamment du type fonctionnel ou de la stratégie de vie de l'espèce (Martin-Ducup et al., 2020; Momo et al., 2020). Ainsi, les arbres de la canopée présentent moins de dominance apicale, ont plus de fourches et une couronne plus étalée, et se rapprochent des attentes de fractalité de la théorie métabolique (Enquist et al., 2009). Les contraintes biomécaniques d'un port étalé imposent une gamme plus étroite de densités de bois. Cette convergence des arbres métamorphosés dans la canopée montre qu'une partie de la diversité fonctionnelle et architecturale observée dans le sous-étage finit par s'estomper. Pour étudier les stratégies fonctionnelles dans la canopée, il faut sortir des syndromes habituels (espèces acquiescentes vs espèces compétitives) et rechercher des traits qui reflètent la résistance aux facteurs limitants de la canopée, tels que les températures extrêmes, la sécheresse saisonnière, voire le manque d'éclaircissement saisonnier dans les zones très nuageuses. Une attention particulière doit notamment être accordée à la phénologie.

7.3.3.4 MESURES IN SITU DU FEUILLAGE ET DE LA PHÉNOLOGIE

Pour comprendre le signal temporel des données satellitaires, et plus généralement l'interaction entre le signal électromagnétique et la forêt, les données de parcelles et les allométries de biomasse ne suffisent pas. Il nous faut caractériser le feuillage et sa dynamique saisonnière. Les feuilles constituent en effet l'interface entre les plantes, l'atmosphère et le rayonnement. Pourtant, on sait très peu de choses sur la surface, la distribution spatiale et angulaire, la phénologie et les propriétés optiques du feuillage dans les forêts tropicales.

Profitant de l'échantillonnage destructif de la COMIFAC au Cameroun, nous avons calibré des modèles allométriques de prédiction de la surface foliaire. J'ai pour cela encadré Nelly Sirry durant son Master à Yaoundé, pour travailler sur la conversion des masses de feuilles pesées en surface foliaire (Sirri et al., 2019). Son protocole impliquait de compter les feuilles sur plusieurs branches par arbre avant de les peser, et d'en scanner un certain nombre, afin d'avoir pour chaque arbre un facteur de conversion précis de la masse totale des feuilles (dont nous disposons) vers la surface. Avec une petite équipe, elle a ainsi compté près de 2 millions de feuilles ! Nous avons ensuite employé les équations allométriques calibrées sur base de ces données pour estimer le LAI dans 21 parcelles d'inventaire forestier d'un hectare inventoriées dans la même localité. Nous avons trouvé que le LAI pouvait monter jusqu'à 14 (m^2 de feuilles par m^2 de sol) lorsque tous les arbres du plot étaient supposés en feuilles. Un seul *Triplochyton scleroxylon* totalisait même plus d'un hectare de surface foliaire ! Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que les estimations habituelles en forêt tropicales, qui sont généralement obtenues par des méthodes indirectes basées sur des photographies hémisphériques (Bréda, 2003; Vincent et al., 2017). Cela souligne l'importance d'utiliser des observations directes ou des estimations indirectes non biaisées. Les approches basées sur le LiDAR ont montré un bon potentiel (Vincent et al., 2017), en particulier sur la base d'approches de voxelisation tenant compte des variations de l'intensité de l'échantillonnage et des occlusions dans la scène scannée. C'est l'objet du logiciel AMAPVox. Nous avons commencé par utiliser notre échantillon africain destructif et scanné par TLS comme référence pour tester le potentiel d'AMAPVox pour la quantification de la surface foliaire, mais aussi de la distribution de l'angle des feuilles et de la distribution et de la porosité du feuillage au niveau du houppier (Momo Takoudjou, 2019). Les résultats, bien que prometteurs n'ont hélas pas encore été publiés.

Nous avons également commencé à acquérir les propriétés optiques des feuilles en utilisant des méthodes d'accès à la canopée (Figure 38), tant en Afrique Centrale qu'en Guyane Française (Ferret et al., 2016), notamment dans le cadre du projet Hypertropik (CNES). Une difficulté majeure consiste à prendre en compte le vieillissement et la démographie des feuilles, afin d'obtenir une représentation réaliste de l'évolution rapide des propriétés physiologiques et optiques des feuilles, ainsi que du mélange des classes d'âge des feuilles dans la couronne de l'arbre (Wu et al., 2016). Il s'agira d'un aspect central de mon projet de recherches (cf. 2).

7.3.4 LES DRONES : UNE ECHELLE INTERMEDIAIRE INDISPENSABLE

Faire le lien entre des mesures de terrain et des données de télédétection, pour des phénomènes aussi transitoires que la phénologie est une gageure, surtout quand l'acquisition programmée d'une image satellite THR sans nuages peut prendre une année ou plus. De plus, quelle que soit la problématique (dynamique du C, phénologie, structure forestière, distribution spatiale des espèces d'arbres, etc.) les parcelles permettent rarement un échantillonnage suffisant à elles-seules. Enfin, avec une surface individuelle de 1ha, les parcelles sont petites à la fois comparativement à la couronne des grands arbres et des pixels de la plupart des capteurs satellites. Les effets de bord sont donc importants, sans compter que la précision des localisations GPS reste problématique sous couvert forestier (Duncanson et al., 2021).

Le LiDAR aérien fournit une information tridimensionnelle détaillée qui permet de combler ces lacunes en spatialisant la biomasse, mais aussi la densité du feuillage ou les limites des couronnes, sur des dizaines de milliers d'hectares. Cependant la mobilisation d'un avion est coûteuse et difficile à mettre en œuvre, particulièrement en Afrique.

L'utilisation de drones devenait donc incontournable... Etant le premier à AMAP à m'y mettre, j'ai dû 'débroussailler le terrain' pendant plusieurs années. Profitant notamment de deux ans d'expatriation au Cameroun, j'ai dû tester de nombreux modèles de drones, de capteurs et de logiciels en conditions réelles de terrain avant d'arriver au niveau de professionnel permettant d'acquérir des données utilisables. La charge administrative n'est pas non-plus à sous-estimer. Je suis depuis plusieurs années responsable sécurité pour les drones de l'unité. En charge du suivi d'une douzaine de drones et de pilotes pour la direction de la sûreté du CNRS, qui est notre 'exploitant' officiel. Il faut également résoudre des problèmes de transport, de douane, d'autorisation de vol -avec des réglementations différentes par pays et même par zone-, de réparations, d'achats, de mises à jour incessantes, de logiciels, de batteries, etc. J'aurai à l'avenir la chance d'être secondé dans cette tâche par Stéphane Fournier, IA à AMAP.

Plus abordables, nos premiers drones étaient munis de caméras RGB (désormais également multispectrales ou infra-rouge thermique). Ces capteurs permettent une cartographie tridimensionnelle par stéréophotogrammétrie. En prenant plusieurs centaines ou milliers de photos de la zone d'intérêt, on peut en reconstruire le modelé et produire une mosaïque orthorectifiée, ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS). Il s'agit d'une méthode de télédétection passive, c'est-à-dire que la scène est éclairée par le soleil (ou émet sa radiation pour le thermique), et on mesure la lumière réfléchi (ou émise) vers le capteur. Dans la gamme du spectre visible, il est donc impossible de voir les objets qui ne sont pas éclairés, et donc de décrire le sous-bois ou la hauteur du sol sous la forêt. Pour se faire une idée des couvertures possibles, avec un drone quadricoptère, nous arrivons à produire des mosaïques de 50 ha à 5 cm de résolution par vol de 20 min.

Nous avons ensuite voulu acquérir un scanner LiDAR pour drone (150 kEur). Nouvelle aventure avec les marchés publics et des budgets de sources multiples (CIRAD, IRD) étalés sur deux années budgétaires... Sur la Figure 40, on peut voir l'appareil ainsi qu'un exemple des données acquises. AMAP dispose depuis de deux autres systèmes (moins coûteux).

Le jeu en valait la chandelle. J'ai en effet à la suite été impliqué dans un certain nombre de projets pour lesquels cette nouvelle capacité d'acquisition de données changeait la donne.

- Un premier projet, financé par la Nasa (PI Tom Smith, UCLA, Sassan Saatchi, JPL), porte sur le lien entre la structure/phénologie de l'habitat et le déplacement des animaux (oiseaux, chauve-souris et antilopes) autour de la réserve du Dja (Cameroun).
- En Nouvelle Calédonie, j'ai été co-porteur du projet *Reliques* (avec Philippe Birnbaum) qui portait sur les effets de la fragmentation forestière sur sols ultramorphiques. Financé par le CNRT-Le Nickel, le projet visait notamment à fournir des préconisations pour mieux préserver ou restaurer les forêts autour des mines de Nickel. Un résultat important du projet a été d'établir que l'effet 'lisières' dans les fragments forestiers, et leur impact sur le micro-climat et la composition floristique et fonctionnelle était directement médié par la structure de la canopée (mesurée au LiDAR par drone) plutôt que par la distance à la lisière en tant que telle (Blanchard et al., 2023).
- Dans le projet *ForestScan*, financé par l'ESA et porté par Mat Disney (UCL), nous participons à un effort collectif visant à mettre au point des méthodes de mesure basées sur le LiDAR (terrestre, drone, aérien) pour établir des sites de référence pour les missions satellites (notamment dans *GeoTree*).

Mais nos nouvelles capacités d'acquisition de données par drone m'ont surtout permis de lancer le projet Phenobs (financement Labex CEBA – ANR) d'observatoire phénologique en Guyane Française, sur lequel je reviendrai plus en détail dans le projet de recherches.

7.3.5 SYNTHÈSE

Dans l'optique d'aborder des questionnements écologiques sur les mécanismes et les déterminants de la dynamique et du fonctionnement des forêts tropicales avec le recul spatial et temporel promis par la télédétection satellite, nous avons dû entreprendre une longue odyssée.

Les promesses des approches texturales (FOTO) sur images THR n'ont été que partiellement tenues. Le compromis entre la résolution spatiale et l'étendue couverte pas des acquisitions individuelles sous la contrainte d'une nébulosité forte et des effets directionnels à contrôler en font un outil peu pratique. Les images SPOT6-7 offrent une étendue satisfaisante pour un

prix relativement abordable (1-2 Eur/km²) et la possibilité d'intercalibration texturale entre zones de recouvrement, mais la résolution spatiale (réelle)¹³ n'est pas suffisante pour la prédiction de la biomasse. De plus, l'absence d'un programme d'acquisition en continu (mais uniquement sur commande) font qu'il n'existe que très peu d'archive disponible. La constellation Planet, avec des images de 3-5 m de résolution acquises journalièrement sur toute la surface du globe, ne propose ni une résolution spatiale, ni une fauchée, ni une constance de la qualité optique suffisantes. Un échantillonnage du territoire, comme celui que nous avons tenté initialement, avec des images de capteurs THR différents dans des configurations non-contrôlées est quasiment inutile avec l'approche FOTO : les effets directionnels et capteurs seront impossibles à maîtriser. Nous verrons dans la partie projet que l'émergence des méthodes d'intelligence artificielle de type deep-learning semblent cependant ouvrir de nouvelles voies, en combinant caractérisation texturale, et prise en compte (implicite) des effets instrumentaux, atmosphériques, etc.

Au-delà de ce demi-succès, le fait est que l'expertise, les partenariats, l'équipement et les jeux de données mis en place nous (m')ont positionné(s) dans le paysage de la recherche nationale et mondiale sur les questions de la calibration des produits satellitaires, des approches d'upscaling de la biomasse ou des allométries destructives et non-destructives. Une marque de cette reconnaissance a été de participer à plusieurs chapitres des guidelines du CEOS, qui est un effort de l'ensemble de la communauté scientifique pour établir des recommandations pour la calibration/validation des missions satellitaires de biomasse (Duncanson et al., 2021, 2019). Nous avons également fourni des données cruciales à la Nasa et à l'Esa pour les missions *Afrisar*, *Tropisar* et *Gedi* (Duncanson et al., 2022; Fatoyinbo et al., 2021; Labriere et al., 2018). En France, nous avons participé (au sein de collectifs de laboratoires) à de nombreux projets financés par le CNES, autour de la texture (*FOTOFor*), de la préparation d'une missions hyperspectrale (*Hypxim*), de la préparation d'une mission radar bande P (*Biomass*), de la préparation d'une mission LiDAR (*Stem-leaf*), ou de l'utilisation du deep-learning sur images Sentinel 2 (*Se2Cool*). Nous jouons un rôle clé dans le projet *ForestScan* financé par l'ESA pour mettre au point les méthodes de demain pour la calibration de missions spatiales de mesure de la biomasse. L'initiative *GeoTrees*, qui vise à soutenir la recherche sur le terrain en vue de la mise en commun de site de référence pour la communauté spatiale, nous a demandé de contribuer avec des sites en Afrique Centrale (Rodda et al. 2024). Il en va de même pour des initiatives nationales, comme le One Forest Vision ou le PEPR *Forestt*. Même si dans certains de ces projets, notre participation se limite à la fourniture de données de terrain (parcelles, LiDAR), dans d'autres notre expertise en écologie, en modélisation ou en traitement du signal ou sur les stratégies de calibration/validation sont reconnues à leur juste valeur.

¹³ Environ 3 m pour la bande panchromatique, au lieu des 1,5 m annoncés.

Enfin, notre présence sur divers chantiers tropicaux, ou ma propre expatriation au Cameroun, nous ont fourni des opportunités de financement conséquents ou d'acquisition de données uniques (LiDAR aérien, échantillonnage destructif) via des projets de développement et des partenariats public-privés (NHPC, Maboumine, CNRT) ou avec des institutions publiques internationales (COMIFAC, FAO). Des études d'impact sur des projets de barrage, d'ouverture de chemins de fer ou de lignes à haute tension ou des projets de mine nous ont ainsi vu temporairement prendre le rôle de bureau d'étude afin d'alimenter nos recherches. C'est évidemment aussi le rôle des chercheurs de l'IRD de mettre à l'épreuve les outils et approches mis au point par la recherche fondamentale dans un contexte plus appliqué d'appui à un développement durable. Dans le projet Nachtigal, nous avons ainsi mis au point un porte-folio d'outils *open-source* pour étudier les dynamique d'afforestation-déforestation, le suivi du régime des feux, mais surtout la caractérisation de la « qualité des habitats », c'est-à-dire de l'état du couvert végétal dans une zone donnée (Sagang et al., 2022). De tels outils sont indispensables dans les projets de développement, pour évaluer l'impact des projets et mettre en place des mesures de compensation ou de restauration appropriées. Des approches similaires ont pu être déployées en Nouvelle Calédonie pour l'étude des effets de la fragmentation forestière sur sols ultramafiques (Blanchard et al., 2023, Blanchard et al. in prep).

8.1 UN PROJET TRANSDISCIPLINAIRE TOURNE VERS LE FONCTIONNEMENT DES FORETS

Après quinze années de développements méthodologiques, je souhaite m'engager dans une valorisation concrète des méthodes mises au point et de l'expérience acquise, à la fois pour répondre à des questionnements écologiques et à des besoins en termes de développement durable au Sud. En particulier, je souhaite aborder de plus près la question des processus et du fonctionnement des forêts tropicales.

C'est dans ce cadre que je porte le projet Phenobs (projet stratégique du Labex CEBA – ANR) d'observatoire de la phénologie des forêts guyanaises. Dans ce projet résolument transdisciplinaire (Figure 41), nous abordons la question du verdissement saisonnier, et plus généralement de la phénologie des forêts guyanaises à l'aide d'une approche emboîtée de la feuille à l'écosystème, en passant par des suivis réguliers par drone sur une centaine d'ha de la station de Paracou.

Comme évoqué plus haut (cf. 1.3.1.2), la question du verdissement apparent des forêts sempervirentes en saison sèche a déjà fait couler beaucoup d'encre. Qu'il soit observé sur des données satellitaires optiques à haute résolution temporelle mais faible résolution spatiale (e.g. MODIS) (Huete et al., 2006; Myneni et al., 2007) ou des données de flux de carbone mesurés par eddy covariance (Saleska et al., 2003), les mécanismes et déterminants des fluctuations observées restent mystérieux. En supposant que ces patrons soient bien d'origine biologique et non purement instrumentale (Morton et al., 2014), la complexité des patrons phénologiques et la diversité floristique dans ces écosystèmes rend l'étude des mécanismes sous-jacents difficile (cryptic phenology, Albert et al., 2019). Peu d'espèces perdent leur feuillage de façon prolongée ou même visible, et les cas d'asynchronisme au sein d'une espèce, voire d'une couronne, sont fréquents (Wright and Vanschaik, 1994). L'approche traditionnelle est d'observer les changements à la jumelle sur quelques arbres le long de parcours phénologiques (Loubry, 1994; Sabatier, 1983). On comprend que le passage à l'échelle paysagère avec ce type d'approches n'ait pas permis une estimation fiable des mécanismes de régulation de la capacité photosynthétique. Par conséquent, les modèles climat-végétation (DGVMs) s'avèrent incapables de reproduire les variations saisonnières des interactions climat-végétation dans les forêts tropicales (Chen et al., 2020; Restrepo-Coupe et al., 2017).

Une hypothèse intéressante a été proposée selon laquelle les patrons de verdissement observés en saison sèche ne seraient pas induits par des variations de surface foliaire (LAI), mais plutôt par un renouvellement globalement synchronisé des cohortes de feuilles (Brando et al., 2010; Doughty and Goulden, 2008; Wu et al., 2016). De par la variation naturelle de la physiologie des feuilles avec l'âge (cycle de maturation puis vieillissement), ce renouvellement

permettrait d'optimiser la capacité photosynthétique au moment du pic d'éclairement incident. La validation de cette hypothèse est jusqu'ici basée sur des observations très partielles sur un petit nombre de sites en Amazonie, à savoir :

- des photos prises par phénocam montrant quelques dizaines de couronnes d'arbres à des distances variables (vue plongeante depuis une tour à flux),
- des estimations de LAI indirectes via des approches (photos hémisphérique, LAI-mètre, ratio d'éclairement) connues pour être biaisées en forêt dense (Vincent et al., 2017),
- des mesures de la variation des paramètres optiques et photosynthétiques avec l'âge sur les feuilles de deux douzaines d'arbres tout au plus (Chavana-Bryant et al., 2017; Wu et al., 2019, 2017).

8.2 L'APPORT DES DRONES

Grâce aux drones, nous allons tenter d'être à la fois plus précis et spatialement plus représentatifs dans l'estimation des variations quantitatives et qualitatives du feuillage de canopée. Un suivi régulier par drone LiDAR et multispectral a ainsi été entamé fin 2020 dans l'empreinte de la tour à flux de Paracou (Guyaflux) en Guyane française sur une zone de plus de 50 ha. Après quelques mises au point techniques (pour garantir la cohérence spatiale et spectrale des mosaïques, et assurer la stabilité de la chaîne de traitement et la gestion de flux de données importants), les premiers résultats sont plutôt convaincants (Barbier et al., 2021). Les données RGB et multispectrales permettent en effet de détecter les événements de défoliation et de renouvellement du feuillage, jusqu'à mettre en évidence l'existence de désynchronismes intra et inter-individuels (Figure 42).

La voxélisation des données LiDAR (AMAPVox, Vincent et al., 2017) permet de quantifier des variations subtiles de densité de plante (PAD) dans la canopée. On voit ainsi le PAD décroître dans la couronne aux dates correspondant au moment où l'arbre apparaît comme défeuillé sur les mosaïques RGB (Figure 42). Avec Grégoire Vincent nous avons cependant mis en évidence que la prise en compte des occlusions et des variations de densité d'échantillonnage par AMAPVox ne suffisait pas à corriger l'atténuation du faisceau LiDAR des scanners légers sur drone. La faible puissance et portée (relativement à la hauteur des forêts tropicales), de ces scanners induit des biais qui peuvent résulter en une surestimation de la densité du PAD en sous-bois. Une intercalibration empirique a été proposée, qui requiert d'intercomparer les données des différents scanners ou conditions d'acquisition (hauteur de vol) sur un même site (Delaître, 2019; Vincent et al., 2023).

Un enjeu important pour le passage à l'échelle est de pouvoir identifier les couronnes d'arbres individuels, voire d'en identifier l'espèce. Le fait de travailler dans un dispositif inventorié au

sol, comme Paracou, est évidemment d'une aide précieuse. Cependant l'établissement du lien entre les troncs marqués et les couronnes vues d'en haut est loin d'être trivial. En forêt dense, encore moins qu'ailleurs, les couronnes sont rarement situées à la verticale et centrées sur le tronc. Pour démarrer avec un jeu de données utilisable pour documenter la diversité des patrons phénologiques, puis espérer entraîner ultérieurement des modèles automatisés de segmentation de couronnes (Ball et al., 2023), de reconnaissance d'espèces et de phénophases, il a fallu mettre en place un jeu de données manuel d'entraînement. Près de 1500 couronnes ont été digitalisées et vérifiées sur le terrain dans la zone d'étude (travail supervisé par Grégoire Vincent et en partie réalisé par James Ball, doctorant de Cambridge associé au projet). De même 5 à 6 mille phénophases ont été interprétées visuellement (travail supervisé par Patrick Heuret). Que ce soit par analyse de séries temporelles (points de rupture, auto-corrélation, chaînes de Markov) testées en collaboration avec Patrick Heuret et Géraldine Derroire, ou sur base des signatures spectrales et LiDAR instantanées, il est d'ores et déjà acquis que les données drone permettent d'automatiser la détection des phénophases avec un bon niveau de précision (8% d'erreur avec un modèle Random Forest basé sur les données multispectrales et LiDAR). Via la détection d'une phase défeuillée, quand elle existe, ou de flushes de nouvelles feuilles, il est donc possible de connaître l'âge des feuilles les plus exposées (feuilles de lumière) pour la plupart des espèces et individus de canopée de la zone suivie.

A l'échelle de la communauté, les premiers résultats indiquent que le renouvellement du feuillage (maximum des défeuillaisons et nouveaux flushes) se produit majoritairement vers le début de la grande saison sèche. Les chutes de litières atteignent également un pic pendant la saison sèche. Globalement, le PAD montre des variations saisonnières de près de 10%, avec un maximum en fin de saison sèche (Figure 43). Cela signifie que le feuillage (qui représente la portion du PAD qui varie saisonnièrement) doit varier relativement plus. Grâce à un jeu de données LiDAR terrestre nettoyé manuellement par notre équipe camerounaise (sous la supervision d'Olivier Martin), nous aurons une évaluation précise de la proportion (à un temps t) de feuilles et de bois, sur 1ha de forêt. Nous pourrons donc quantifier la proportion de la composante ligneuse dans le PAD mesuré. Il est donc probable que nous arriverons à une conclusion plus mitigée que Wu et al. (2016) quant à l'importance relative des variations de quantité et de qualité du feuillage dans le signal de verdissement saisonnier.

8.3 FONCTIONNEMENT ET DIVERSITE

Avec Isabelle Maréchaux, Clément Stahl et Sabrina Costes, nous avons également lancé l'acquisition de données fonctionnelles, optiques et physiologiques à l'échelle des feuilles, avec un contrôle sur leur âge, sur une trentaine d'arbres grimpés régulièrement. Ici, Patrick Heuret a pu apporter l'éclairage inestimable fourni par l'étude de l'architecture des plantes. En effet, plutôt que de devoir marquer les feuilles individuellement pour les dater ultérieurement, nous utilisons des marqueurs morpho-anatomiques pour distinguer les unités de croissance. La combinaison avec les suivis drone permet alors de dater ces UC (via l'identification des dates de feuillaison). Les premiers résultats confirment que les paramètres photosynthétiques ($V_{c,max}$, J_{max}) mais aussi d'autres traits caractérisant par exemple la résistance à la sécheresse (épaisseur, PTLP) varient avec l'âge des feuilles. Les propriétés spectrales en font de même, et il est possible par exemple de prédire l'âge d'une feuille (d'une espèce connue) en utilisant uniquement l'intensité relative du vert ($R^2=0.86$) ! Ces données permettront d'alimenter des modèles mécanistes, comme TROLL (Maréchaux and Chave, 2017), pour analyser finement les déterminants des flux observés par la tour, mais aussi pour préparer des extrapolation à plus large échelle (DGVMs).

Au-delà de la quantification de la capacité photosynthétique, les milliers d'arbres suivis fournissent des perspectives complètement nouvelles pour comprendre la diversité des adaptations des arbres tropicaux aux stress saisonniers et édaphiques. Nous allons pouvoir analyser les comportements phénologiques à l'échelle individuelle, pour étudier les déterminants génétiques et environnementaux du timing, de la fréquence et de la durée des phénophases, mais aussi de la variabilité des comportements entre individus et espèces. Des espèces comme le *Platonia insignis* (Clusiaceae) ont par exemple une phénologie biannuelle à l'échelle individuelle (une fleuraison tous les deux ans, P. Heuret, Comm. Pers.), mais annuelle à l'échelle de la population, avec des déphasages d'un an entre sous-populations. Pour d'autres espèces, la défeuillaison se produit lors de la petite saison sèche pour certains individus, et lors de la grande saison sèche pour d'autres. On pourrait par exemple rechercher un déterminisme dans l'origine biogéographique des sous-population. De premières analyses montrent plus simplement que la position topographique et la taille des arbres peuvent conjointement moduler la propension d'un arbre à défeuiller plus ou moins fréquemment que ses conspécifiques. De nombreux cas de désynchronismes intra-couronne ont également été observés. Ici, à l'instar du projet *Treemutation*, auquel nous avons été associés (Labex CEBA, Pls : Myriam Heuertz, Niklas Tysklind), la diversité génétique intra-individuelle pourrait être un facteur causal. Par ailleurs, la phénologie étant intimement liée aux stratégies de survie (éviter de la sécheresse ou des périodes de trop forte température, compétition pour la lumière, etc.), d'allocation des ressources, ou de reproduction, une caractérisation efficace des patrons phénologiques permettra une décrire des composantes fonctionnelles inaccessibles jusque-là (Albert et al., 2019). Ces quelques exemples illustrent très succinctement la richesse des questionnements ouverts par ce nouveau type d'observatoire,

qui devra qui plus est nécessairement s'inscrire sur le temps long pour suivre la sensibilité aux cycles pluri-annuels et aux tendances climatiques globales.

Devant le succès du projet Phenobs en Guyane (que nous tentons de poursuivre via une demande au FEDER, portée par Géraldine Derroires), nous avons déjà commencé des suivis par drone et la collecte des traits ainsi que la digitalisation de couronnes sur plusieurs sites en Afrique (Cameroun, Congo). Un projet Biodiversa vient d'être accepté (PI : R. Pélissier, avec Gilles Dauby et Pierre Ploton) pour soutenir ce nouveau chantier africain, et élargir les partenariats.

8.4 LE PASSAGE AUX SATELLITES

Concernant l'utilisation d'images satellitaires pour l'extrapolation de données fonctionnelles et phénologiques dans l'espace ou dans le temps, j'ai pu profiter de la « pause » offerte par le Covid pour mettre les mains dans la plateforme de cloud computing dédiée à la cartographie qu'est Google Earth Engine. Là où, à l'époque de mon mémoire de fin d'études, télécharger et traiter quelques images Landsat constituait en soi un projet de recherche, en traiter des milliers étalées dans l'espace et dans le temps est maintenant quasi instantané. Les images Sentinel 2 fournissent un compromis intéressant entre résolution spectrale (13 bandes), spatiale (10 m pour certaines bandes) et temporelle (5 jours). Nos premiers tests au Cameroun et en Nouvelle Calédonie pour identifier des types forestiers, des gradients d'âge ou de dégradation, des effets lisière, voire des proportions de phénophases ou de types fonctionnels sont très concluants.

Cependant, pour pouvoir passer à l'échelle, il est nécessaire d'améliorer considérablement la qualité des pré-traitements (corrections radiométriques). Avec Jean-Baptiste Féret et son équipe, nous avons testé les algorithmes de correction atmosphérique disponibles (Chraïbi et al., 2022; Feret and Barbier, 2018) et identifié des différences notables dans la qualité des traitements en zones tropicales forestières. Notre collaboration de longue date avec Airbus DS nous a notamment permis d'obtenir des résultats très satisfaisants grâce à la chaîne de traitement OVERLAND. Développée par Hervé Poilvé sur base d'un ajustement optimisé localement des modèles 6S (atmosphère) et SAIL (végétation), Overland fournit notamment des images débrûmées dans toutes les bandes spectrales qui sont bien plus propres et temporellement stables que les autres produits existants (Sen2Cor notamment). Cependant la correction des effets directionnels (BRDF) nécessite pour l'instant un traitement à part. L'approche usuelle pour cela repose sur des fonctions mathématiques théoriques, dit kernels géométriques-optiques (le plus souvent les kernels Li-sparse et Ross-thick) (Li and Strahler, 1992; Roujean et al., 1992), qui sont ajustés empiriquement aux données. Ces kernels ont le plus souvent été conçus pour des données à faible résolution spatiale, et décrivent par exemple la proportion observée d'ombres et de surfaces éclairées dans des scènes comportant des arbres ou des bâtiments (dans le cas des kernels géométriques). Les kernels

ditions volumiques, décrivent eux la diffusion par des éléments de taille infinitésimales (milieu turbide) et peuvent par exemple décrire l'effet du feuillage, du moins tant que les feuilles (diffracteurs) restent petites relativement à la résolution du capteur. Une utilisation en dehors de ces plages d'échelle pour lesquelles les kernels ont été initialement conçus est relativement usuelle, à défaut d'un cadre théorique spécifique à la haute résolution (Jia et al., 2020). Cependant, pour être efficace, l'ajustement des kernels doit être spécifique à un type voire même à un état du couvert, ainsi qu'à une résolution et à une longueur d'onde spécifique. De fait, nous avons pu constater que des paramètres issus d'ajustements très généralistes des kernels (ajustés pour tous types d'occupation du sol) ou directement adaptés de données MODIS, tels que proposés par Roy et al. (Roy et al., 2016, 2016), ne sont en effet clairement pas adaptés à la correction des effets directionnels en forêt dense. Avec Pierre Ploton, nous avons donc entrepris une calibration spécifique aux forêts denses et un article est en cours de finalisation.

Une autre approche pour décomposer le signal observé par satellite en ses composantes biologiques et instrumentales sera d'utiliser les données détaillées acquises dans le projet Phenobs pour modéliser le transfert radiatif. Le modèle de transfert radiatif DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2015), avec lequel j'ai déjà pu travailler (cf. 1.3.1.1), fournit désormais des simulations extrêmement réalistes (Ebengo et al., 2021) grâce à l'assimilation de données LiDAR voxélisées et d'informations spectrales spécifiques aux feuilles de chaque arbre. Sur base de propriétés optiques foliaires d'âge contrôlé nous devrions donc pouvoir encore progresser. Je vais pour cela superviser un chercheur post-doctorant avec Jean-Baptiste Féret.

Enfin, une troisième voie se présente, qui permettra de limiter considérablement l'investissement nécessaire dans les pré-traitements des images de télédétection. Les méthodes d'intelligence artificielle (IA) les plus récentes permettent en effet de faire abstraction d'une bonne partie des effets atmosphériques et directionnels indésirables, tout en ayant la valeur ajoutée de prendre en compte le contexte spatial (texture locale). Avec Paul Tresson (nouvellement recruté à l'IRD), Maxime Réjou-Méchain, Gaëlle Viennois, Pierre Ploton et Pierre Couteron, et Hadrien Tulet (que j'ai maintenant recruté en CDD), nous avons testé à la fois des réseaux de neurones convolutifs et des algorithmes *Vision transformers*, notamment avec une approche en auto-apprentissage (Dino, self-distillation with no labels). Dans les deux cas, les cartographies de la typologie forestière obtenues sont très pertinentes (même avant supervision). Cependant, avec les Transformers les cartographies semblent plus robustes aux effets instrumentaux (Figure 44).

8.5 ARCHITECTURE DES ARBRES ET PEUPELEMENTS

En 2023, lors d'un séjour académique de six mois à AMAP sous ma supervision, Adam Chmurzinski, étudiant en thèse dirigé par Brian Enquist (Arizona Univ.), a pu constater que les données TLS telles que traitées via notre chaîne de traitement semi-automatique (cf. 1.3.3.3) étaient sans commune mesure avec les jeux de données auxquels il avait été confronté jusque-là. S'en est suivi presque immédiatement la soumission d'un article à *New Phytology* montrant que les attendus de la théorie métabolique en termes de structure des arbres (Enquist et al., 2009) étaient effectivement vérifiés avec des données LiDAR terrestre, pour peu que les données soient propres. Cette anecdote illustre l'intérêt de notre démarche de contrôle rigoureux du traitement des données, et justifie la poursuite de l'exploration du potentiel de cet outil indispensable à l'étude détaillée de la structure et du fonctionnement des grands arbres et des peuplements. De nouveaux appareils sont mis sur le marché, qui sont non-seulement plus rapides à mettre en œuvre, permettant de se passer de cibles pour le positionnement relatif des stations, mais également plus légers et mobilisables par drone. La technologie SLAM (simultaneous localization and mapping), permet notamment d'envisager de scanner des forêts denses depuis le sol et le ciel avec un seul et même système, assurant ainsi de réduire considérablement les problèmes d'occlusion, qui limitaient jusque-là grandement la complétude des reconstructions. Plusieurs équipes de recherche d'AMAP (appelées thèmes) qui s'intéressent à l'architecture et à la modélisation des plantes, ont clairement fait remonter le souhait d'approfondir dans cette voie, si possible via le recrutement d'un ingénieur de recherche ou d'un chargé de recherche dédié. En parallèle, cela implique également des décisions stratégiques pour l'acquisition et le test de nouveaux équipements, et la poursuite des acquisitions de données sur le terrain.

Au delà de la description de l'architecture et du fonctionnement des arbres, ces données permettent aussi de reprendre l'exploration des interactions entre plantes. Ainsi, avec Alex Shenkin (Northern Arizona Univ.), nous avons soumis en 2023 une demande au CESAB dont je suis co-PI, pour un groupe de travail sur la modélisation du micro-climat en forêt. Le thème a suscité l'enthousiasme de la communauté, avec plusieurs sommités (Matt Disney, Jonathan Lenoir, ...) proposant des jeux de données à analyser en commun.

8.6 INSERTION PARTENARIALE ET INSTITUTIONNELLE

Au cours des chapitres qui précèdent, j'ai employé le plus souvent le pronom 'nous' plutôt que 'je'. De fait, je ne conçois pas la recherche comme un exercice individuel. Je suis pleinement conscient que tout ce que j'ai présenté dans ce mémoire était le fruit d'un travail collectif, où j'étais encadré et aidé, et où j'ai moi-même encadré et aidé d'autres chercheurs, que ce soit par des compétences scientifiques, logistiques, administratives ou humaines très diverses. Je pense que pour obtenir une Habilitation à Diriger la Recherche, il est indispensable d'admettre cet état de fait. Pour préciser un tant soit peu comment je me positionne scientifiquement, la Figure 45 illustre la manière dont nous avons l'intention d'étudier le transfert d'échelle dans les écosystèmes forestiers tropicaux, depuis les organes des arbres jusqu'à la dynamique des écosystèmes régionaux ou mondiaux. En tant que chercheur, j'ai surtout l'intention de me concentrer sur un ensemble spécifique d'échelles et de parties du système, tout en reconnaissant la nécessité d'établir des liens avec des objets et des modèles étudiés par d'autres chercheurs ou laboratoires, désignés comme "externalisés" dans la figure.

En termes de financement et d'insertion institutionnelle de ce programme, nos ambitions sont en phase avec des initiatives de grande envergure qui se structurent actuellement en Afrique Centrale :

- Le Congo Basin Science Initiative, lancée à la suite d'un appel des ministres de l'environnement en Afrique Centrale (White et al., 2021) pour refinancer la recherche en écologie en Afrique Centrale. J'ai été invité lors de la réunion de lancement en amont du One Forest Summit de Libreville en 2023, et je compte continuer à m'investir dans cette initiative soutenue par l'UN-SDSN qui permet d'envisager un partenariat de recherche très large et diversifié en Afrique, à l'image de grands projets pluridisciplinaires en Amazonie (*LBA*). Les premières étapes seront de mener un effort de synthèse scientifique portant sur l'ensemble des disciplines clés (climat, sciences humaines, biologie, hydrologie, etc.), et de mettre en place un programme de recherche ambitieux et cohérent pour la région.
- La Nasa a décidé de financer parallèlement la préparation (scoping) d'une campagne pluriannuelle ambitieuse de recherche en écologie forestière à l'échelle de toute la zone tropicale, portée par Elsa Ordway (UCLA) à laquelle je suis associé. En effet, nous avons précédemment démarré une collaboration active au Cameroun au travers du Congo Basin Institute, qui se veut une structure partenariale large animée par UCLA, autour notamment du site de recherche de Bouamir dans la réserve du Dja.
- La France veut également apporter sa pierre, avec l'annonce de l'initiative One Forest Vision, par le Président de la République lors du sommet de Libreville. Le but est de mettre en place un outil opérationnel performant pour le suivi du carbone et de la biodiversité en Afrique Centrale. Ici aussi, nous sommes impliqués à la fois dans la

fourniture de données de cal/val (Pilier 1) et dans l'utilisation d'images satellites pour la cartographie des types forestiers (Pilier 3).

- A l'IRD, nous avons initié de longue date un réseau collaboratif en Afrique Centrale, matérialisée dans le LMI Dycofac (Dynamique des écosystèmes continentaux d'Afrique Centrale), et par la construction d'un Centre d'excellence en Biogéosciences de l'environnement (CBE). L'objectif est d'aborder la thématique des cycles biogéochimiques dans l'ensemble des compartiments de la zone dite 'critique': atmosphère, végétation, pédosphère, hydrosphère.
- Au Cameroun, il y a bien sur le partenariat historique établi avec le laboratoire du Prof. Sonké. Plusieurs collègues d'AMAP y sont actuellement accueillis (Pierre Ploton, Gilles Dauby, Hugo Leblanc). Nous avons également démarré une collaboration active avec l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts, sous la direction de Mr Germain Mbock. Après de longues années d'attente, un accord vient également d'être signé avec le Ministère des Forêts, qui permettra d'encadrer nos recherches dans les aires protégées. La pérennité des observatoires phénologiques que nous avons mis en place en sera renforcée.
- Nous avons bien entendu un partenariat fort avec le CIRAD (co-tutelle d'AMAP) qui mène des recherches très actives autour de la forêt en Afrique Centrale. Des collègues avec qui nous avons de nombreux échanges et co-publications sont actuellement (ou seront prochainement) en expatriation au Congo (Vivien Rossi) et au Gabon (Adeline Fayolle).
- Les opportunités de collaboration avec les enseignants-chercheurs de Gembloux (ULG), Jean-Louis Doucet, Jean-François Bastin, Philippe Lejeune et Jan Bogaert continueront d'être nombreuses.
- A l'ULB, mon Alma Mater, les collaborations sont toujours très fortes avec l'herbier (Tariq Stévant, qui porte aussi la casquette MBG), ou avec le laboratoire d'Olivier Hardy.
- Enfin, dans différents pays d'Afrique Centrale (Congo, Gabon, RDC), nous continuerons à développer des partenariats, notamment au travers du réseau RIFEAC (Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale de l'Afrique Centrale).

ANNEXES : TIRES A PART

ANNEXES : PRESENTATION DEFENSE

Habilitation to supervise research (HDR)

NICOLAS BARBIER

*From leaf to satellite, dynamics and
functioning of tropical vegetation*

Jury

Jérôme CHAVE (EDB/CNRS)

Philippe CIAIS (LSCE/CEA) (Rapporteur)

Sylvie DURRIEU (Tetis/INRAE)

Helene MULLER LANDAU (STRI) (Rapporteuse)

Imma OLIVEIRAS MENOR (AMAP/IRD)

Nicolas PICARD (GIP Ecofor)

Cédric VEGA (ENSG/IGN) (Rapporteur)

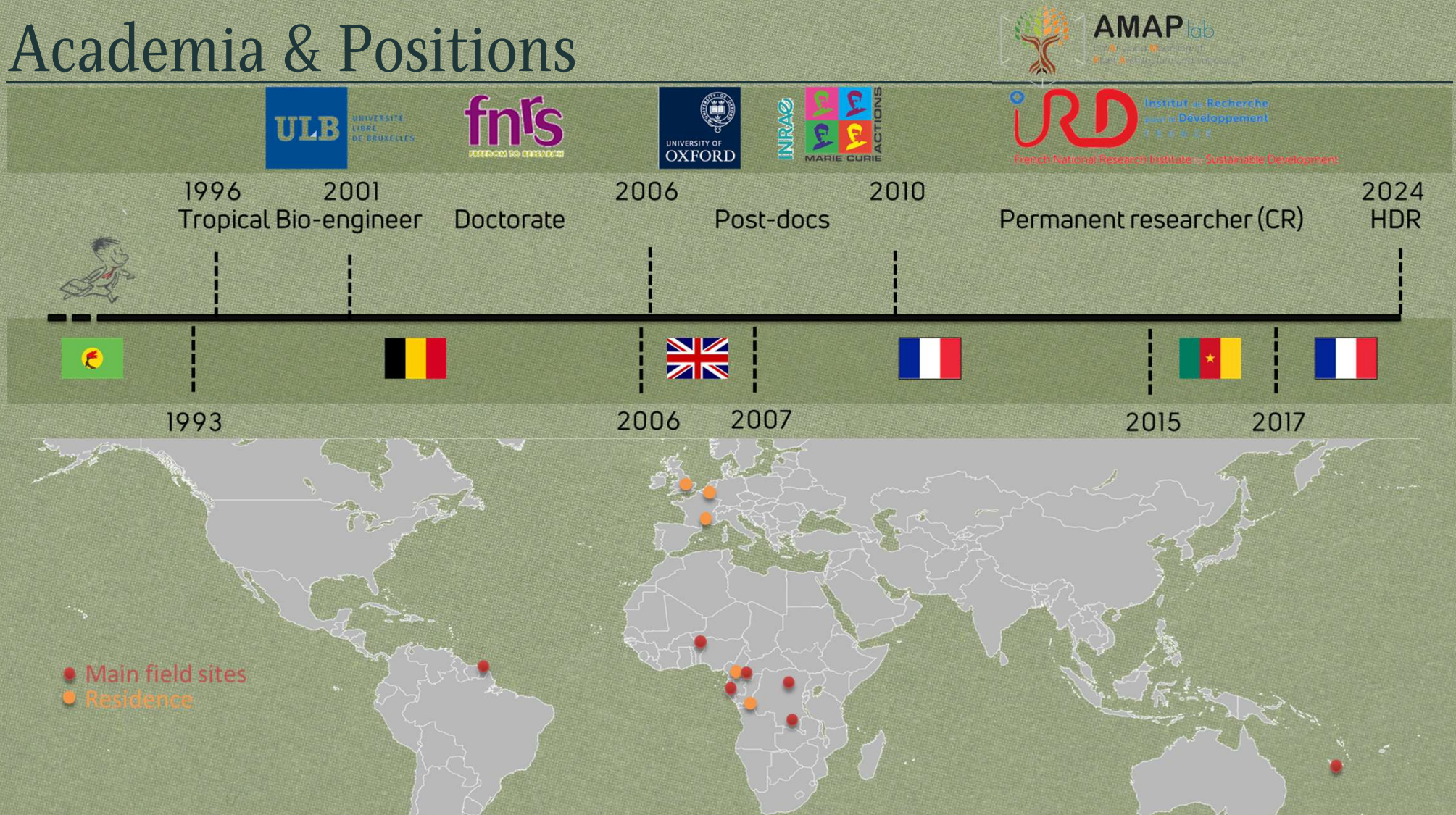


Biodiversité
Agriculture
Alimentation
Environnement
Terre
Eau



UNIVERSITÉ DE
MONTPELLIER

Academia & Positions



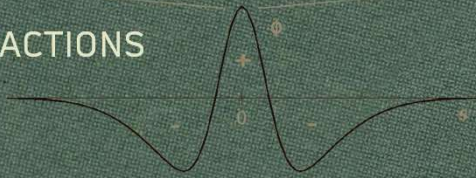


General research approach and objectives

PLANT ARCHITECTURE
Structure + Growth + Function



INTERACTIONS

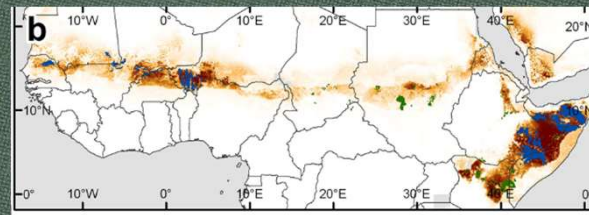


SYSTEM DYNAMICS



MODELING (STATISTICAL OR MECHANISTIC)

MAPPING



UPSCALING



MANAGEMENT - CONSERVATION

RESTORATION - COMPENSATION

MONITORING - SURVEILLANCE

PREDICTION - EARLY WARNING

General research approach and objectives

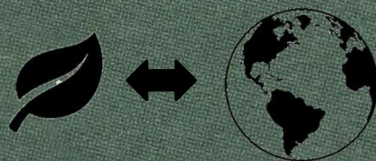


INNOVATE and PERSIST

Use relevant (new) technology (LiDAR, UAV, Earth observation, Spectroscopy, AI, Statistics) to better document patterns and processes across scales

Invest in improved processing when necessary

Invest in permanent/long term observatories or use archive long term data



BRIDGE ACROSS SCALES

Covering the appropriate spatial and temporal scales, and expect emergent phenomena at each scale



WITH THE SOUTH, FOR THE SOUTH

Meet societal needs while building local capacity in science and environmental management

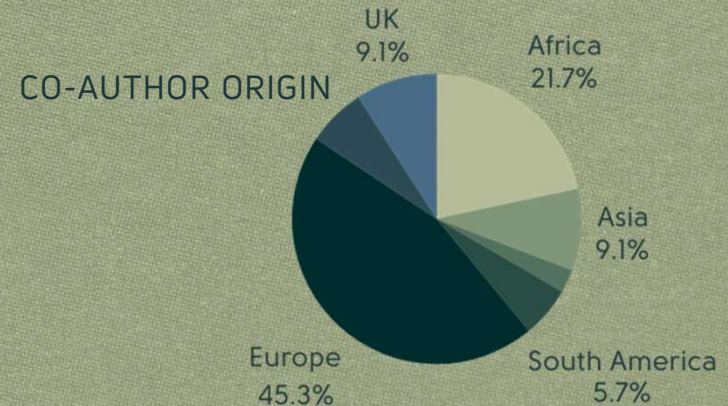
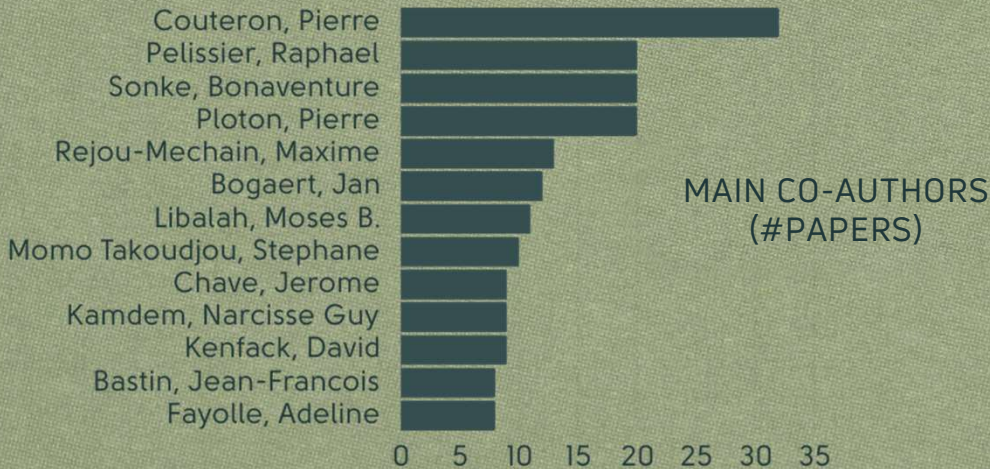
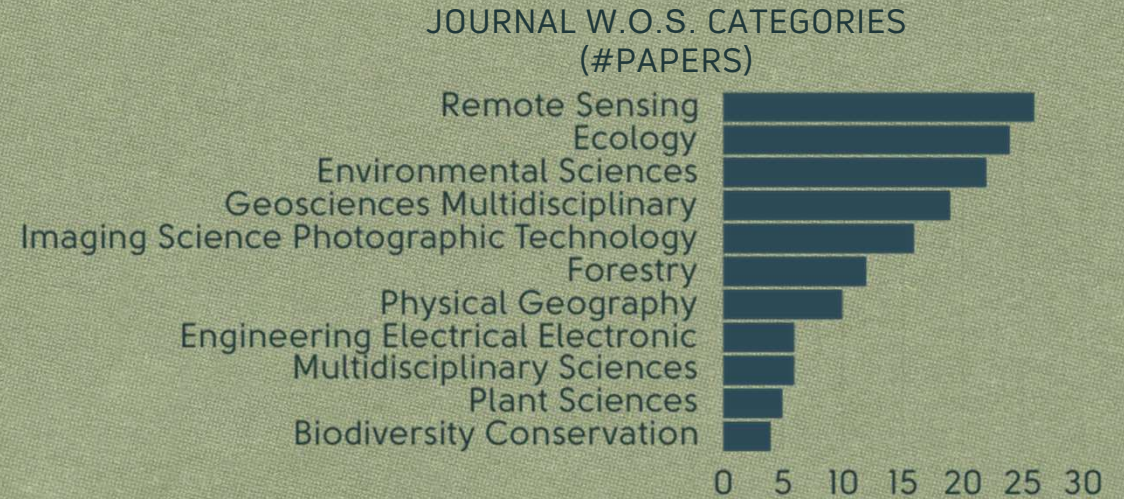
BRIDGE ACROSS DISCIPLINES

Use a transdisciplinary approach between plant architecture and biology, remote sensing and modelling

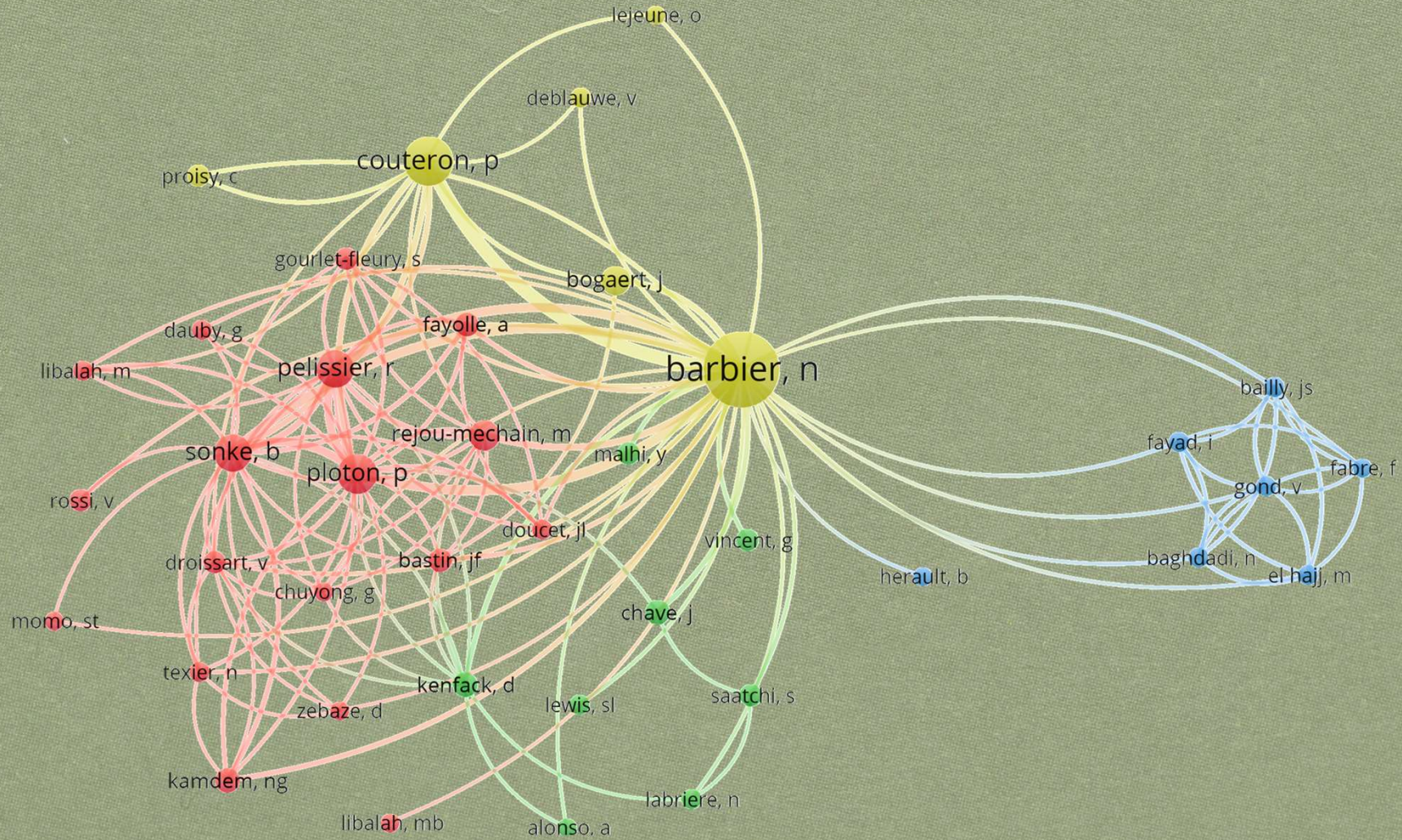


Publications and collaborations

	W.O.S.	Google
Publications	83	
Citations	3555	6000
H-Index	31	39
First author position	10 %	
Last author position	16 %	

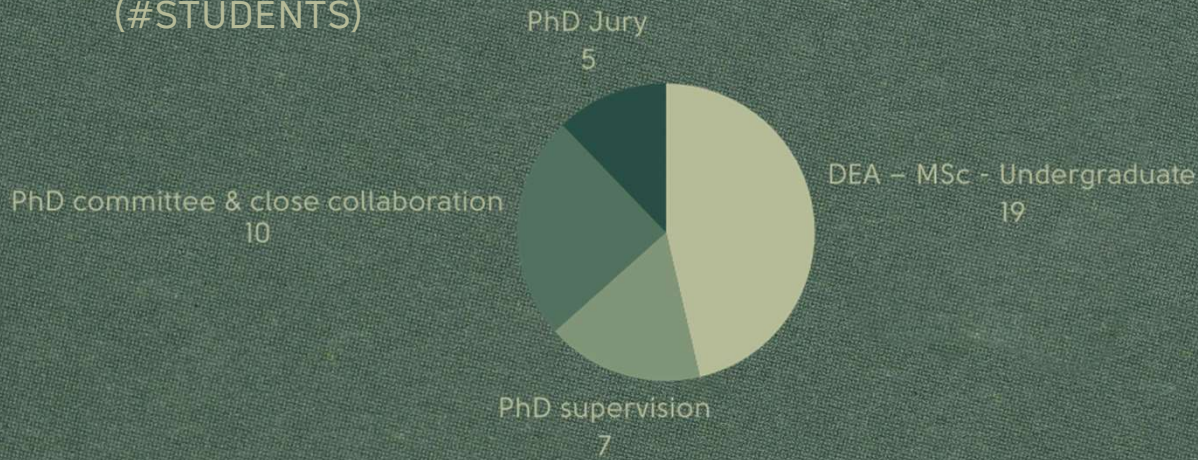


Publications and collaborations



Research Direction

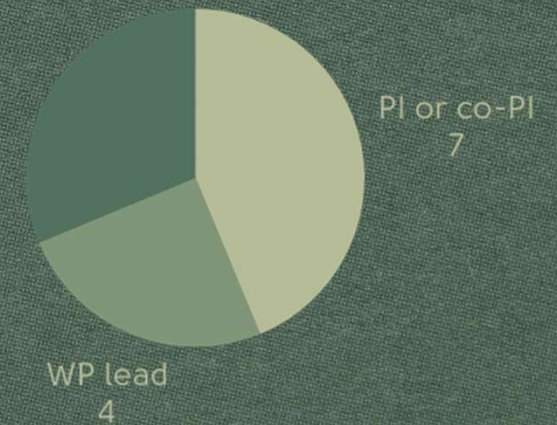
SUPERVISION (#STUDENTS)



INTERNATIONAL/MAJOR PROJECTS (100 K€ to 15 M€)

Other significant participation

5



RESPONSIBILITIES



2020 - 2025	Co-lead of group TETROFOR: Remote sensing of tropical vegetations (~10 full time equivalents)
2015 - 2020	Co-animator of group "3D structure and dynamics of tropical forests"
2017 -	In charge of the drone platform (~ 15 pilots and UAVs)

Semi-arid vegetations

2000 - 2012 ... and continuing











An ideal study case

FREEDOM
AUTONOMY

FIELD SITE
safe accessible
and divesified

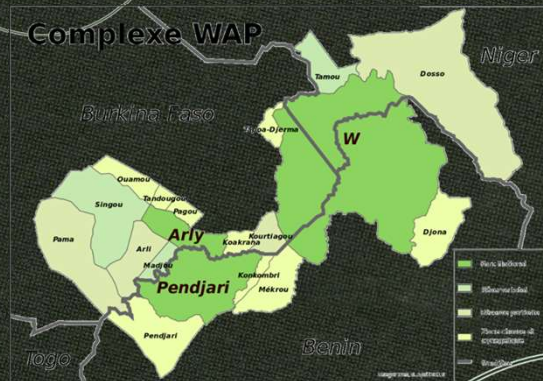
FUNDING
fnr's

INVOLVED
STAKEHOLDERS

ECOPAS Project
WAP project
Eaux et Forêts

EXCITING SUBJECT

Sound theory
Societal relevance
Innovation potential
'Simple system'
Appeal



BRIGHT STUDENTS

V. Deblauwe
A. Diouf

RESEARCH NETWORK

P. Couteron (ENGREF)
J. Lejoly, J. Bogaert (ULB)
G. De Wispelaere, D. Dulieu (CIRAD)
R. Lefever and O. Lejeune (ULB)
T. Bariac (CNRS)

STIMULATING
RESEARCH COMMUNITY

RELIABLE
LOCAL PARTNERS

Prof. M. Saadou,
Dr. A. Mahamane (Niamey, UAM)
Prof. B Sinsin (Cotonou, UAC)



Remote sensing and spatial analysis

BIOME SCALE DISTRIBUTION

Niche modeling

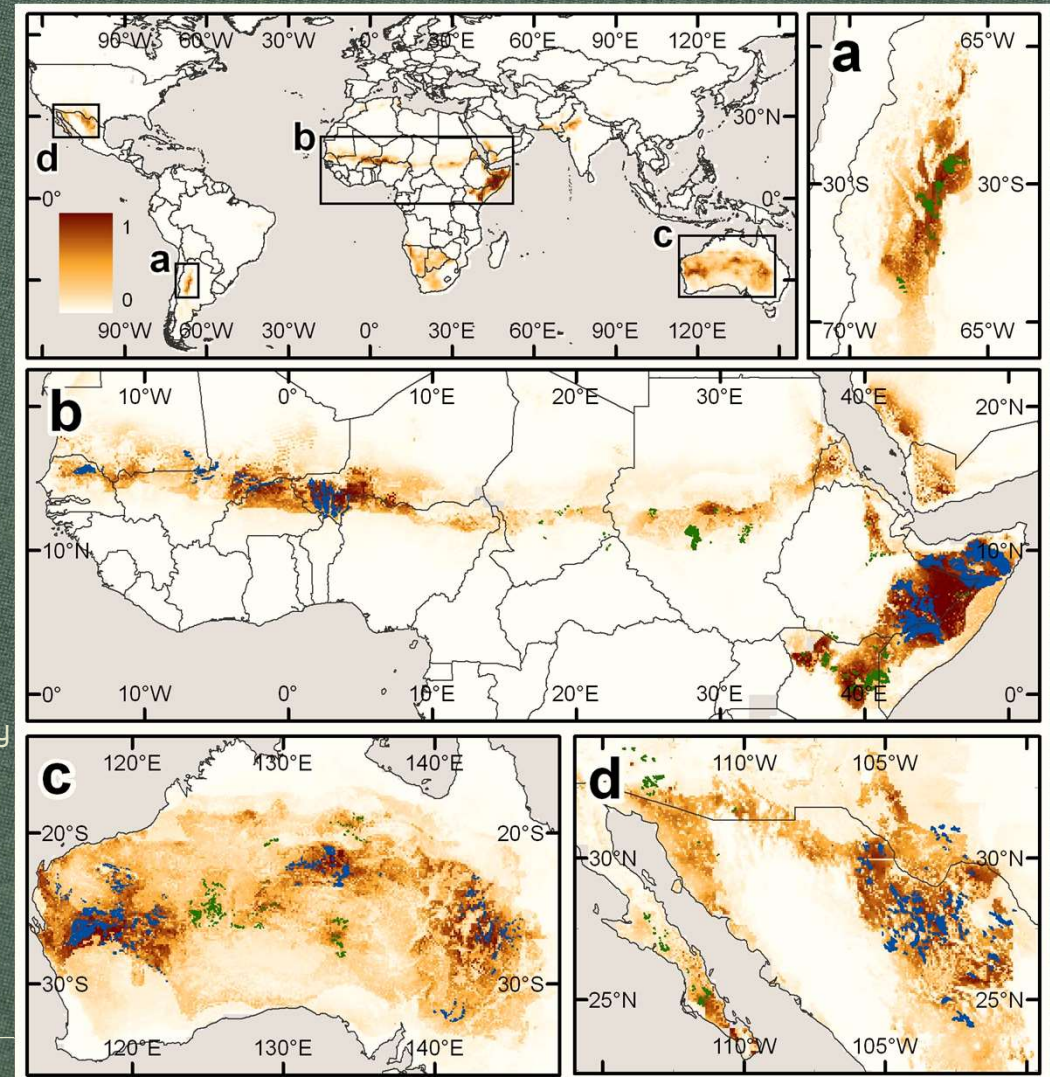
Discovery of many new occurrences !



Orange levels:
Maxent probability
of occurrence

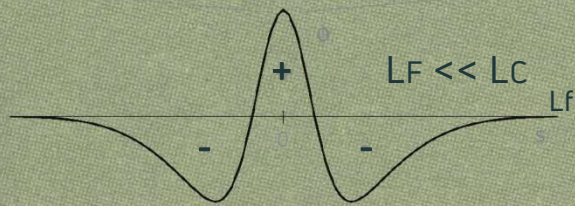
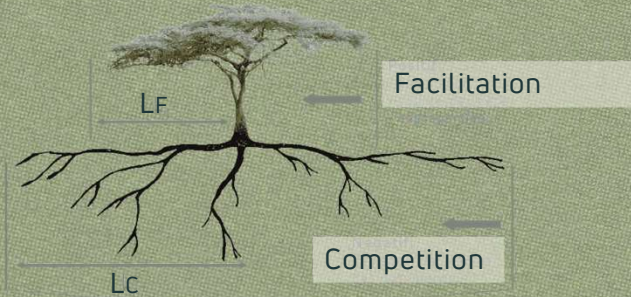
Blue:
known occ.

Green:
new occ.



Theoretical framework for PVPs

ACTIVATION / INHIBITION BASED ON PLANT STRUCTURAL RATIO



MODEL PREDICTIONS

Emergence and spatial patterns modulated by aridity & slope.

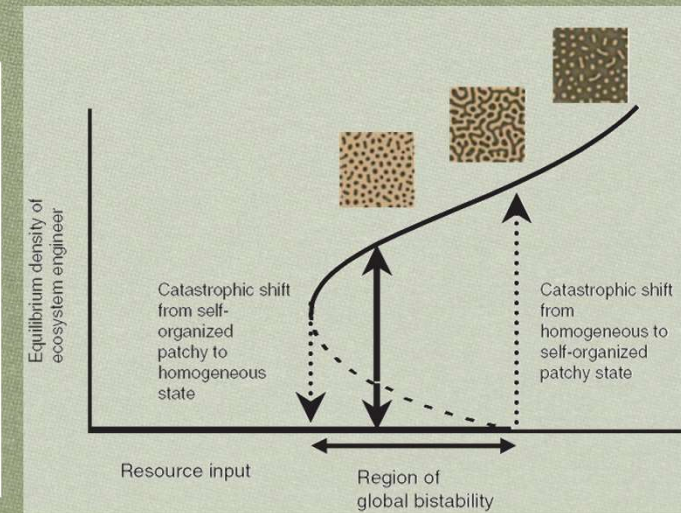
Gaps – labyrinths – spots

Wavelength

Bands perpendicular to steepest slope direction.

Band migration on sloping ground.

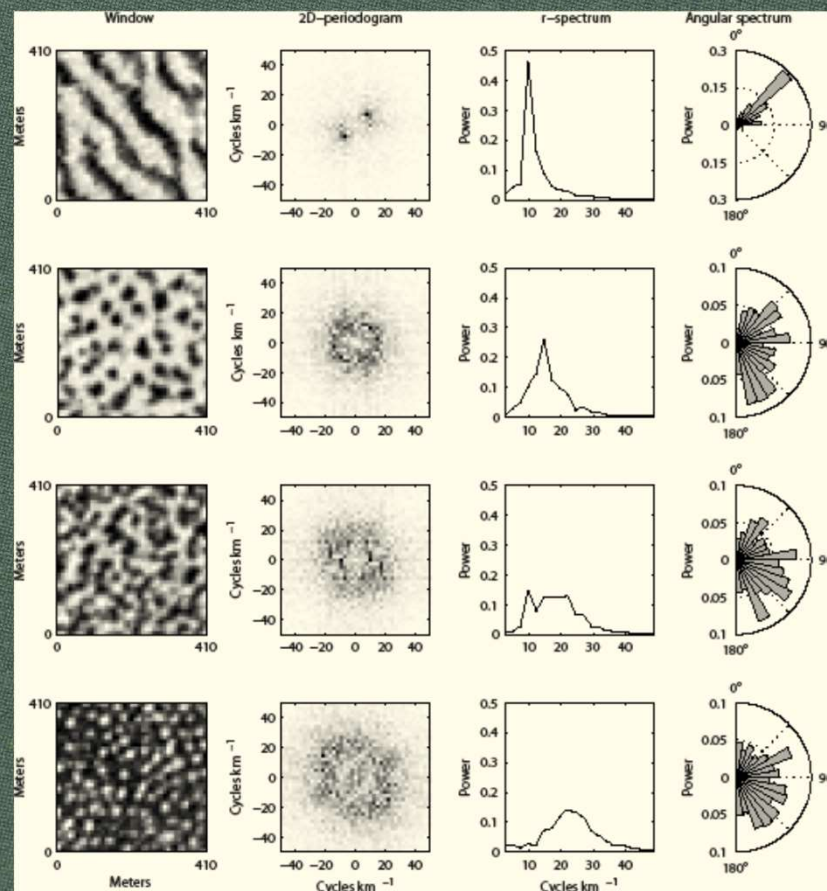
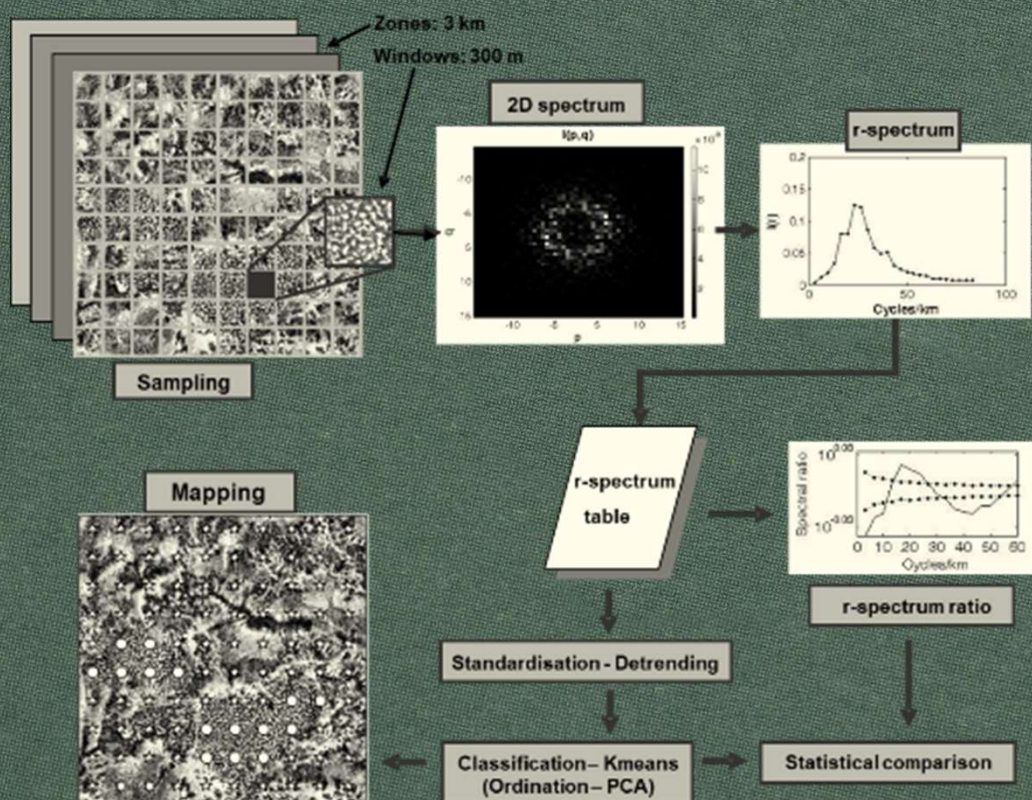
Hysteresis & catastrophic shifts



Remote sensing and spatial analysis

2D local Fourier transform on VHR images

Multivariate ordination/classification



Remote sensing and spatial analysis

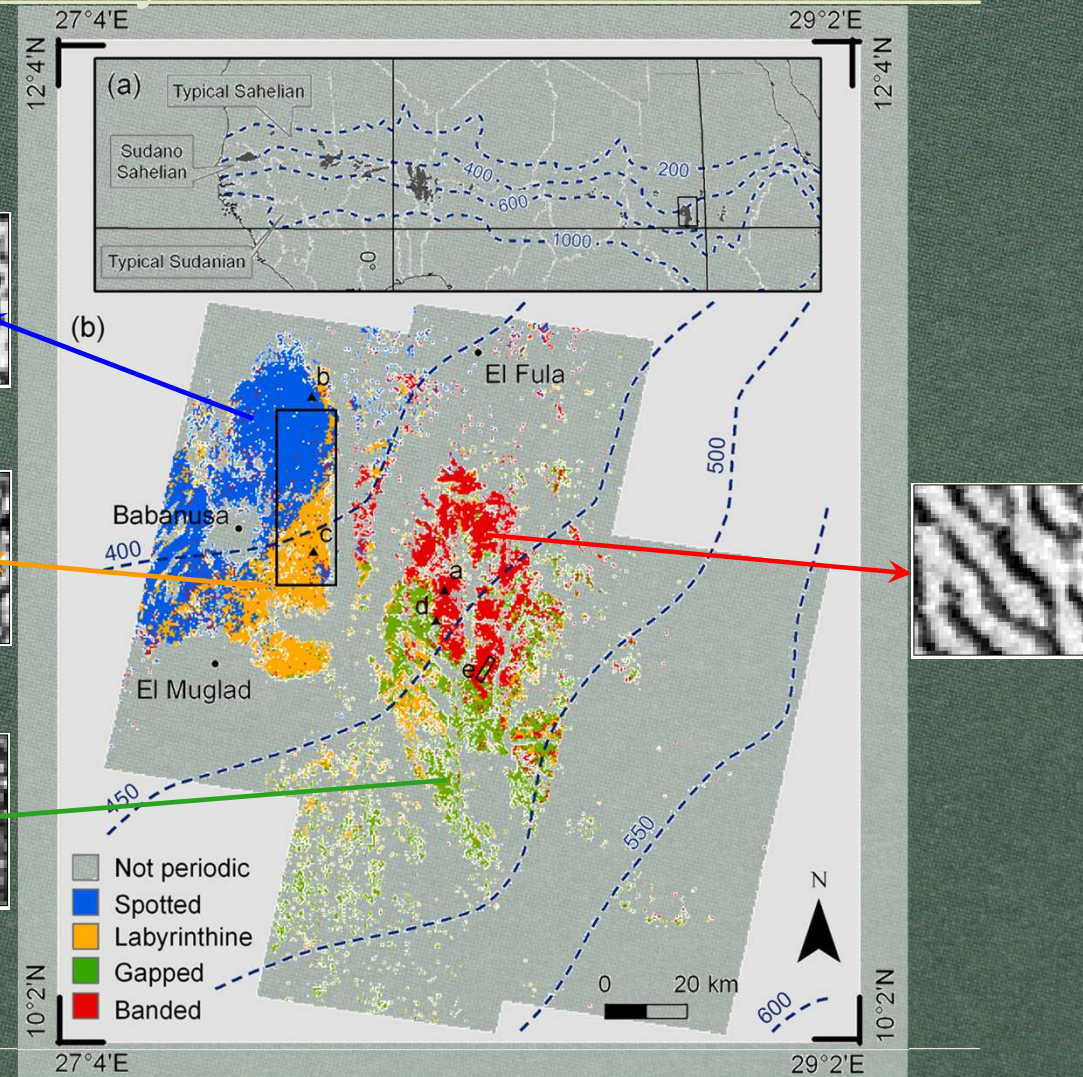
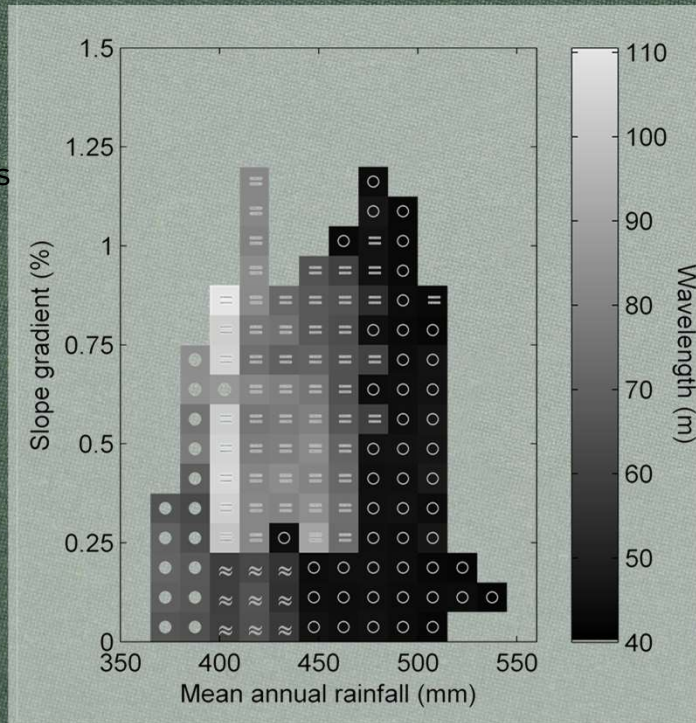
PATTERN MODULATION IN SUDAN (KURDUFAN)

Pattern sequence along aridity gradient

Transition to parallel bands on sloping ground

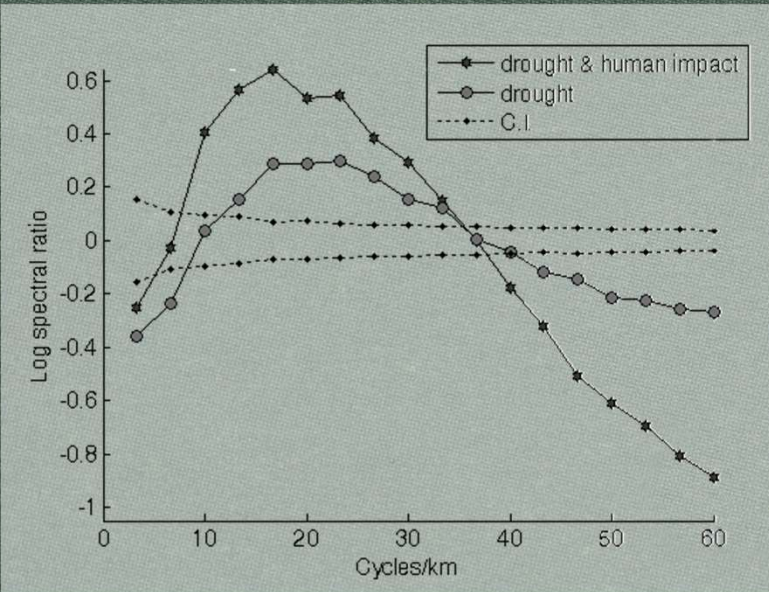
Wavelength is positively correlated with aridity

- = Bands
- Spots
- ≈ Labyrinths
- Gaps

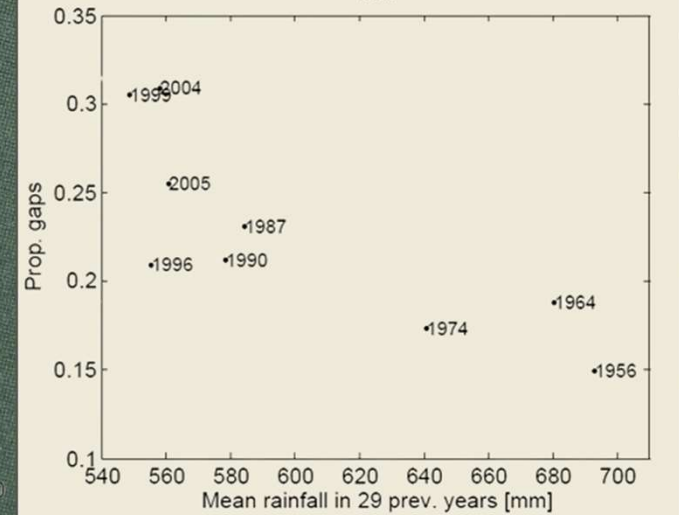
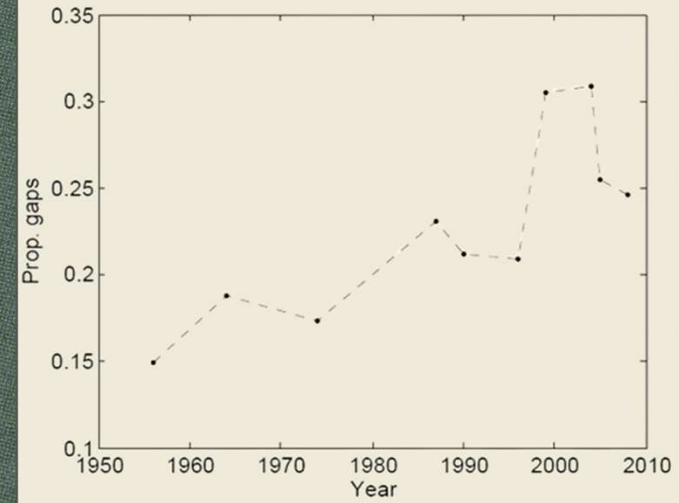
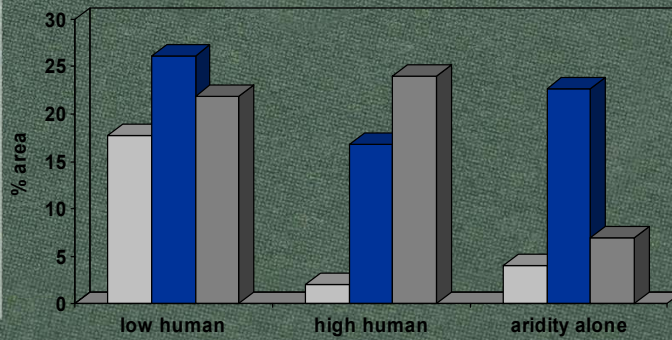
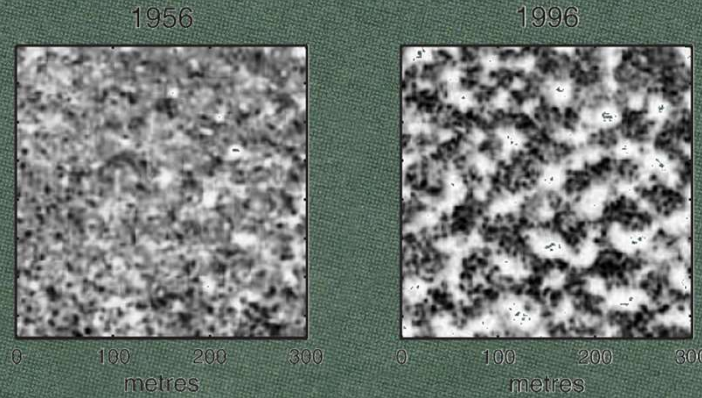


Remote sensing and spatial analysis

TEMPORAL DYNAMICS OF GAPPED PATTERN AREA IN SW NIGER



Average spectral ratio per zone for windows spotted in 96



Remote sensing and spatial analysis

DEPENDENCE ON TOPOGRAPHY

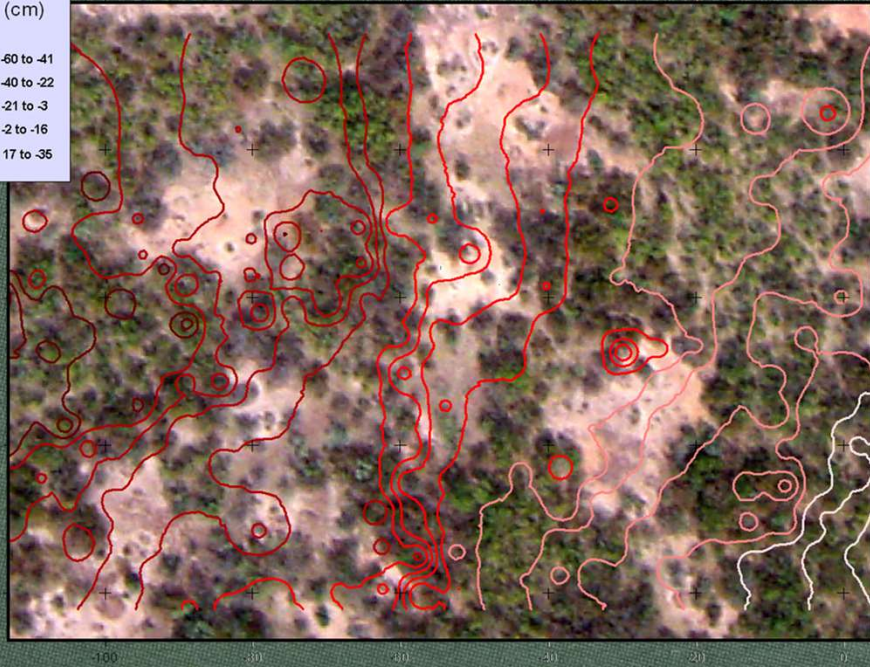
Cross-spectral analysis

Coherence

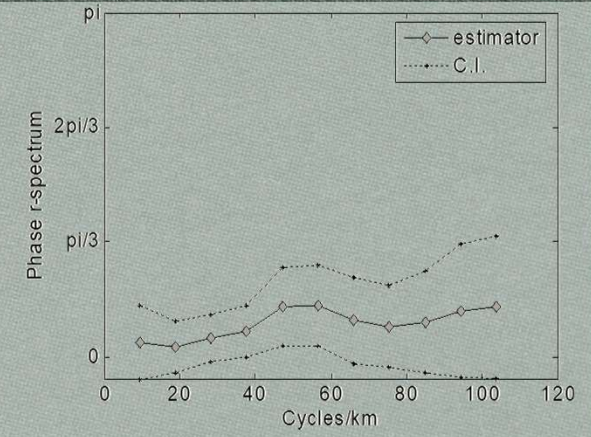
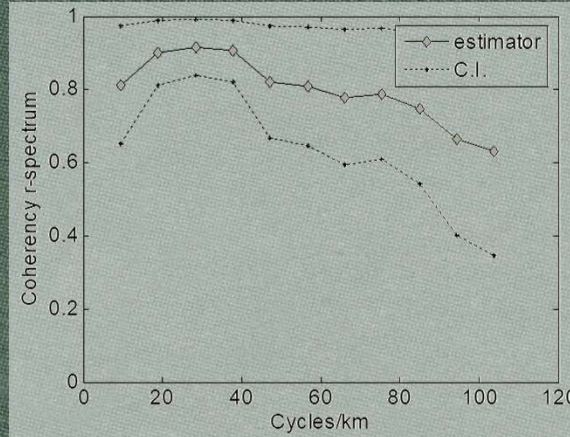
Phase

Relief (cm)

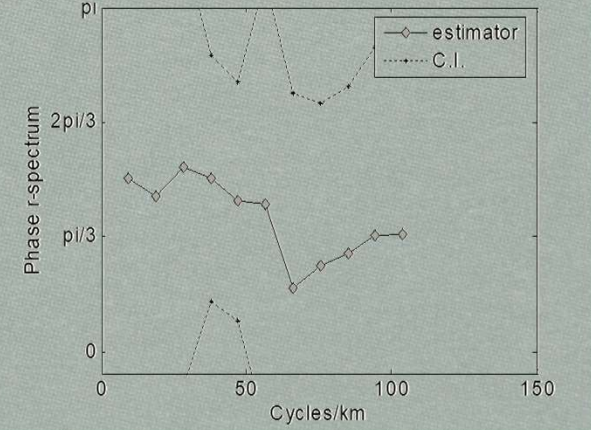
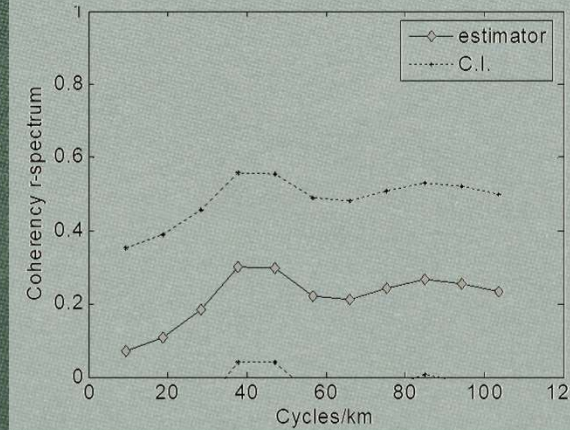
- 60 to -41
- 40 to -22
- 21 to -3
- 2 to -16
- 17 to -35



Biomass - radiometry

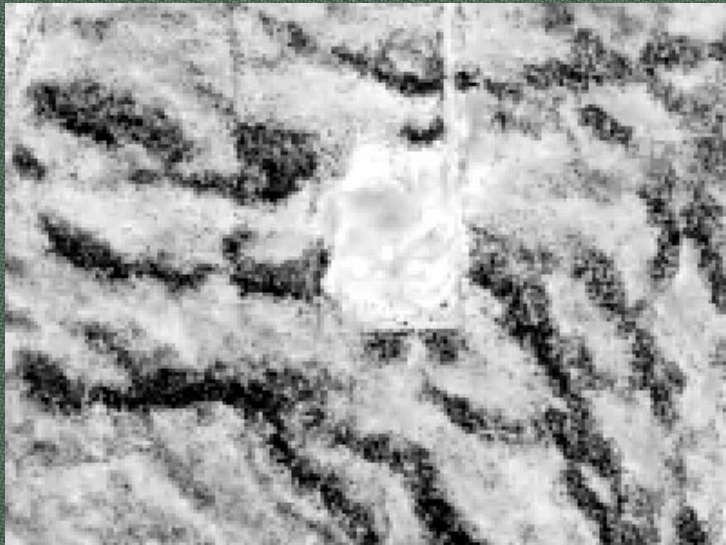


Biomass - TMI



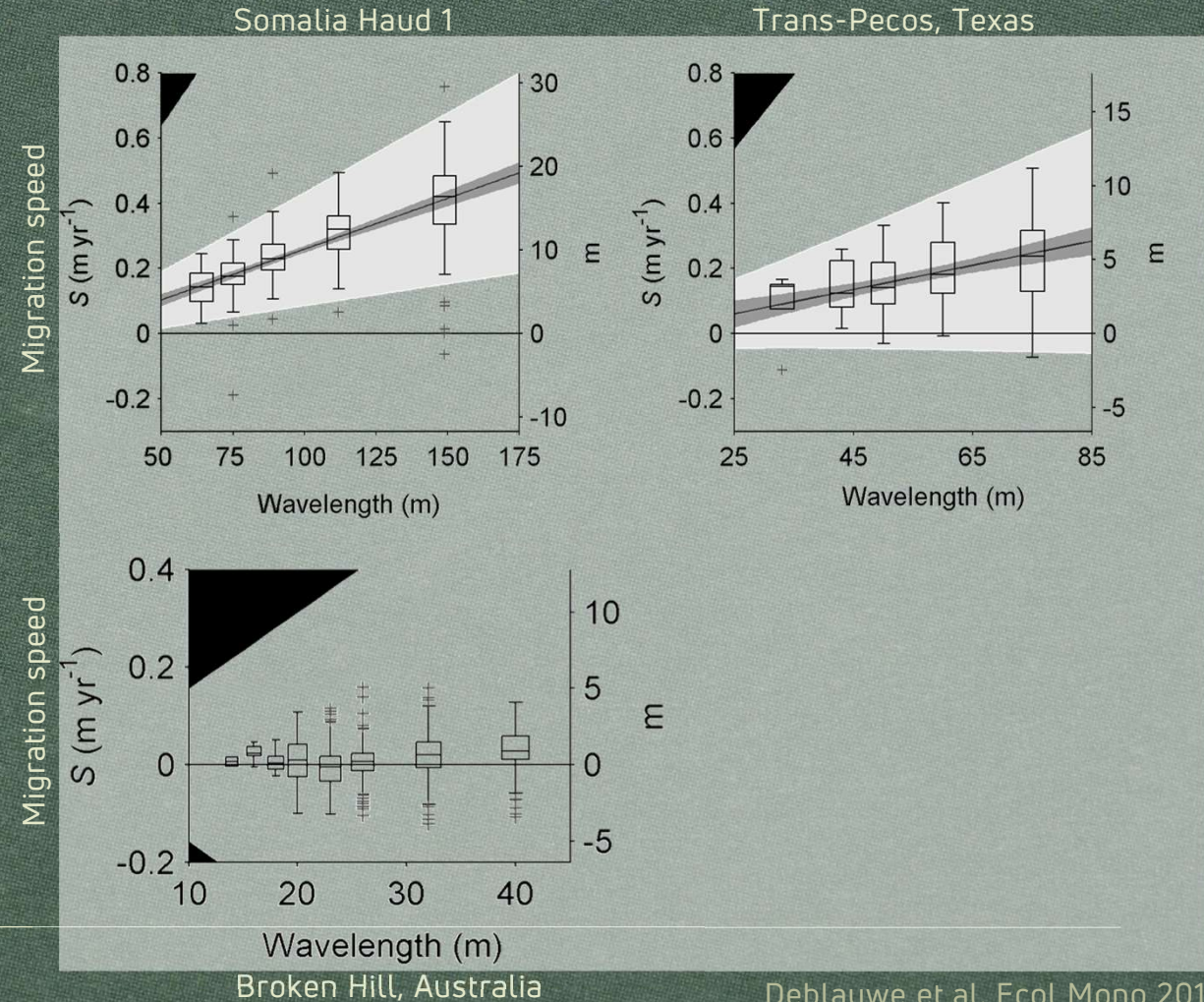
Remote sensing and spatial analysis

BAND MIGRATION



Upslope

Wavelength dependence via cross spectral approach



Allometry and plant interactions

DETERMINING ROOT COMPETITION RANGE

Root excavation with Air Spade

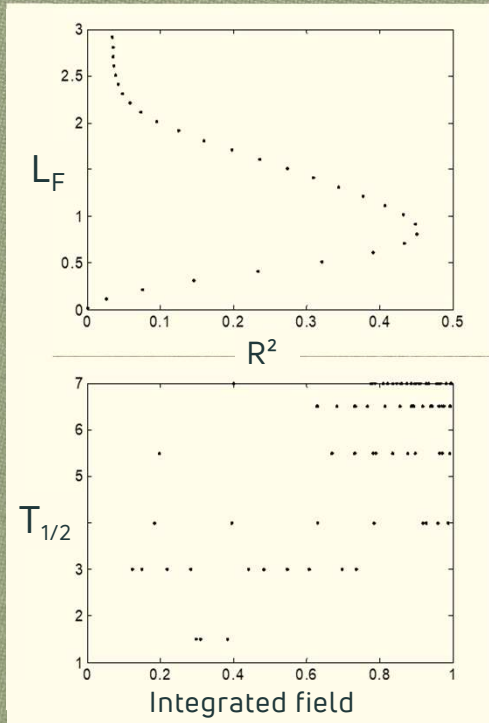
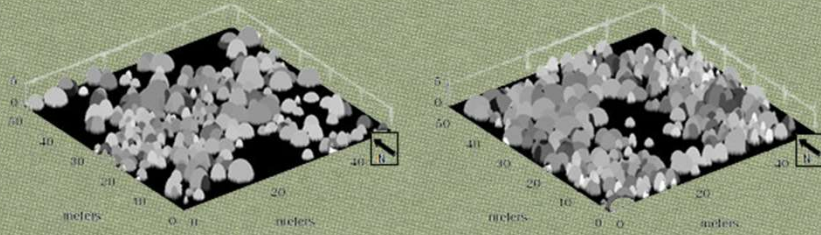
Confirmed by Deuterium tracing



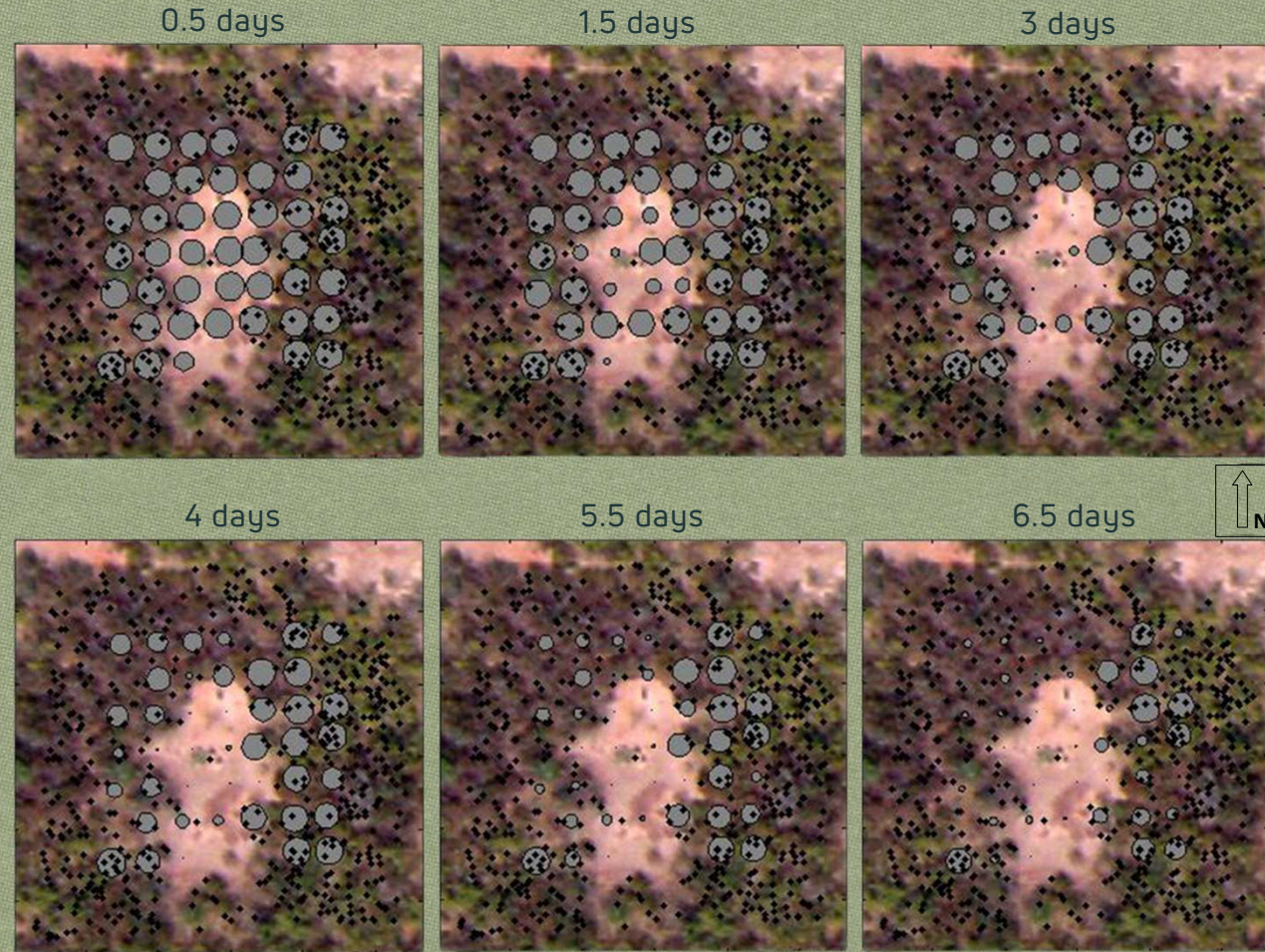
$L_c \gg$

Allometry and plant interactions

DETERMINING FACILITATION RANGE



Stock dynamics after a 37.5 mm rainfall

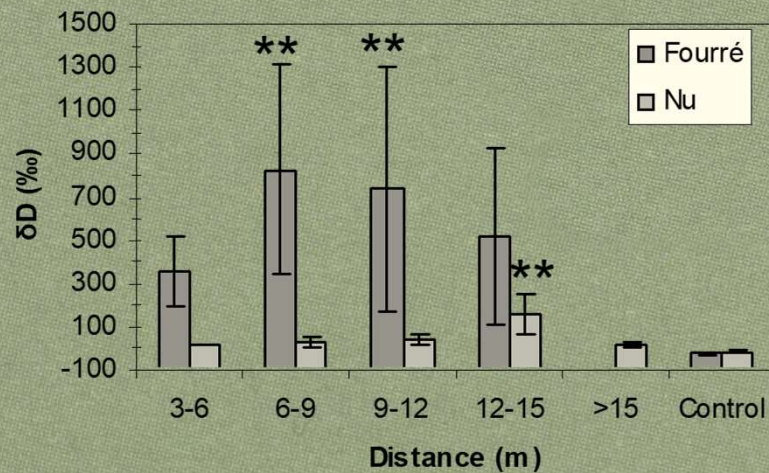


Allometry and plant interactions

WATER TRACING WITH STABLE ISOTOPES (D_2O)

Marked trees after three days (squares).

Irrigation was made at the center of each site. Distances in meters.



Mean isotopic ratio in the trees on the third day at different distances for each site (Fourré = irrigation in a thicket; Nu: irrigation in a bare area).

Conclusion on PVP studies

VEGETATION ORGANISATION

Stable
Endogenous
Emergent
Modulated

=> Self-organisation

INTERACTION MECHANISMS

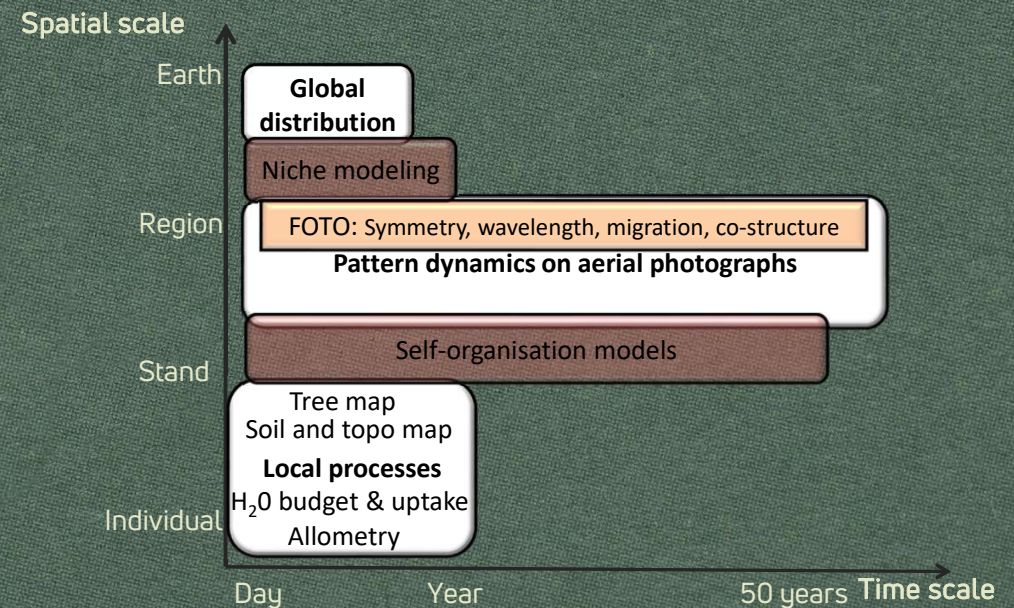
No relief induced run-off or other external forcing

No evidence of differential infiltration in the root zone

Evidence of differential Evapo-transpiration

Plant structural ratio induces distinct facilitation/competition ranges

The observed plant structural ratio can produce large scale patterns



The role of fire

LINKING VEGETATION STRUCTURE TO FIRE REGIME

PVPs impervious in semi-arid land

Fire can induce patterns in mesophyllous systems



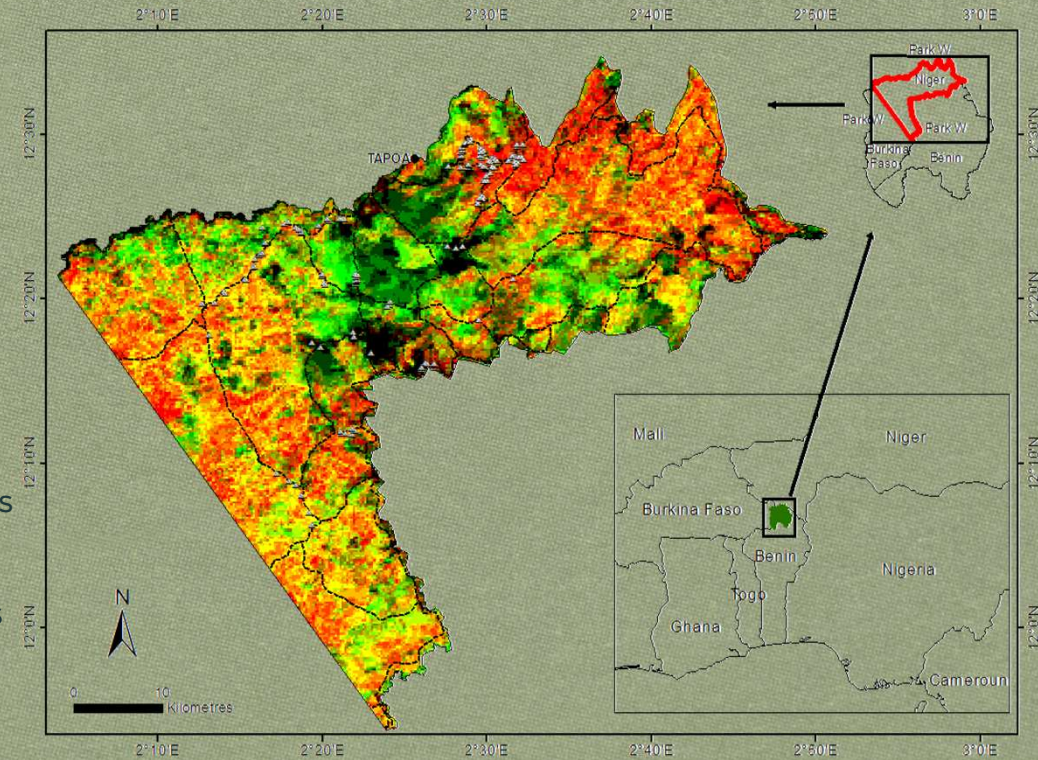
Red levels:

Frequency of early dry season fires

Green levels:

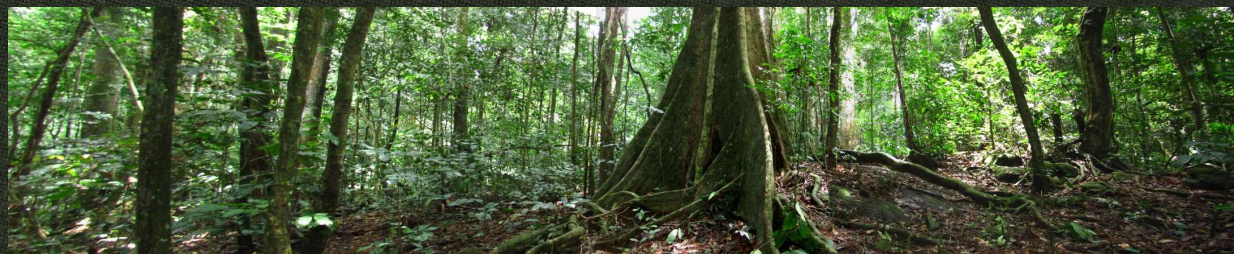
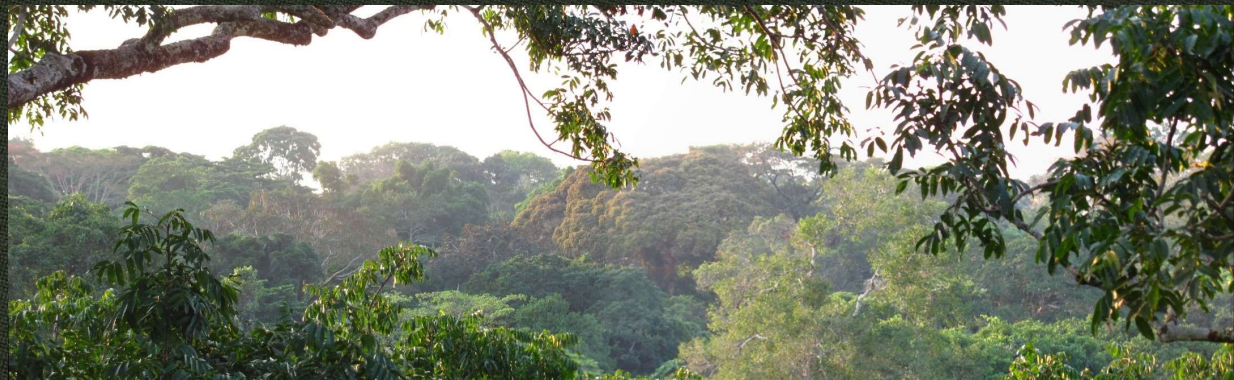
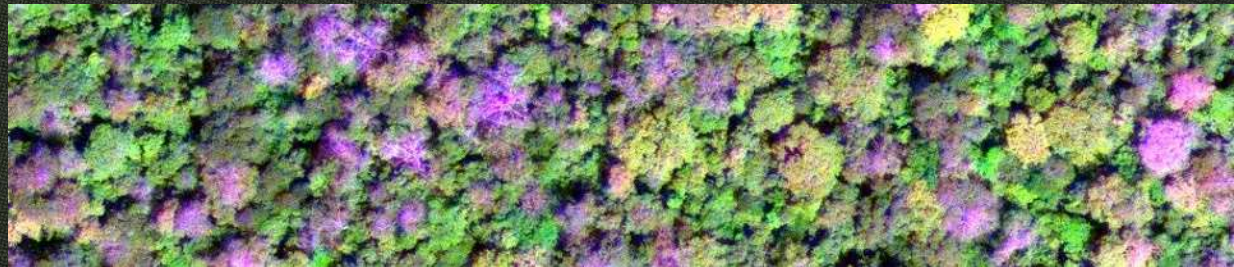
Frequency of late dry season fires

Fire Frequency based on MODIS record (7 years) at 250 m resolution

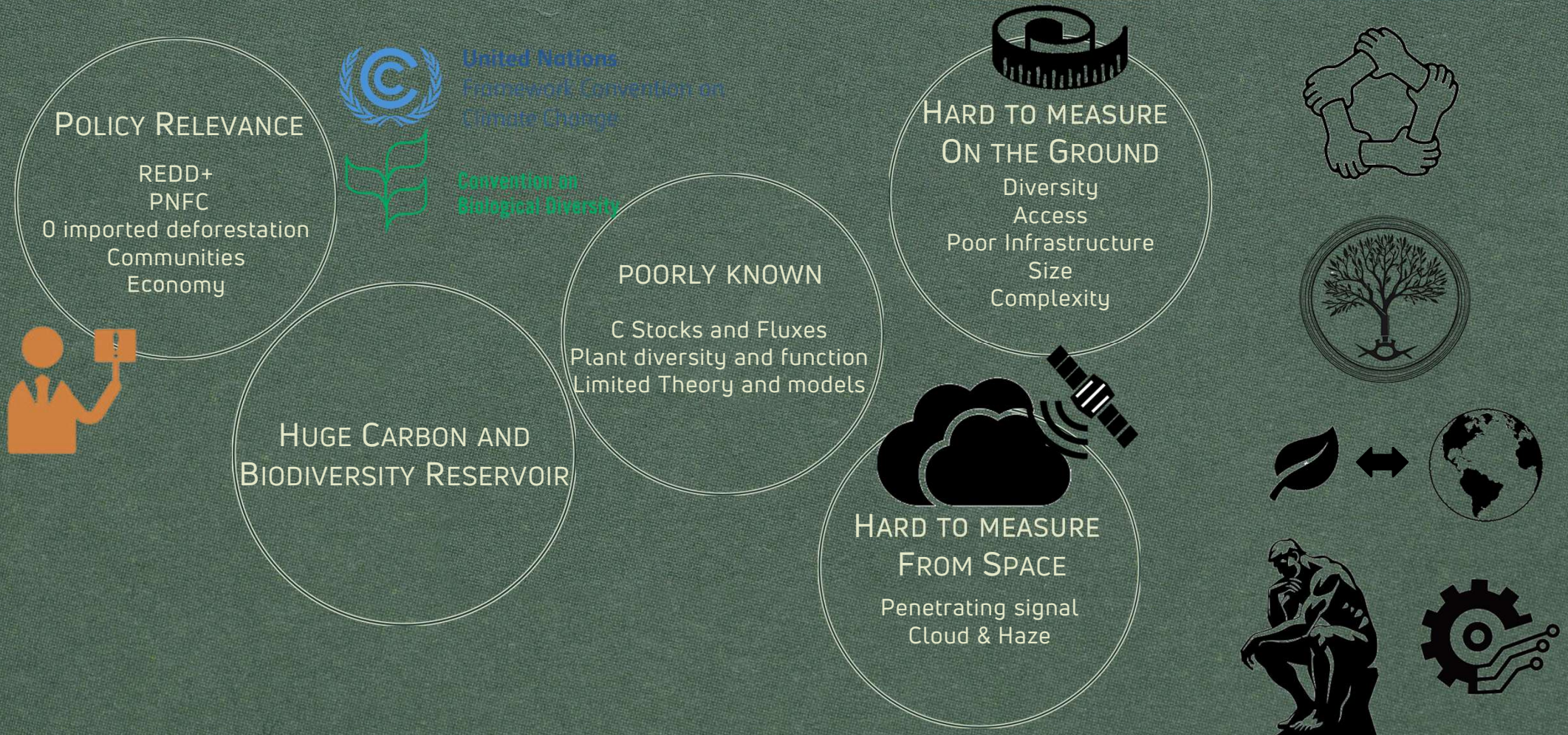


Tropical forests

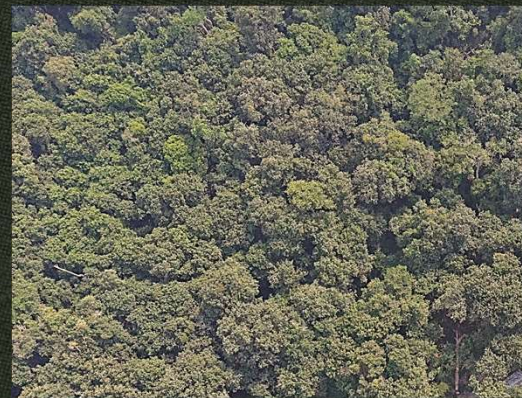
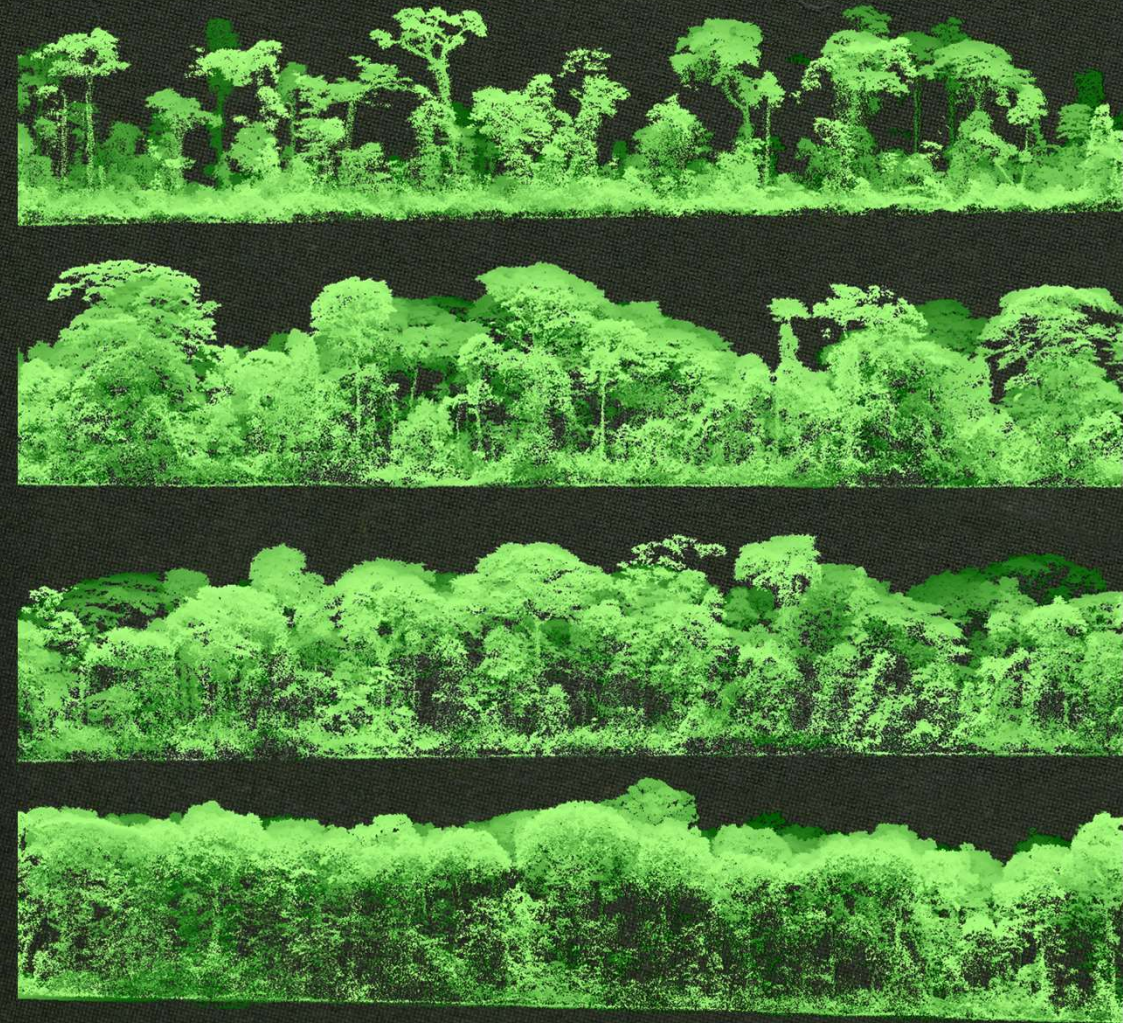
2006 – now... and on



Why bother?



Emergent behaviors and multiple stable states ?



DESSFOR (P.I. Maxime Réjou)

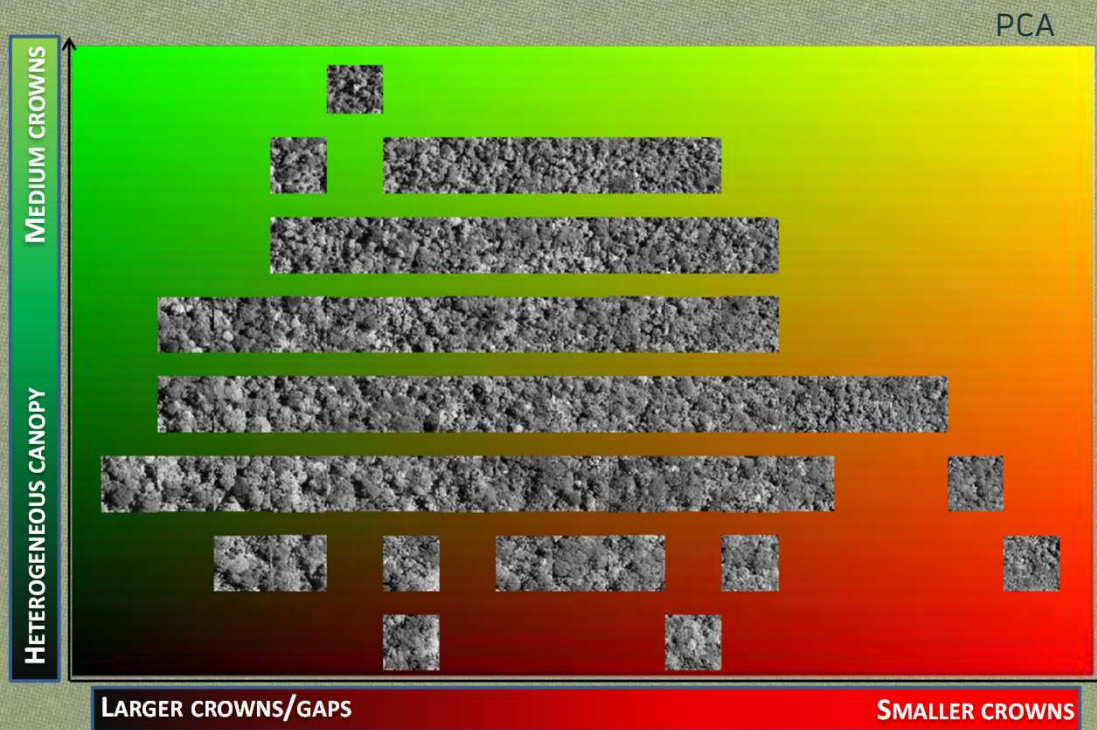


Textural analysis

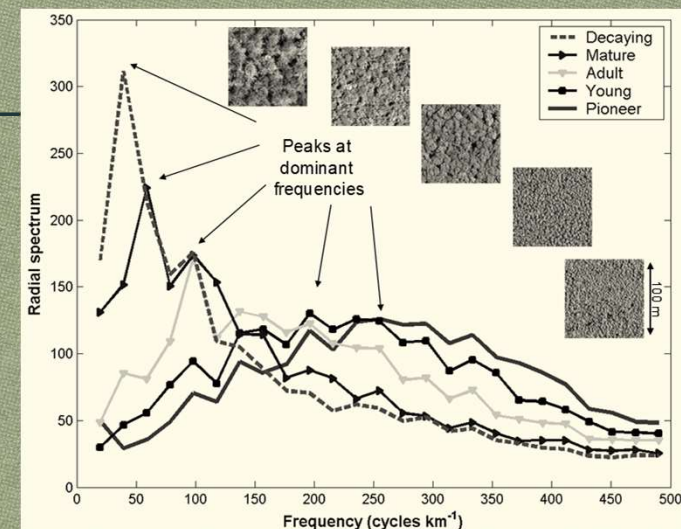
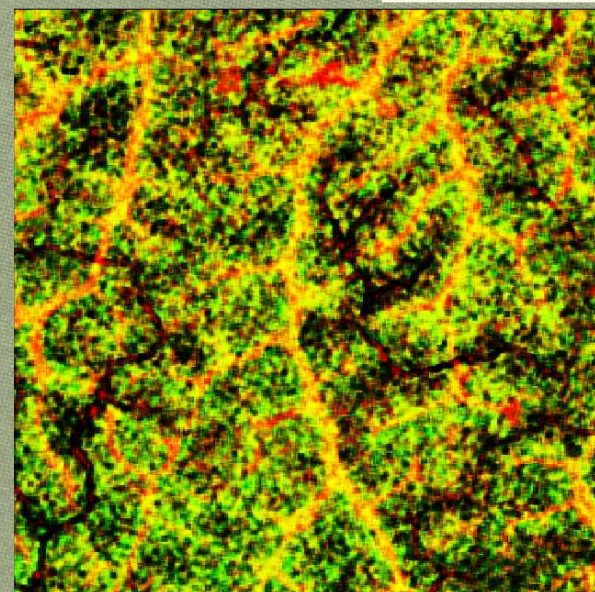
FOURIER TRANSFORM TEXTURAL ORDINATION (FOTO)

Textural features based on VHR optical images of forests

Locally efficient and unsaturating predictors of forest structure and biomass

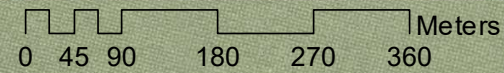
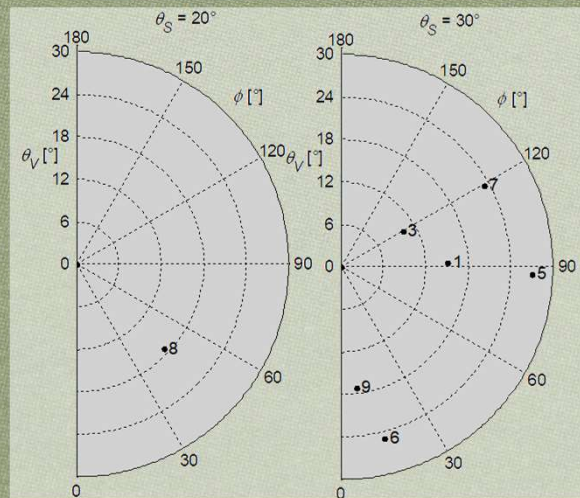
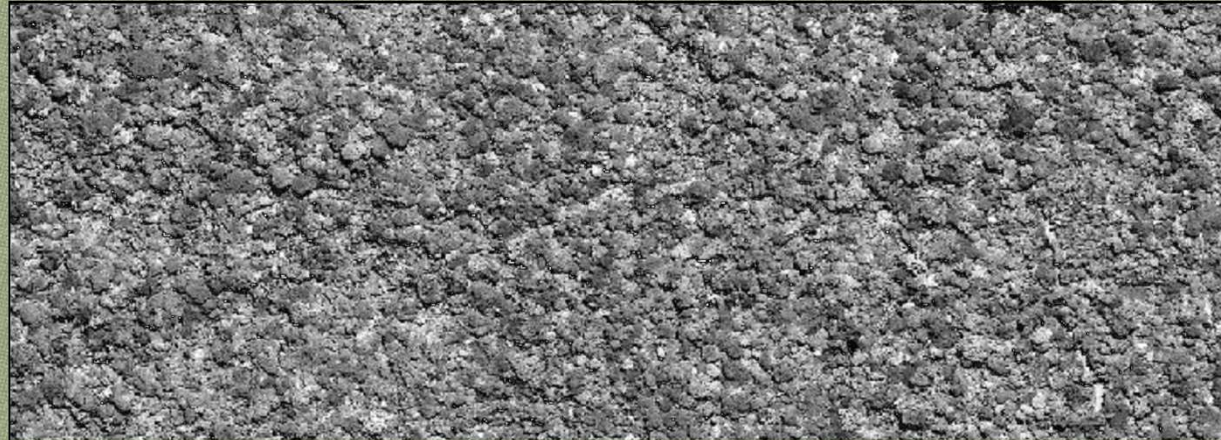


Map of PCA coord.



Textural analysis

ISSUE: DIRECTIONAL STABILITY



	vz	sv	sz	year
2	15.07558	162.8582	34.72709	2000
4	24.15956	42.2848	28.16477	2000
1	10.09665	92.1472	33.16828	2002
3	13.56898	120.1528	37.70374	2002
9	27.00608	7.2147	31.49029	2006
8	24.97276	45.9589	31.6663	2007
7	23.22279	119.7254	33.18998	2008
5	17.16577	87.9187	21.56988	2009
6	17.17448	14.2949	26.0551	2009

Textural analysis

ISSUE: DIRECTIONAL STABILITY

MODELLING AND SENSITIVITY ANALYSES

Radiative transfer models (DART) based on LiDAR or Simulated stands
Multi-angular VHR imagery dataset

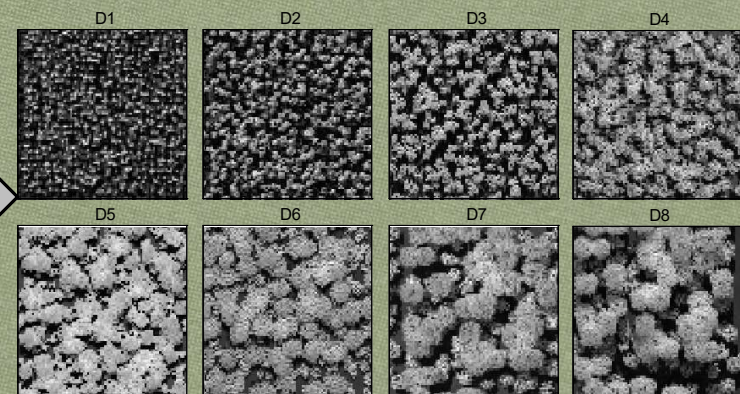
3D stand models



Radiative
transfer
(DART)



Canopy images



Textural analysis

ISSUE: DIRECTIONAL STABILITY

Inter-image texture calibration Panchro



FOTO RGB

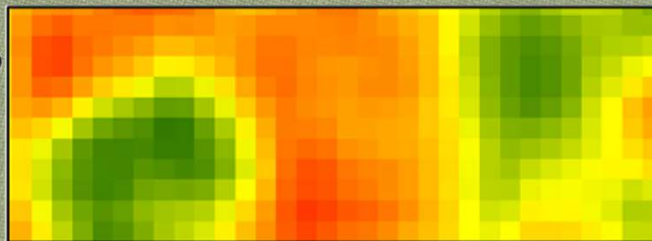
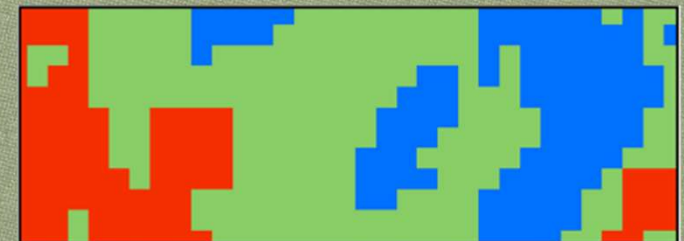
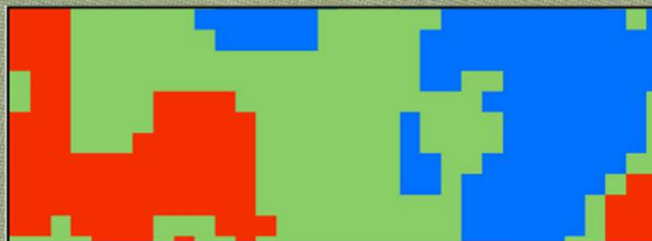
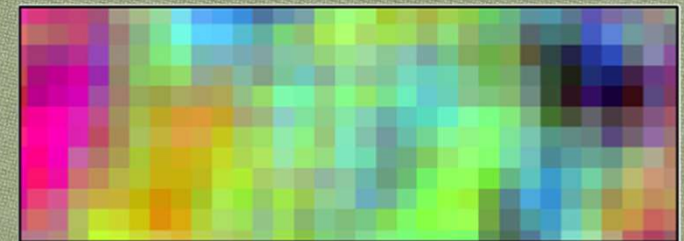
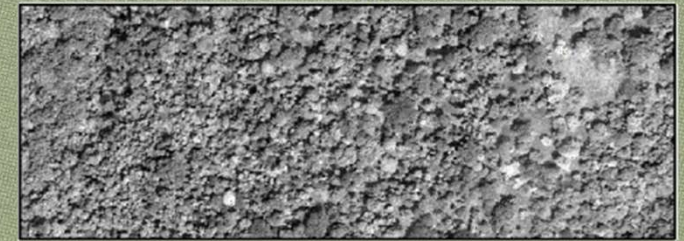
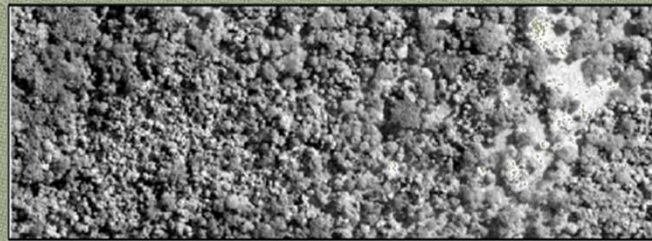
- PCA1
- PCA2
- PCA3

Classes

Aboveground biomass (Mg/ha)
High: 300
Low: 100

Quickbird

Geoeye



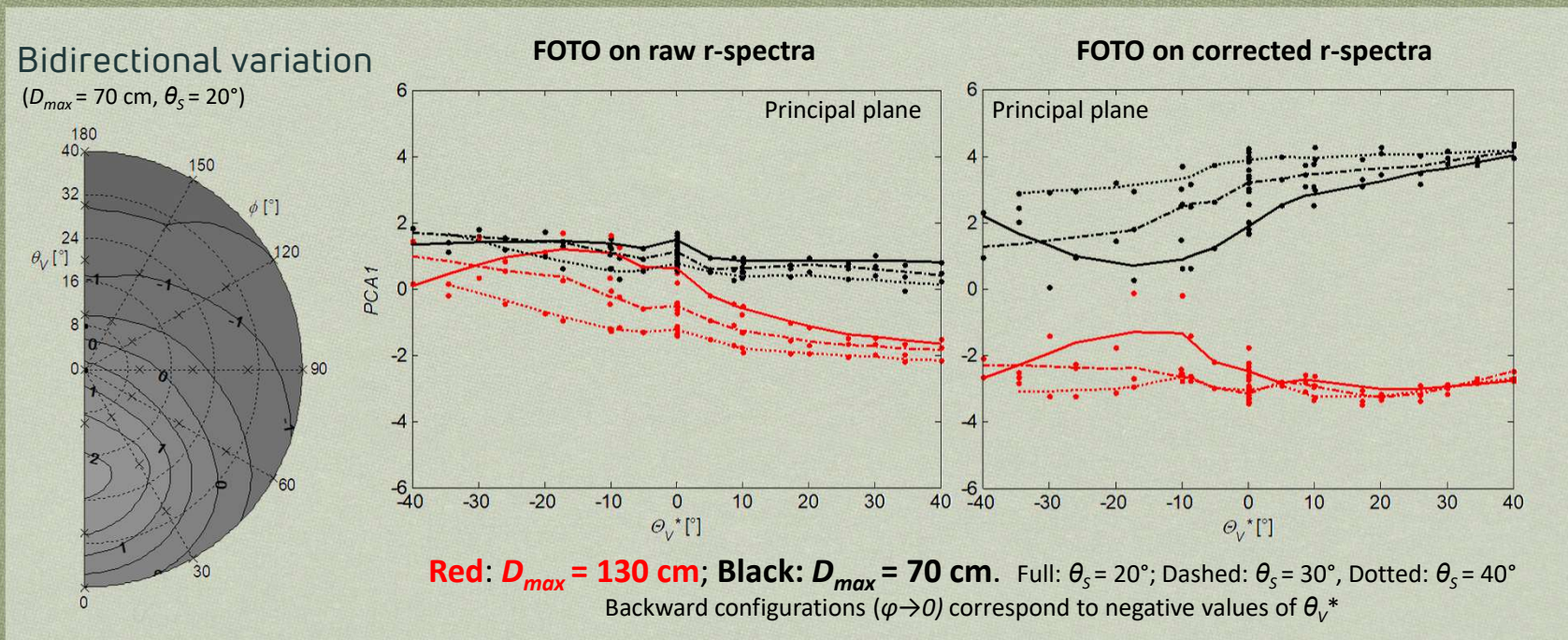
Textural analysis

ISSUE: DIRECTIONAL STABILITY

TEXTURE IS APPROX. STABLE

In forward acquisition configurations, without corrections

Over all acquisition configurations except around hotspot direction, after texture inter-image calibration



Textural analysis

LARGE SCALE DEMONSTRATION



The FOREST Consortium

Improved Field Observations
REDD+
MRV

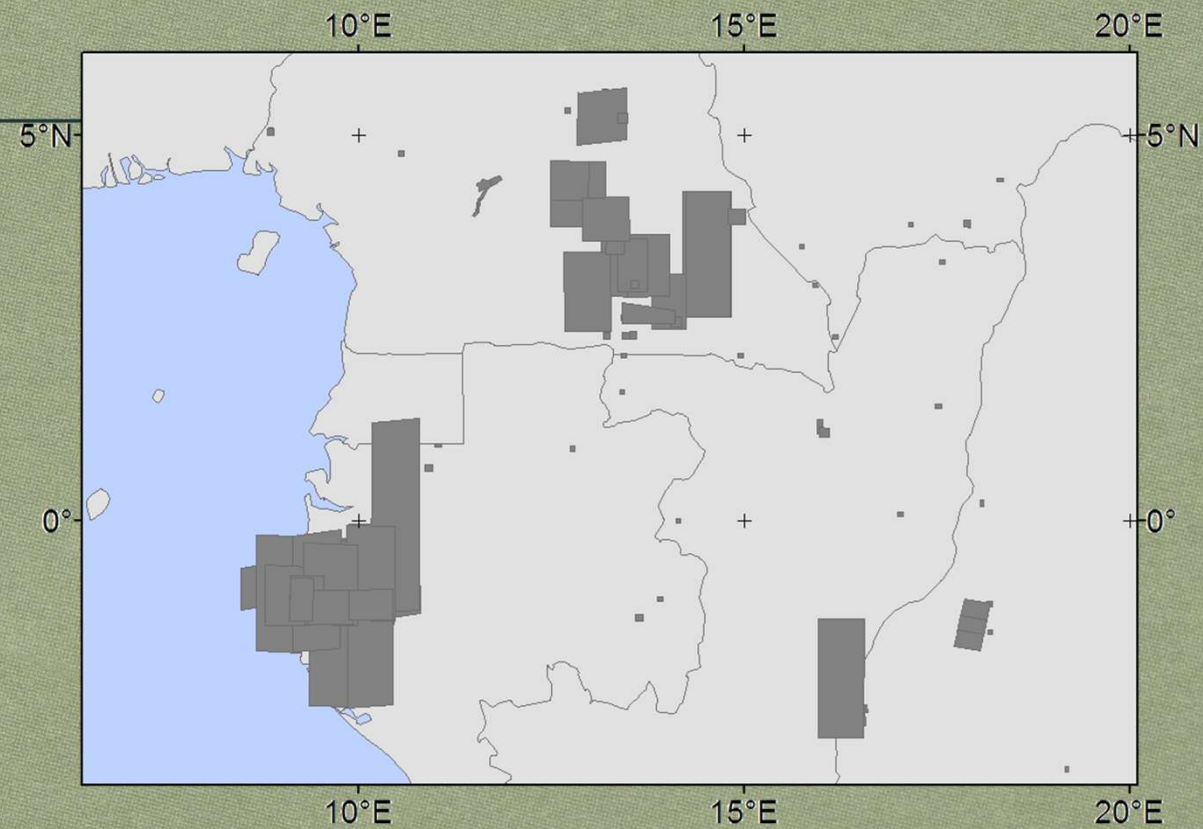
Fully Optimised and Reliable EmissionS Tool

FOREST

An Integrated Service
Tailored to the Needs of
Sustainable Forest Management

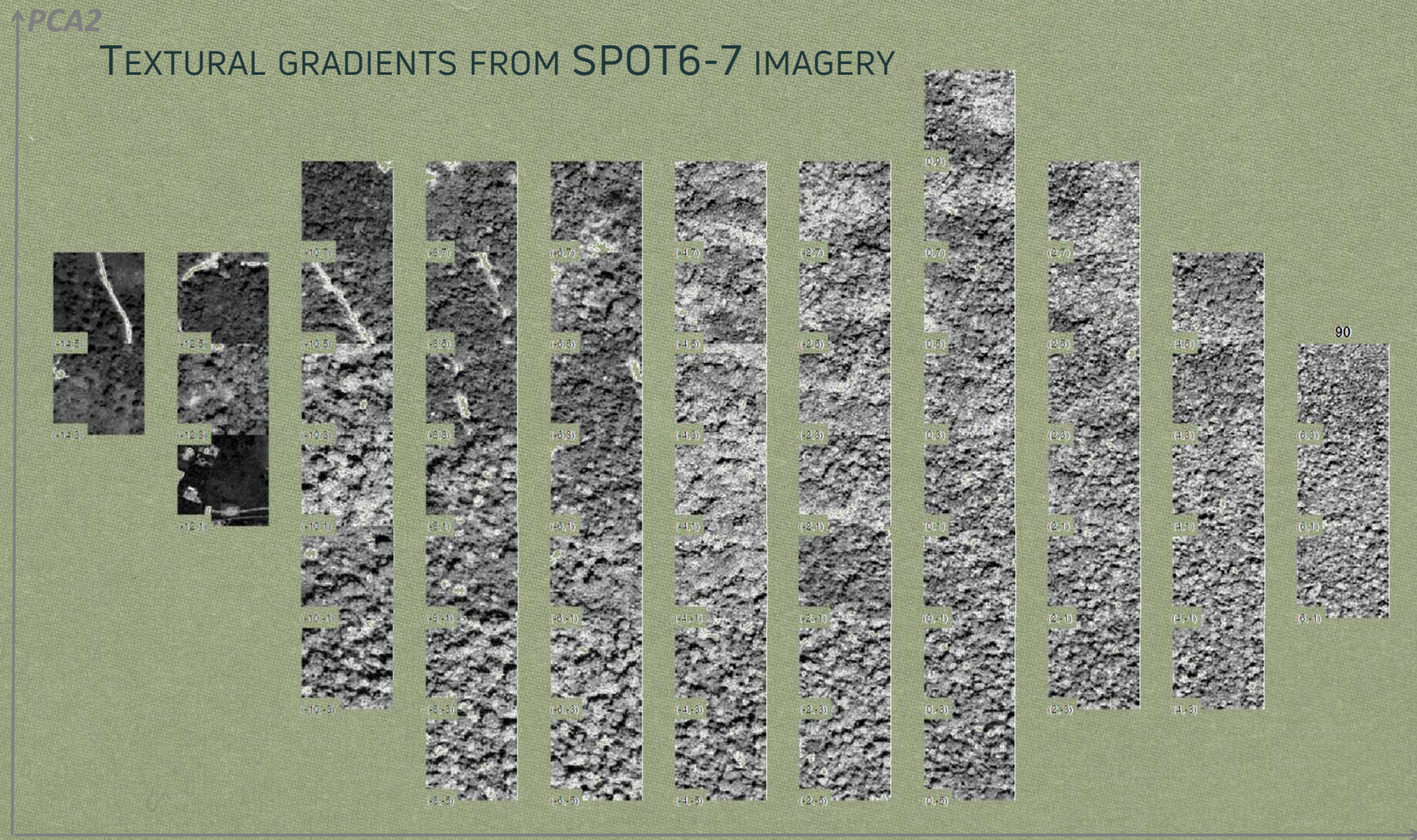
Enhanced Identification
Reduction of Uncertainty

Contact: forest-kic@astrium-geo.com



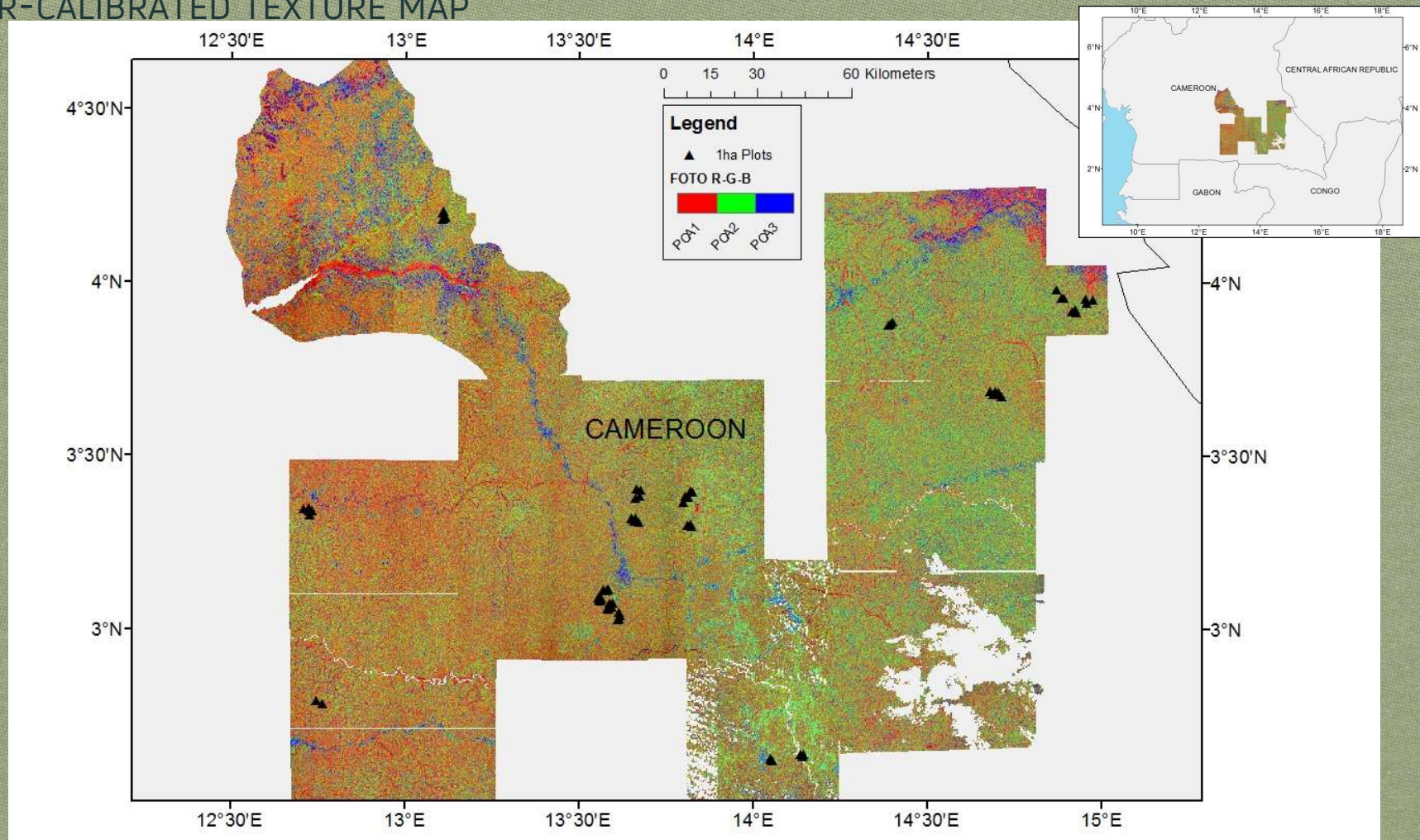
Spot 6/7 & Pleiades VHR imagery
Inter-images textural calibration
120 1-ha ground calibration plots

Textural analysis



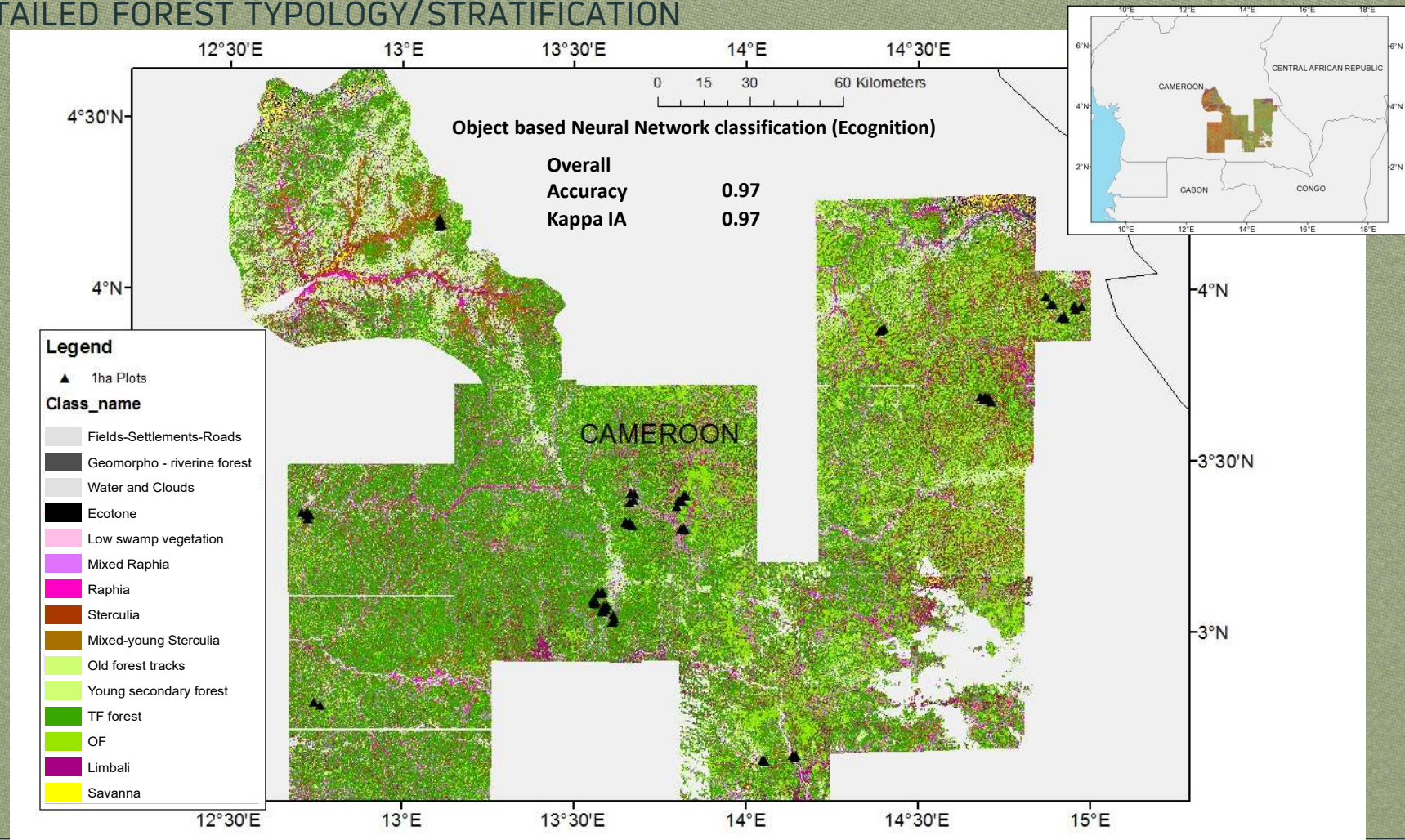
Textural analysis

INTER-CALIBRATED TEXTURE MAP



Textural analysis

DETAILED FOREST TYPOLOGY/STRATIFICATION



Textural analysis

CURRENT STATUS



More than a decade of development !

Locally good/unsaturating predictor of forest structure, AGB and degradation (texture change)

BUT:



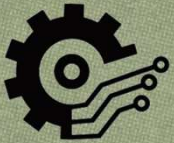
Coslty and scattered imagery data (specially for the relevant VHR Pleiades, GeoEye, etc.)

Different forest types (monodominant) with different texture-structure relationships

BTF and sensor effect proved difficult to correct completely: overlap needed

Still need extensive and qualitative ground calibration

Still need clean spectral information



AI / Deep learning approaches use textural information while potentially solving for instrumental/atmospheric effects

Plan B for Forest Mapping



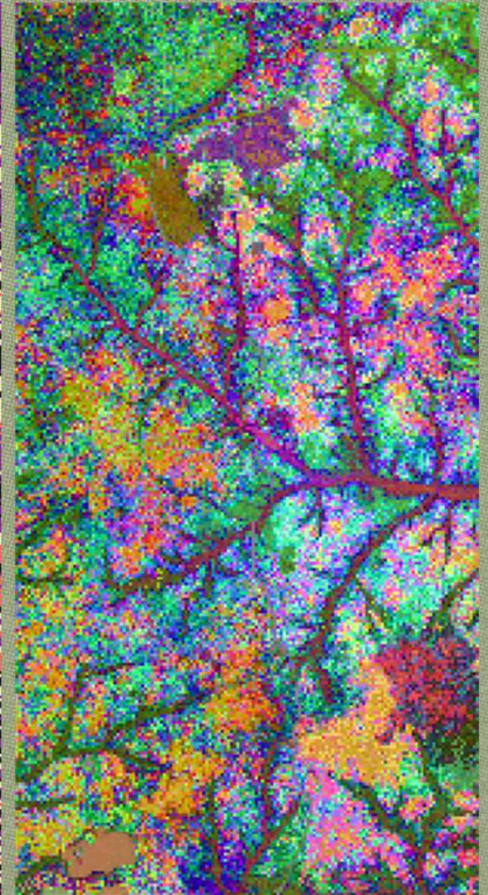
Uncorrected
Pleiades Mosaic



ResNet 50



Vision Transformer + DINOv2 SSL



Plan B for Forest Mapping

MULTISPECTRAL EO DATA

E.G. SENTINEL 2 IMAGERY

Good repeat (5 days)

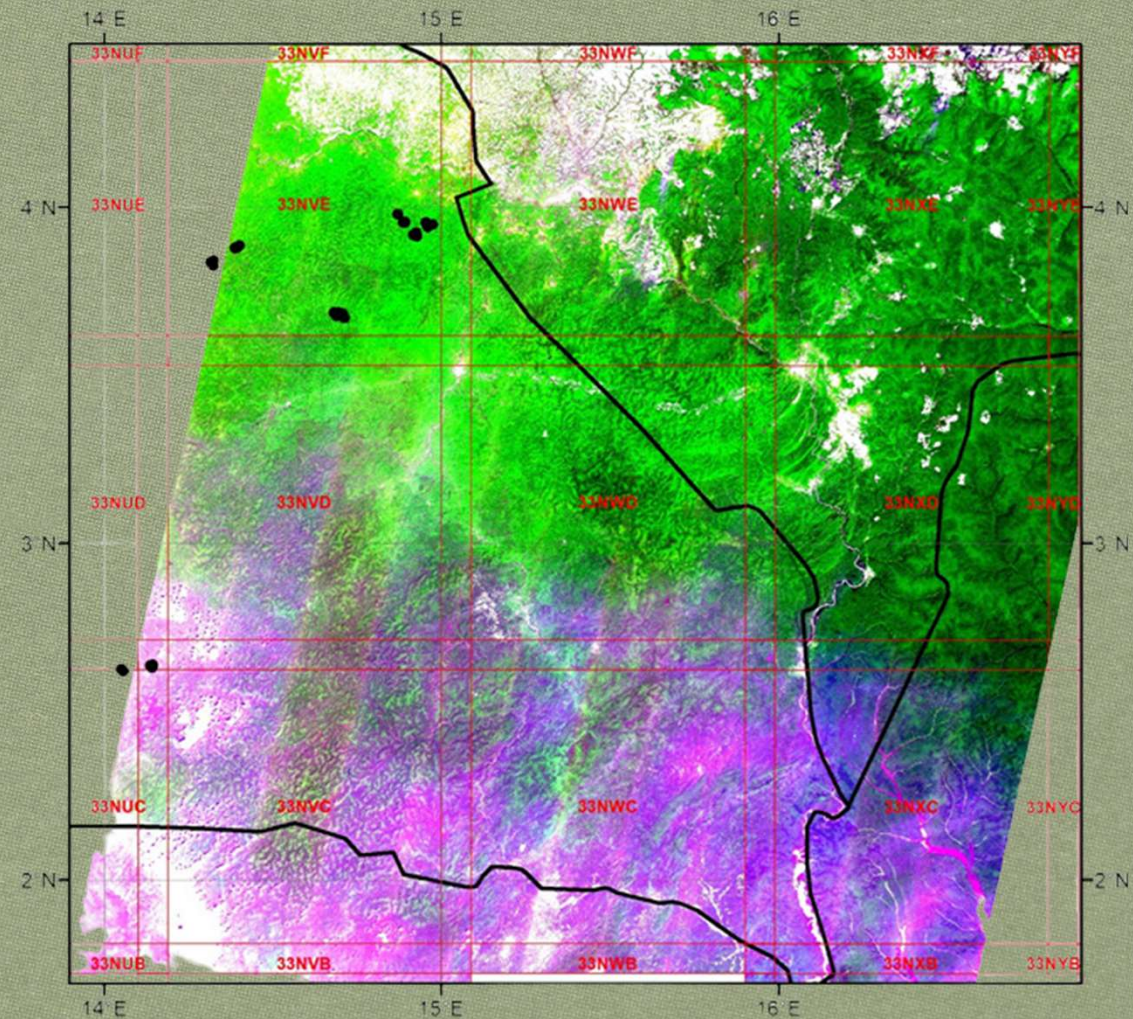
Rich spectral information (13 bands)

Informative on forest age, composition, phenology, degradation, fragmentation (edge)...

BUT:

10 m resolution (canopy texture)

Off-the-shelf products useless



Plan B for Forest Mapping

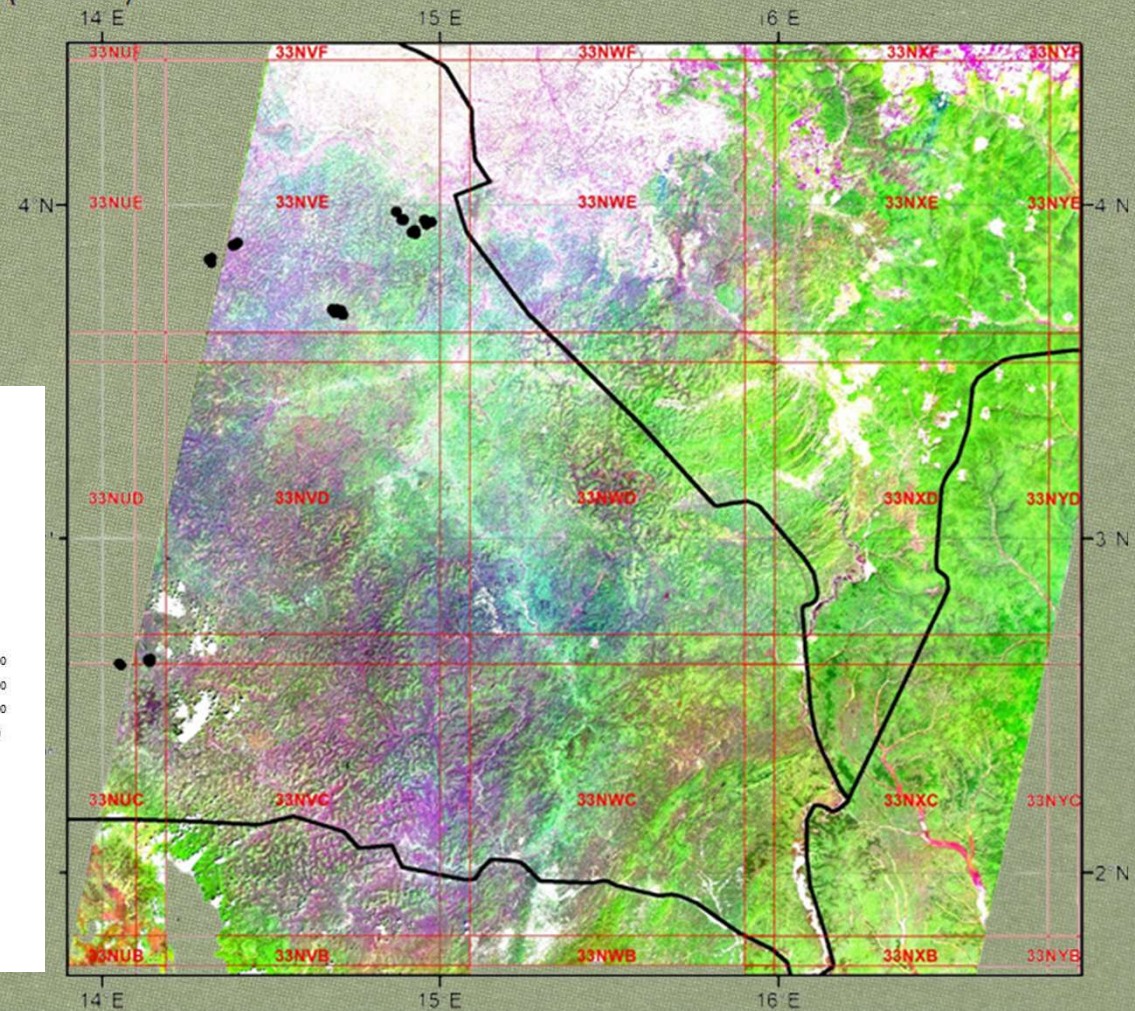
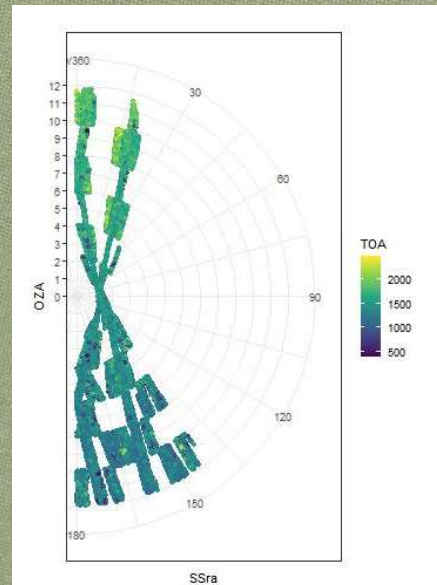
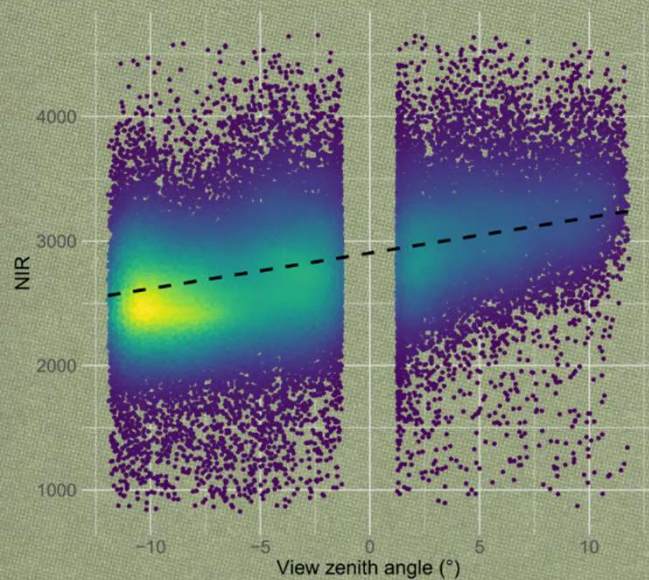


SENTINEL 2 IMAGERY CORRECTION

Atmospheric (Overland)

BRDF (RTLS, regional calibration)

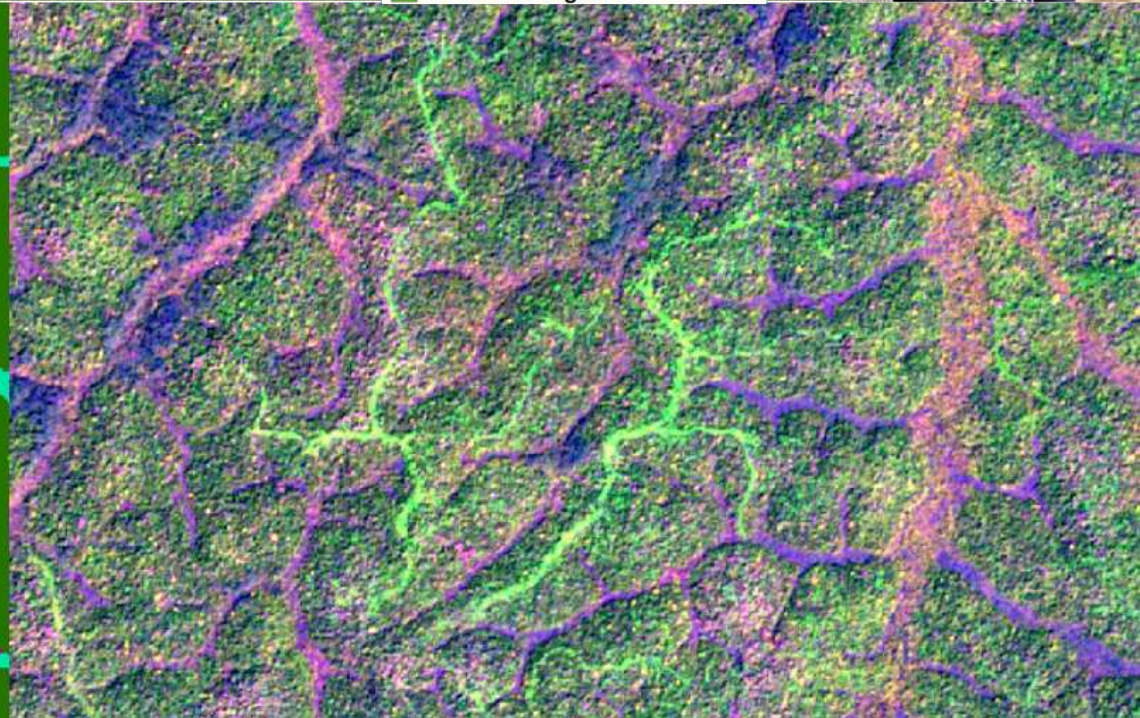
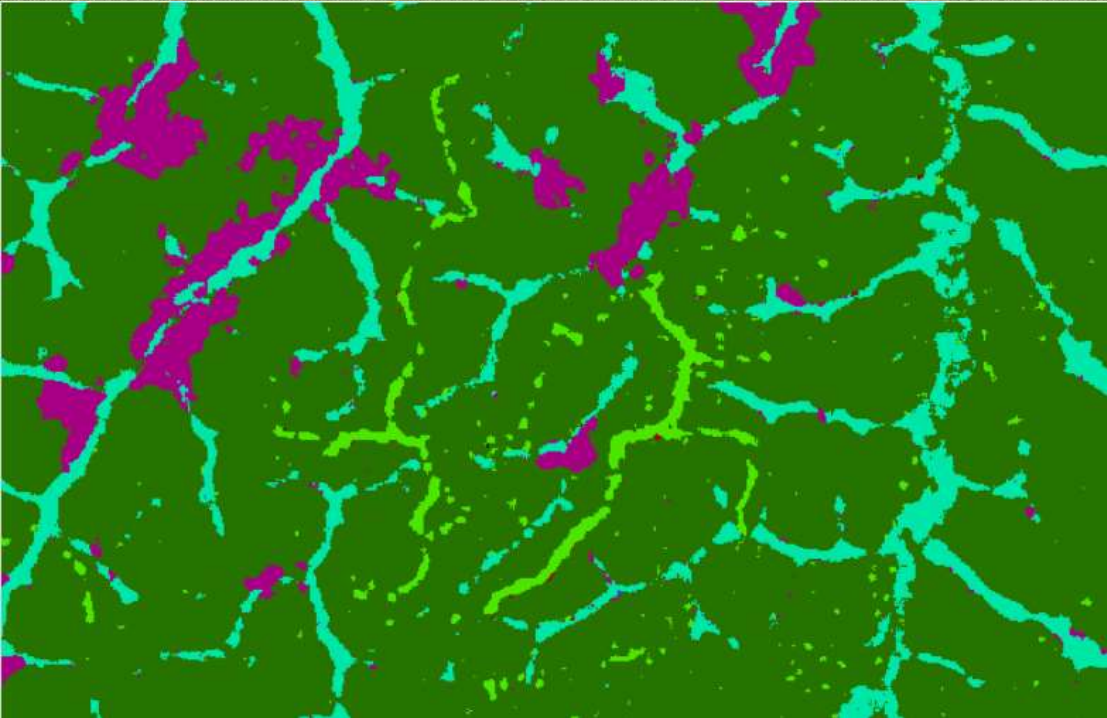
Destriping (empirical)



Plan B for Forest Mapping

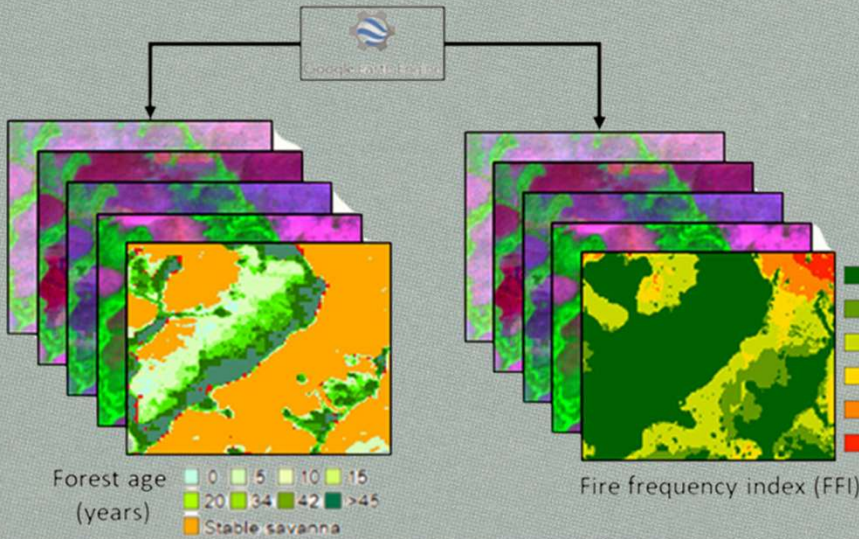
FOREST TYPOLOGY USING A SIMPLE CNN AND CORRECTED S2 DATA

- Forêt diversifiée de terre ferme
- Forêt monodominante
- Forêt marécageuse
- Forêt très dégradée

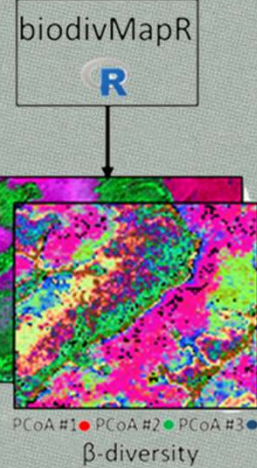


Time series and ecosystem dynamics

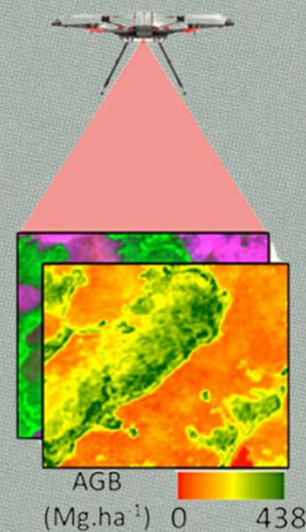
Landsat archives



Sentinel 2

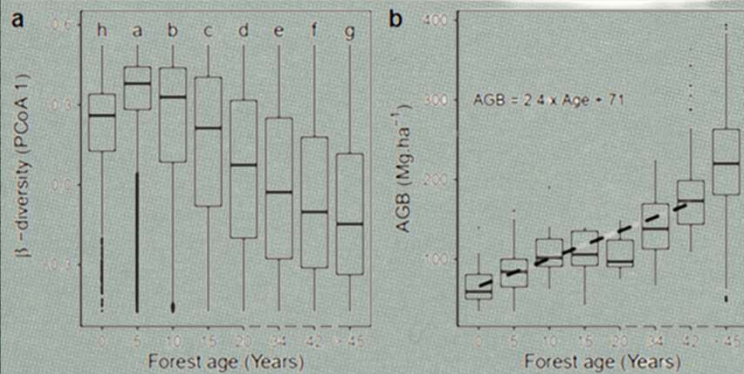


UAV-LiDAR

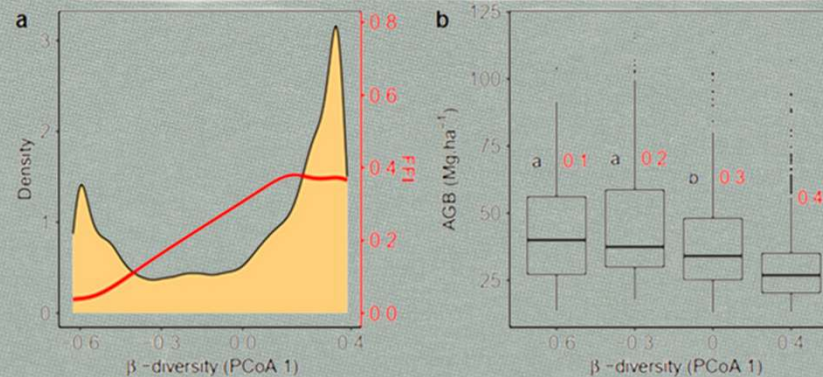


FOREST-SAVANNA
TRANSITIONS

Change in the composition and structure along forest transition



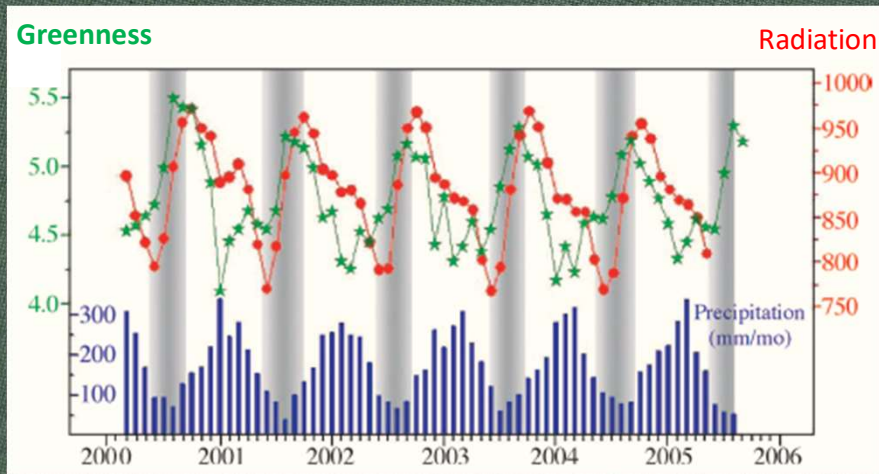
Fire effect on savanna composition and structure



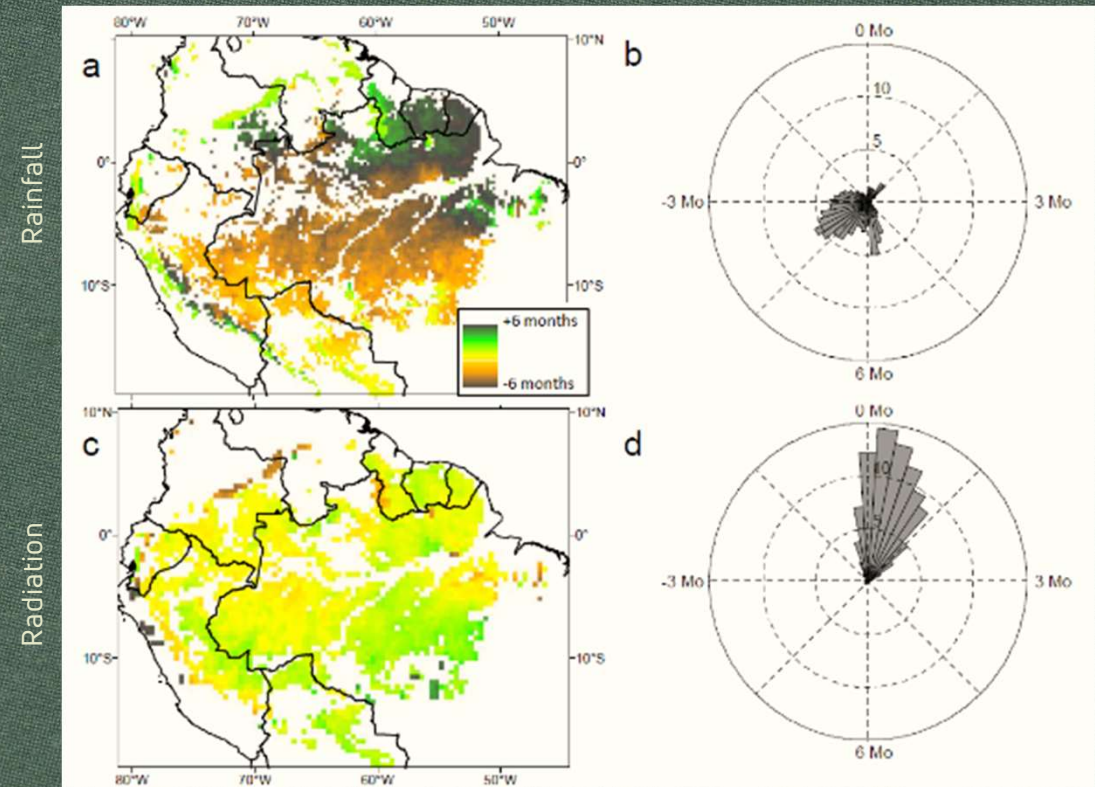
Time series and Phenology

EVERGREEN FORESTS GAIN PRODUCTIVITY IN THE DRY SEASON!

Viewed from space (MODIS), 'greenness' fluctuates
Controversial (poor atmospheric & BRDF correction)
Flux towers also indicate an increase of photosynthetic capacity
Leaf quality or leaf quantity?

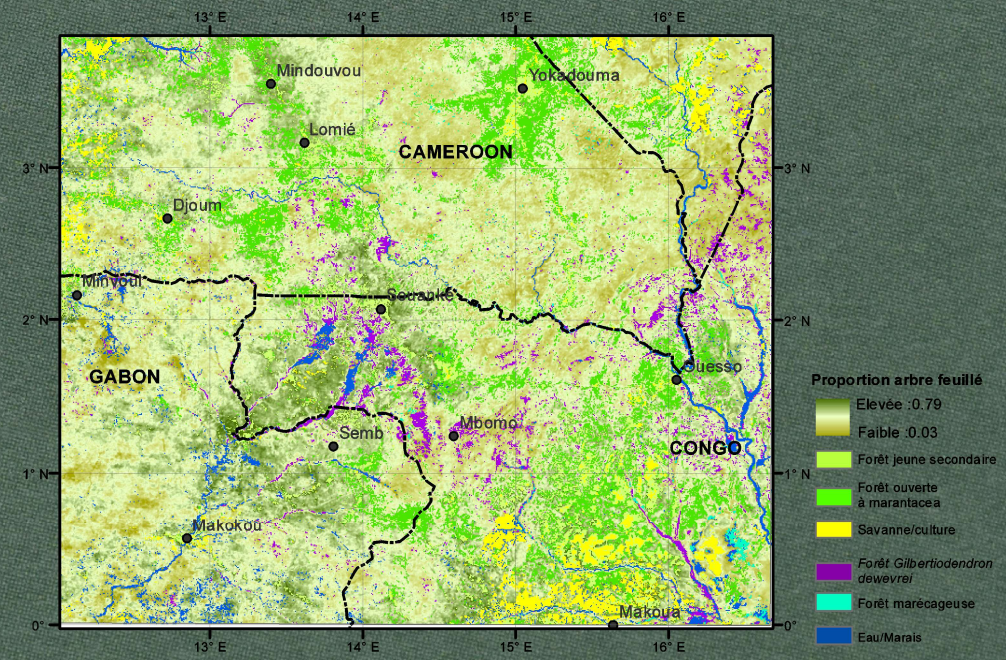
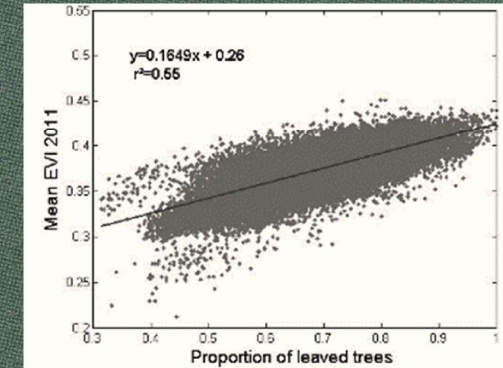
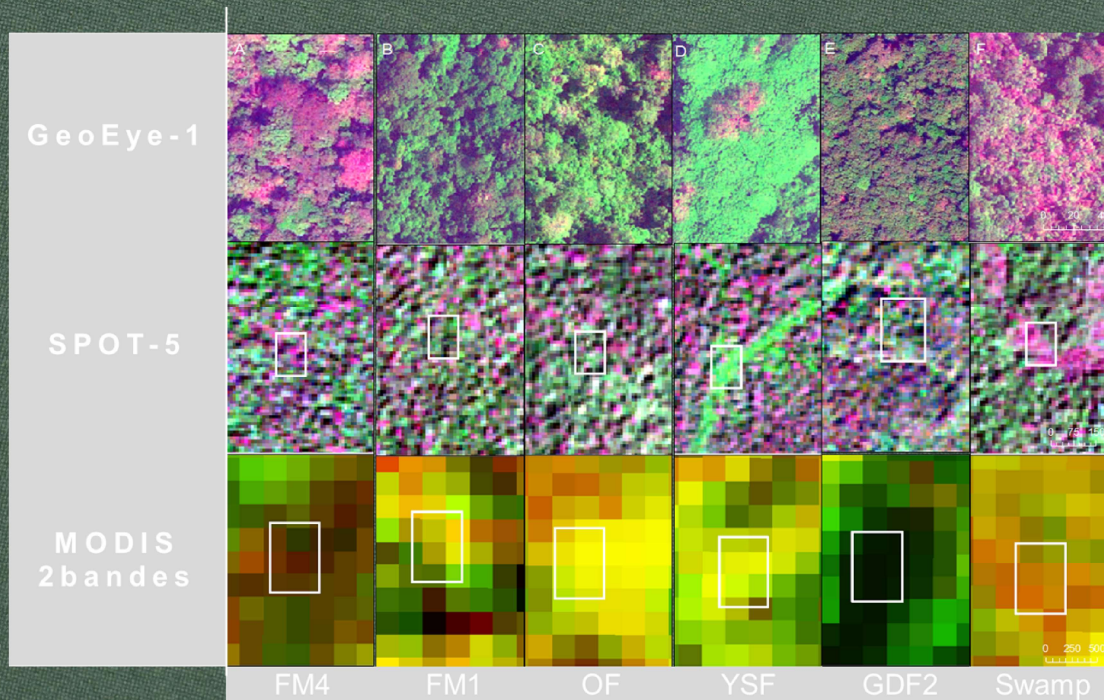


Timewise Fourier Cross-Spectral analysis

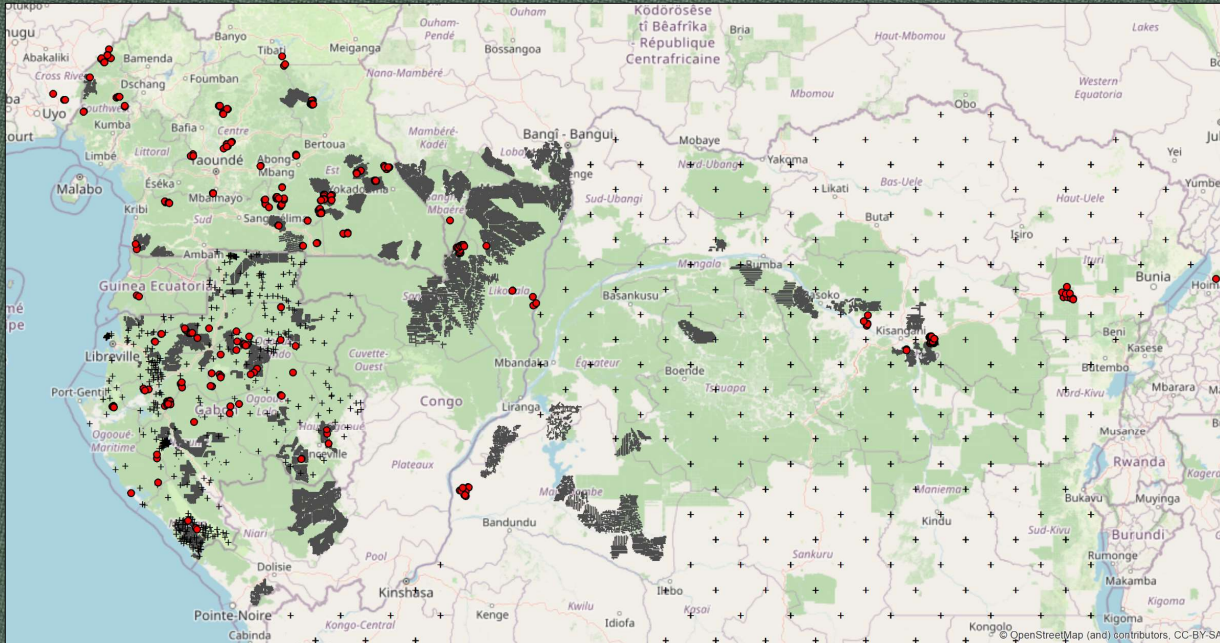


Time series and Phenology

HOW TO INTERPRET GREENNESS INCREASE?
A first attempt using multi-resolution optical data



Ground data and sampling strategies



PLOT NETWORKS

- Scientific plot networks
Afrifron (c. 260 plots)
IRD-ENS (c. 200 plots)
...
- + National forest inventories (DRC, Gabon...)
- ≡ Management forest inventories (COFOR)



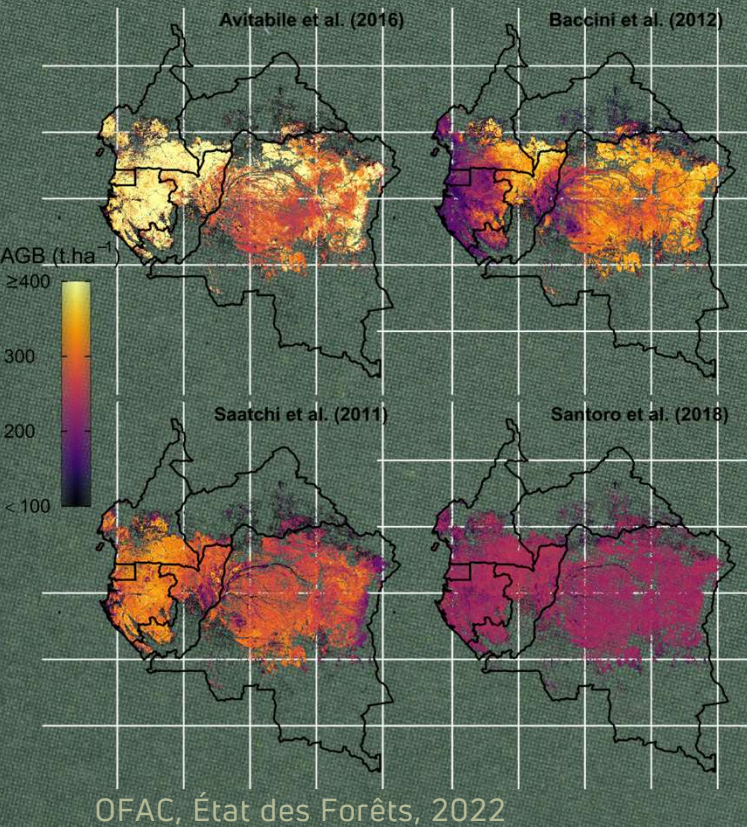
Scientific plots of higher quality | Urgent need for support & expansion

Other data types are useful too despite lower quality (taxonomic identification, geospatial accuracy)

Ground data and sampling strategies

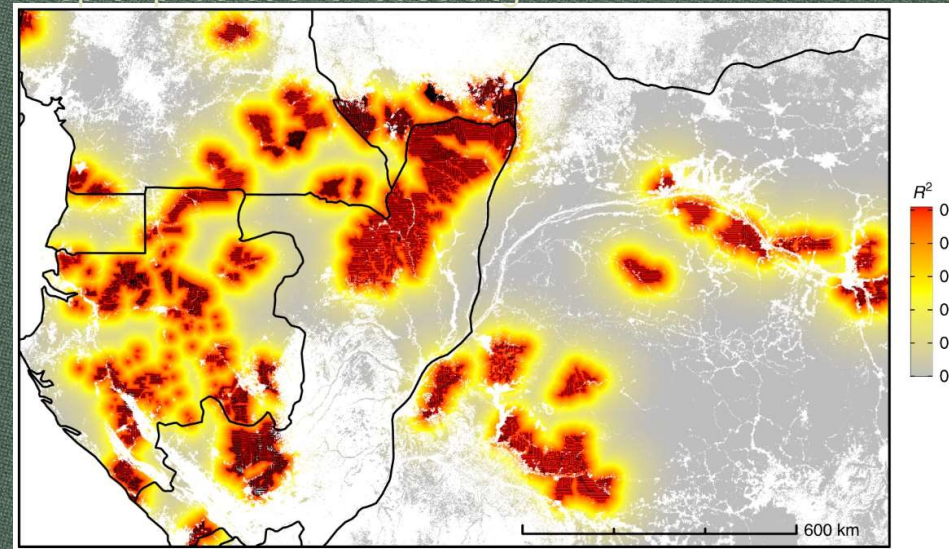


BOARD-SCALE BIOMASS MAPS



SIMILAR METHODOLOGY BASED ON COFOR DATA

Map of predictions reliability



KEY RESULTS

Remote-sensing predictors used to map biomass less informative than we thought
An inadequate tool is usually used to evaluate mapping models

Scientific plot network



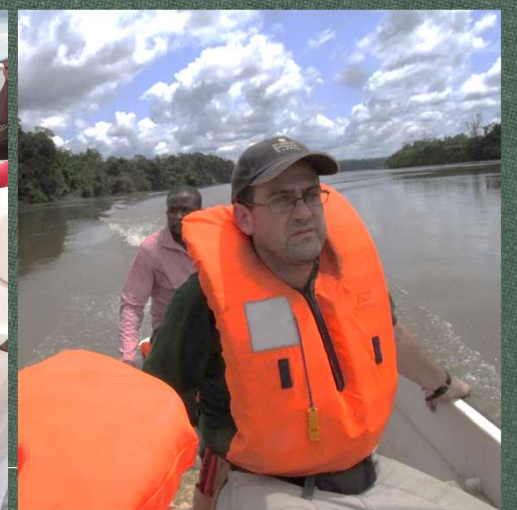
Institut de Recherche
pour le Développement
FRANCE
French National Research Institute for Sustainable Development



UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
Sapientia - Collativa - Cognitio
Cameroun



Missouri
Botanical
Garden



And a hundred more (incl. women)...

Allometries, architecture and function



DESTRUCTIVE APPROACH

>900 trees felled in 6 countries

IT'S A MESS!

AGB ALLOMETRIC EQUATION

No major difference from Pantropical equations
Adding crown descriptors can strongly reduce bias in large trees.

LEAF AREA ALLOMETRIC EQUATIONS

Very high estimates of LAI (up to 13!)



Allometries, architecture and function



NON-DESTRUCTIVE APPROACH



Allometries, architecture and function



SEMI-AUTOMATED PIPELINE

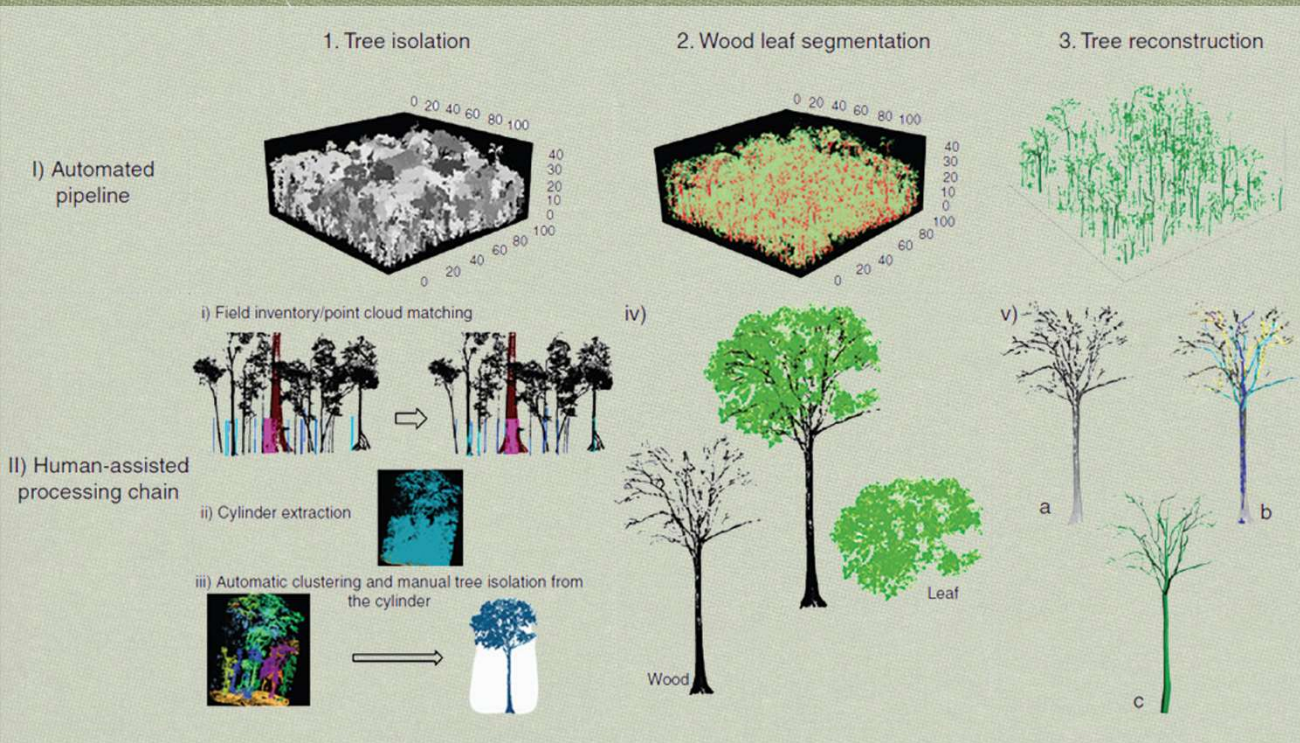


In complex tropical forests, fully automated pipelines may provide relatively unreliable metrics

Human assistance with automated pipelines can help reduce error QSM volume.

Tree scale: isolating trees using human assistance reduced the error by a factor 10.

1-ha plot scale: locating trees with human assistance reduced the error by a factor 3.

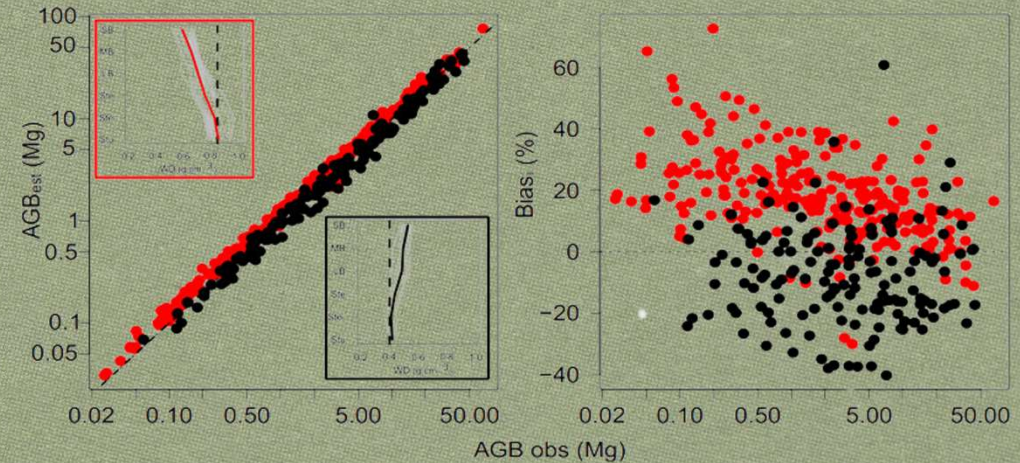


Allometries, architecture and function

MAIN RESULTS FOR THE TLS APPROACH

- Unbiased volume estimates (down to 5 cm branches)
- Unbiased AGB and allometric equ. if WD gradient corrected
- Applicable to operational projects (FAO – RDC in Miombo)
- Unbiased LAI estimates using AMAPVox (unpublished)
- Reconstructions better than other (automated) datasets, with major implications for modelling
- Wood density and tree structure converge in canopy trees!

Effect of vertical WD gradient on AGB estimation bias



STRONG INTEREST ACROSS AMAP LAB... NEED BACK UP!



Drones: an indispensable intermediate scale

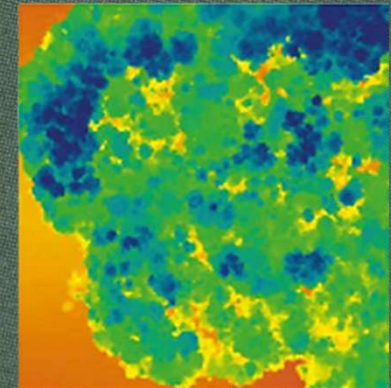
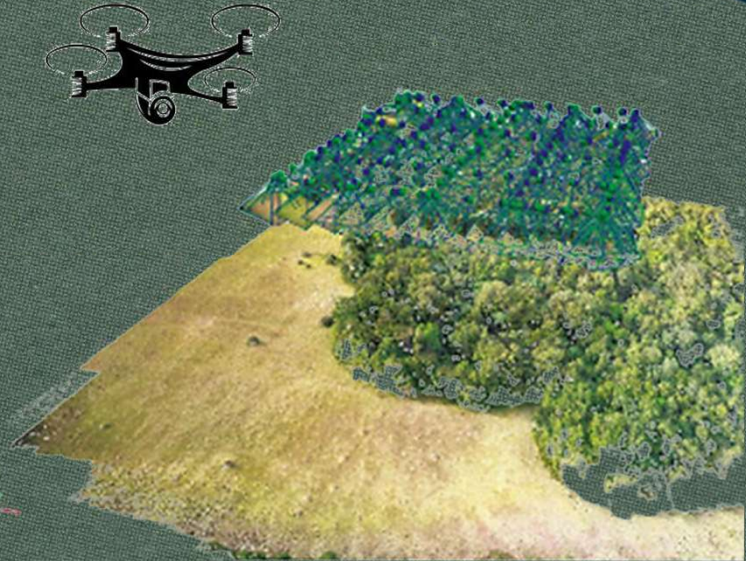
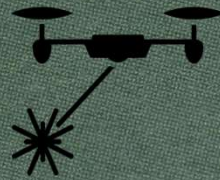
cnrs

DRONE PLATFORM

~ 15 Drones & Pilots

Active and Passive optical + thermal

Supervised by CNRS



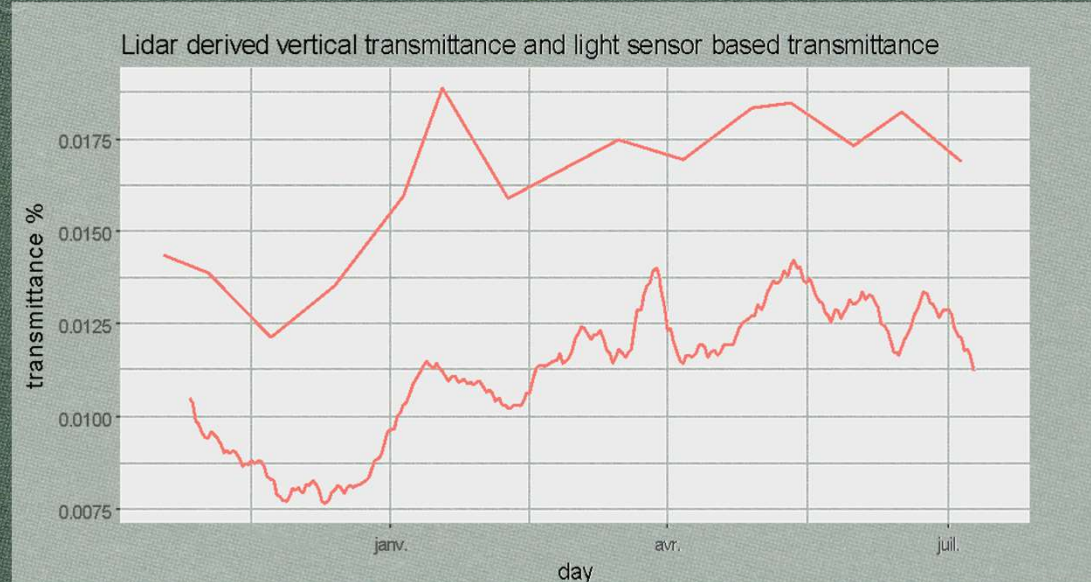
Improving LiDAR processing chains



AMAPVOX

Obtaining unbiased estimates of PAD,
PAD profile and light transfer

Accounting for attenuation, occlusion
and changes in sampling density

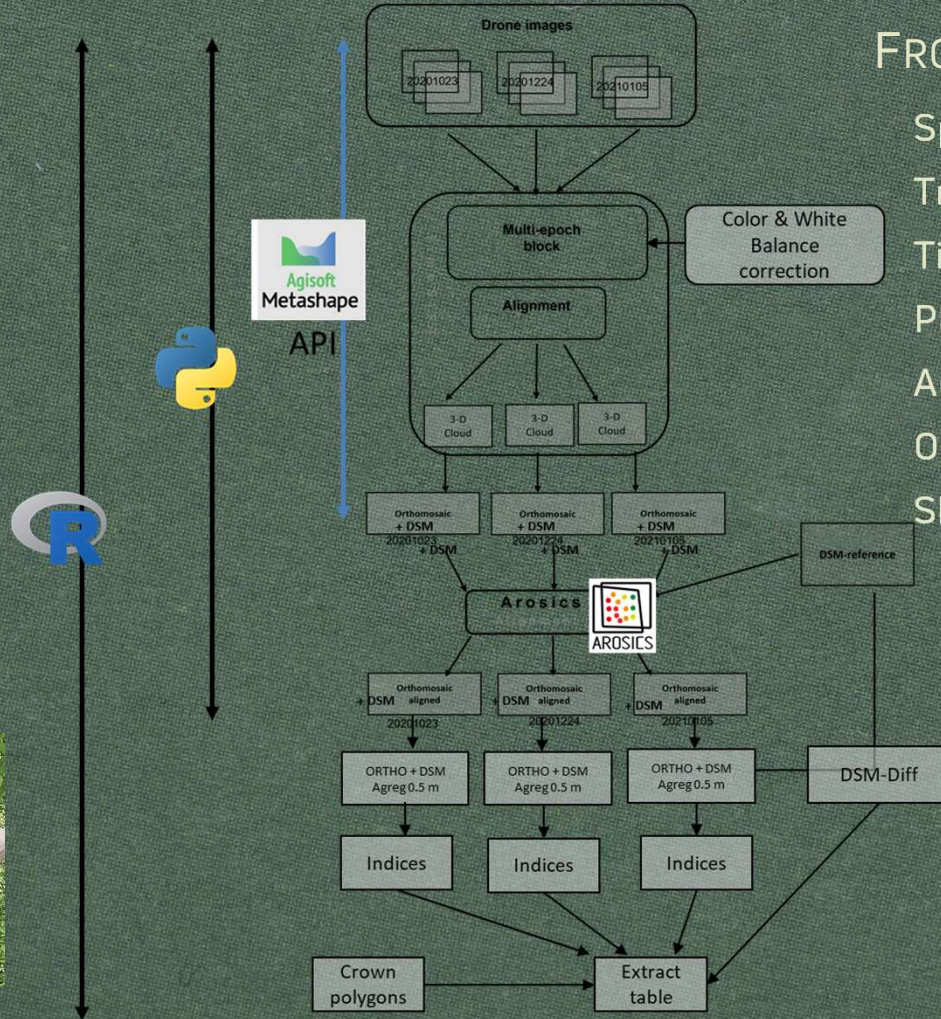


BUT

Empirical calibration between sensors still needed



Improving stereophoto processing chains



FROM SIMPLE PHOTOS TO USEFUL QUANTITATIVE DATA

Spatial and spectral consistency between stereo-mosaics

Tree-level data extraction

Time signal analysis

Phenophase detection (manual + AI)

Automated, optimized processing

Open source

Shiny app for easy appropriation

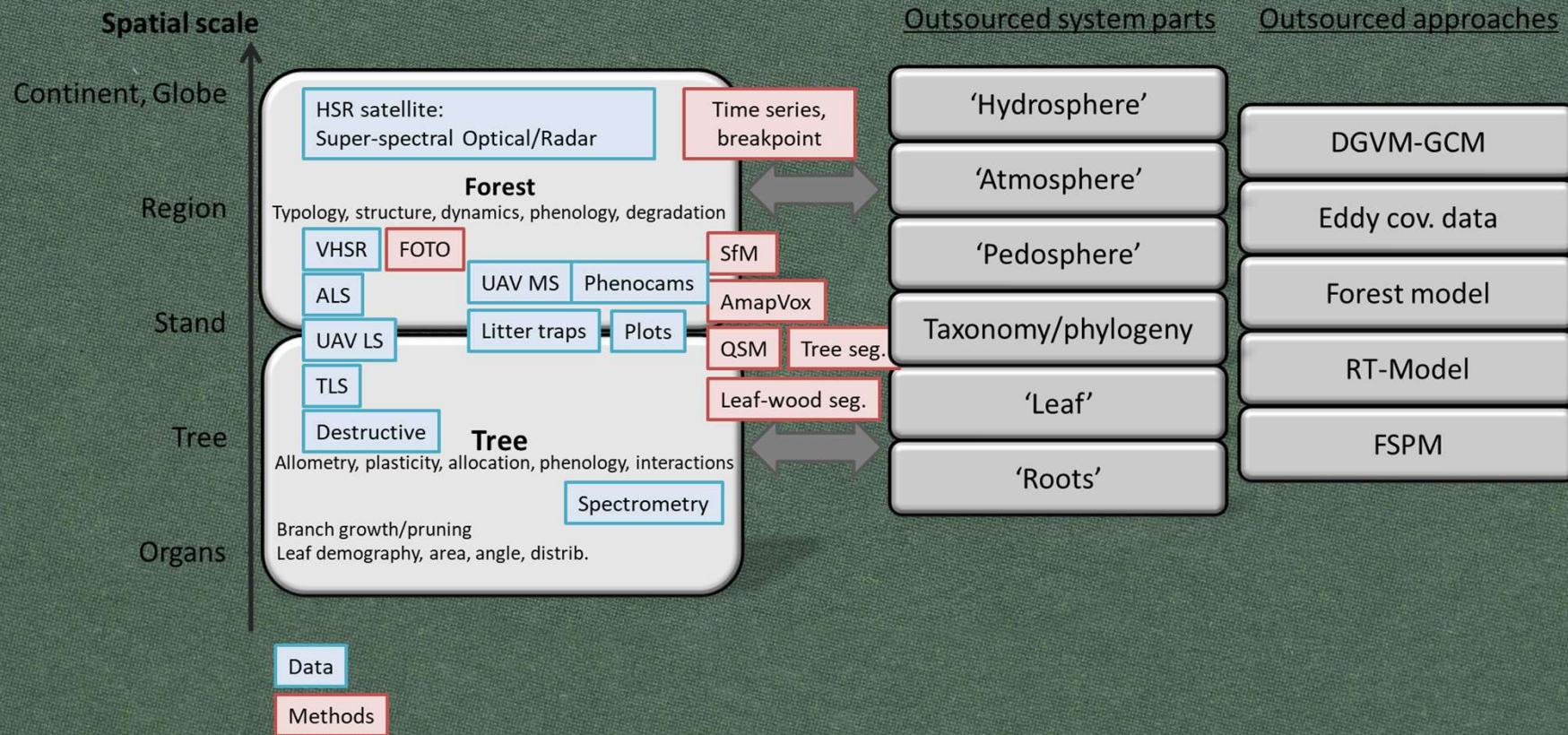
Link with biology

COLLECTING MEANINGFUL DATA FOR ARCHITECTS AND BOTANISTS



 PlantNet

Where am I ?



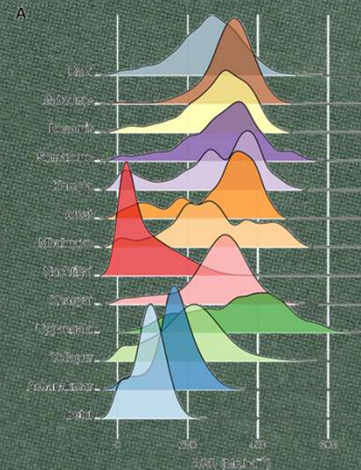
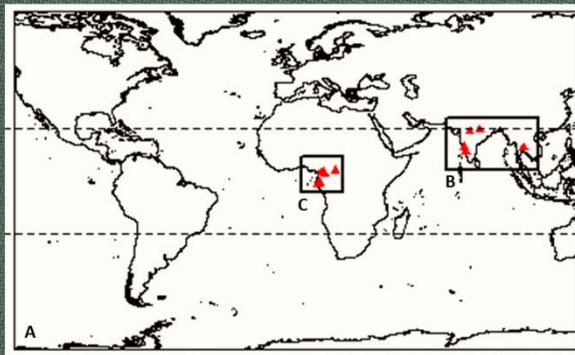
A recognized know-how

CEOS Cal/Val

Contribution to GeoTree supersites, ESA, NASA, CNES cal/Val missions

Publication of reference datasets

Participation to international intercomparison projects (ForestScan)

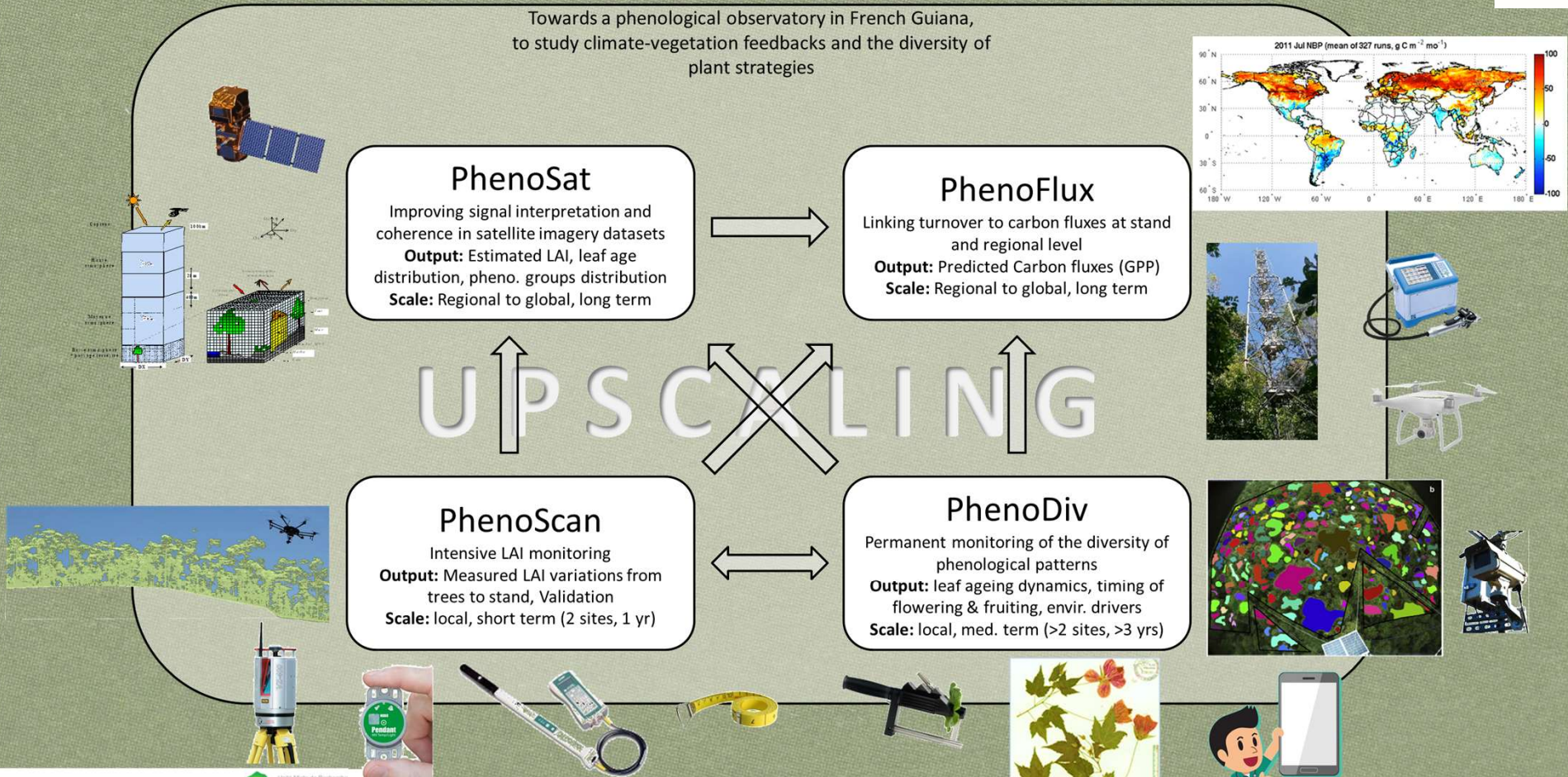


Research Project Towards more function... and impact



Phenobs

Towards a phenological observatory in French Guiana, to study climate-vegetation feedbacks and the diversity of plant strategies

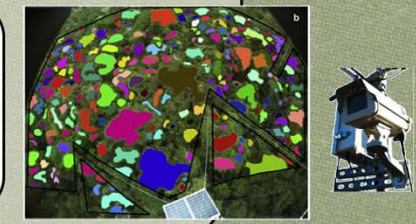
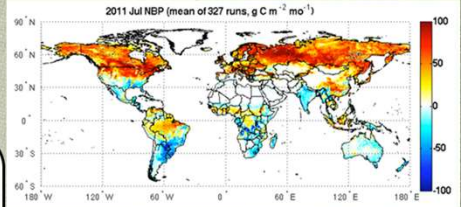


PhenoSat
 Improving signal interpretation and coherence in satellite imagery datasets
Output: Estimated LAI, leaf age distribution, pheno. groups distribution
Scale: Regional to global, long term

PhenoFlux
 Linking turnover to carbon fluxes at stand and regional level
Output: Predicted Carbon fluxes (GPP)
Scale: Regional to global, long term

PhenoScan
 Intensive LAI monitoring
Output: Measured LAI variations from trees to stand, Validation
Scale: local, short term (2 sites, 1 yr)

PhenoDiv
 Permanent monitoring of the diversity of phenological patterns
Output: leaf ageing dynamics, timing of flowering & fruiting, envir. drivers
Scale: local, med. term (>2 sites, >3 yrs)



Phenobs

MAIN SITE: PARACOU, FRENCH GUIANA



Permanent plots + crowns



repeat RGB-MS & Lidar



3 Phenocams



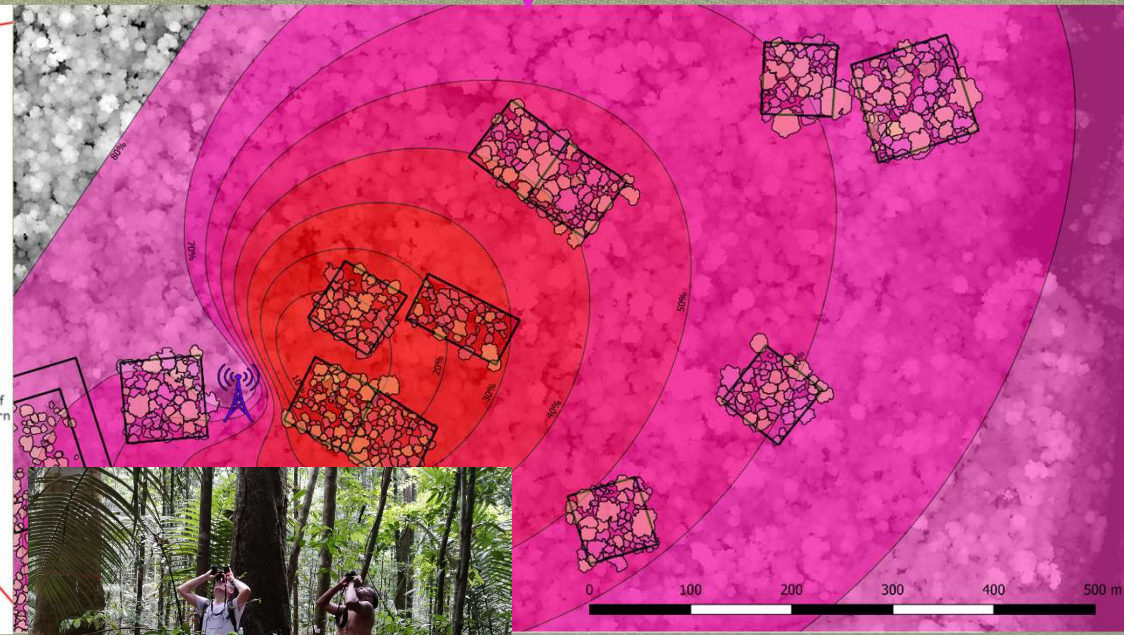
Litter traps



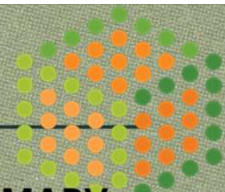
Light sensors



GuyaFlux tower footprint

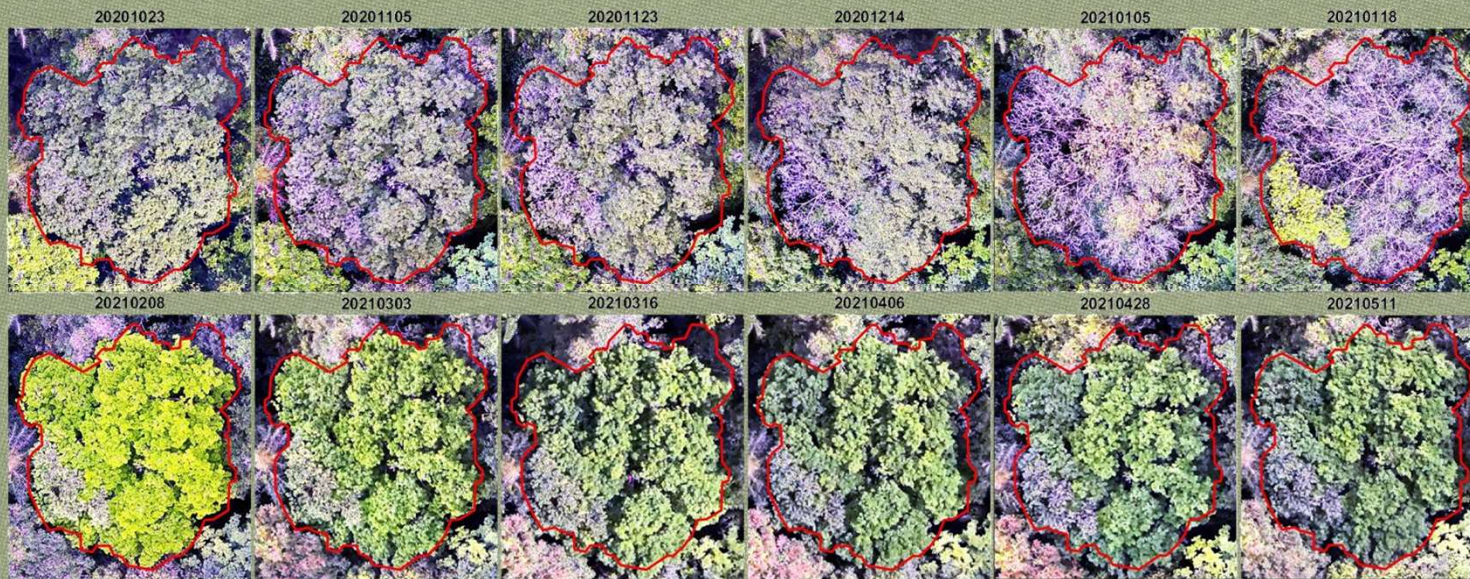


Phenobs



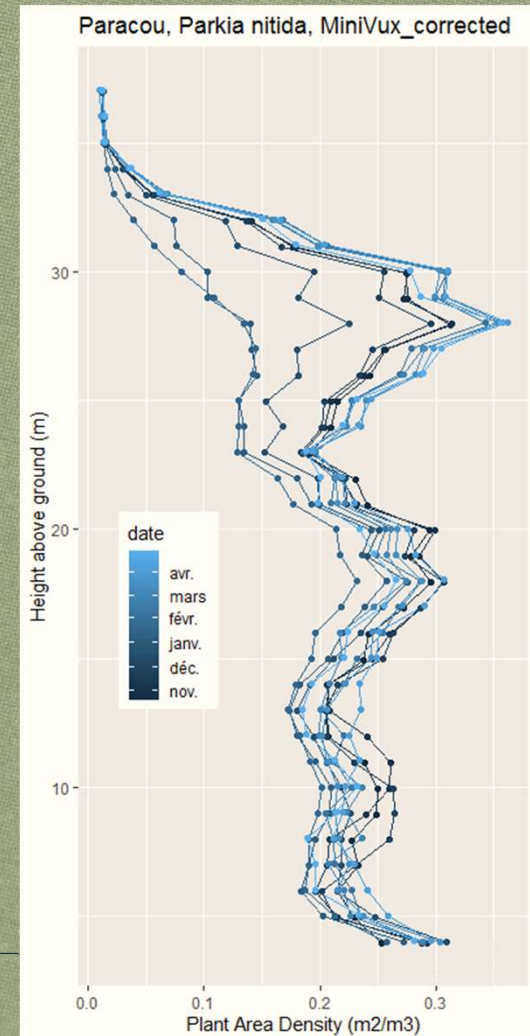
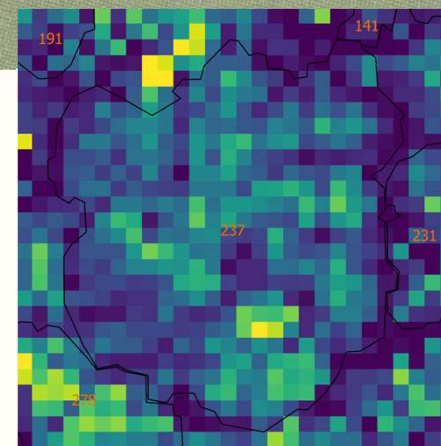
AMAPVox

SEASONAL VARIATION AT TREE LEVEL



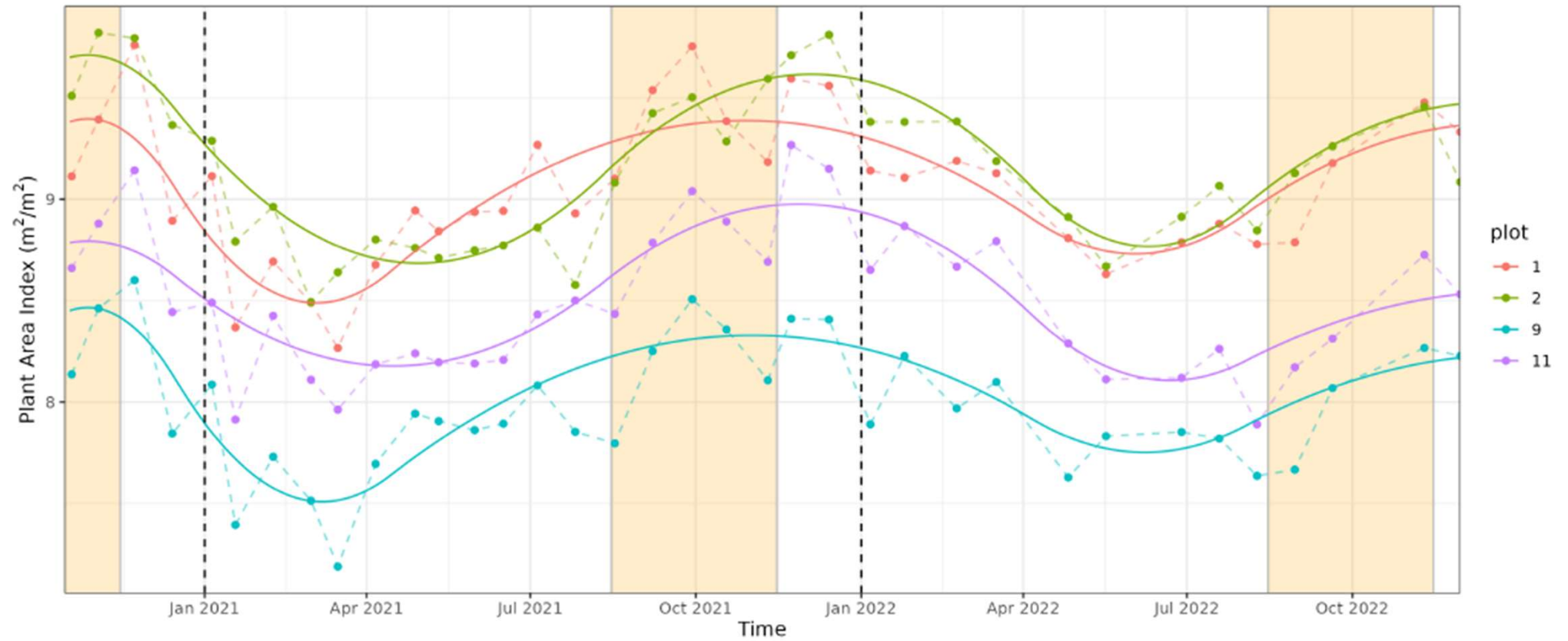
Parkia nitida (*Fabaceae*)

PAD in top 3m



Phenobs

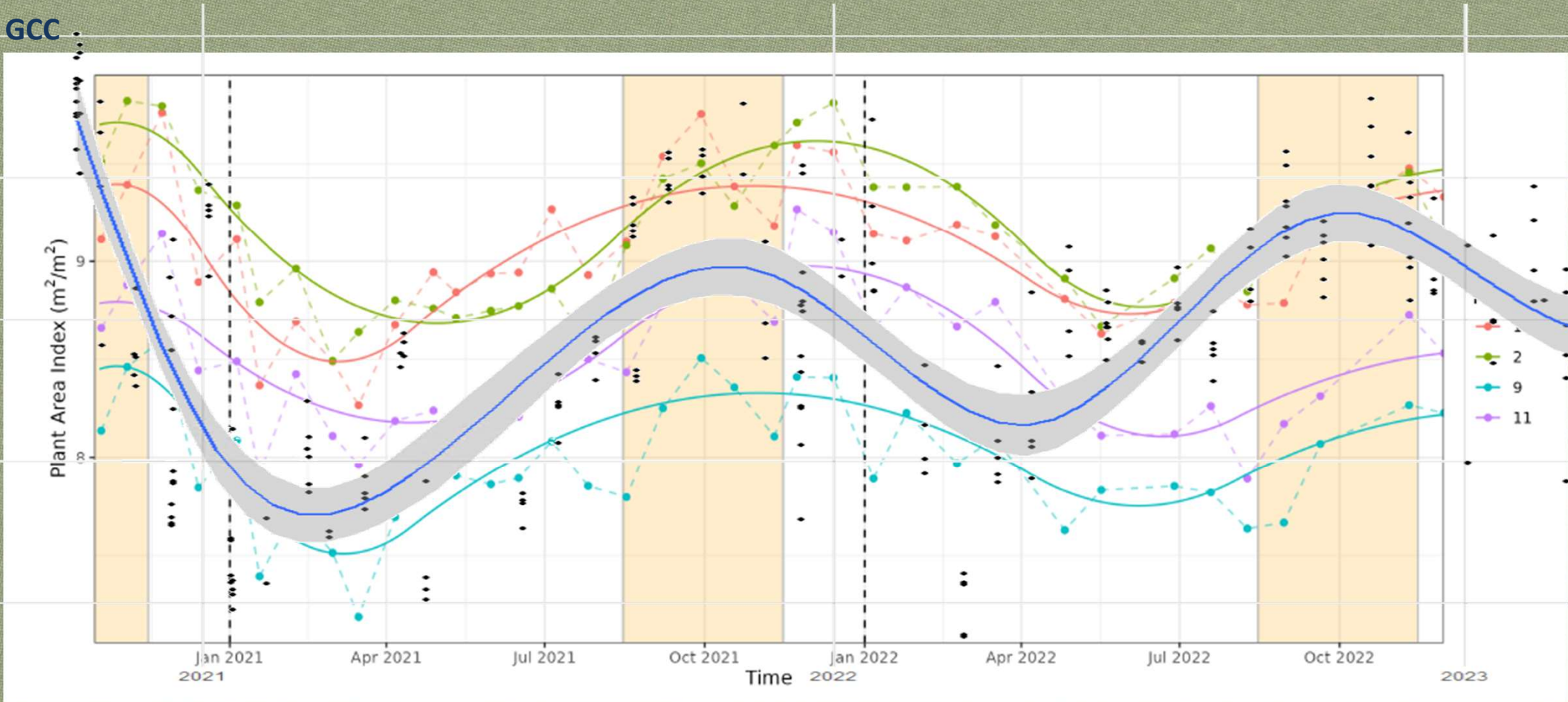
SEASONAL FLUCTUATION AT STAND LEVEL



Phenobs

SEASONAL FLUCTUATION AT STAND LEVEL

GCC



Phenobs

MEASURING LEAF TRAIT VARIATION WITH LEAF AGE

Decrypting morpho-anatomic markers to tag and sample leaf cohorts



Phenobs



Osmometer for TLP Leaf spectral properties

MEASURING LEAF TRAIT VARIATION WITH LEAF AGE

V_{cmax} and J_{max} follow the expected non-linear relationship with leaf age (Chen 2019). Weak/no species effect ($R^2 = 0.24$)

Age well predicted by Greenness ($R^2 = 0.5$), independent of species!

N correlated to age with strong species effect ($R^2 = 0.73$)

PTLP independent of age



LICOR 6800F



Element concentration and leaf structure

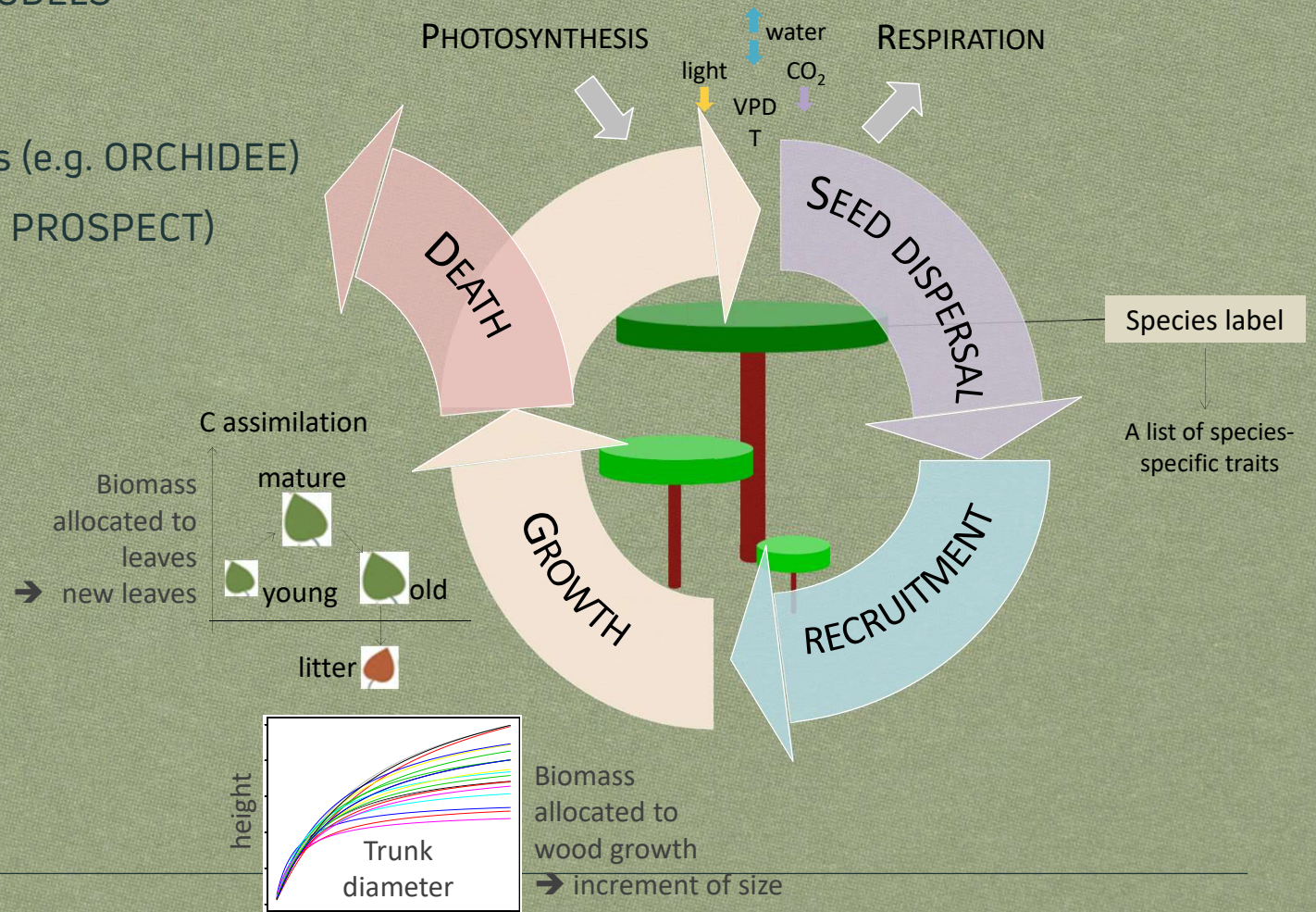
Phenobs

ASSIMILATION IN MECHANIST MODELS

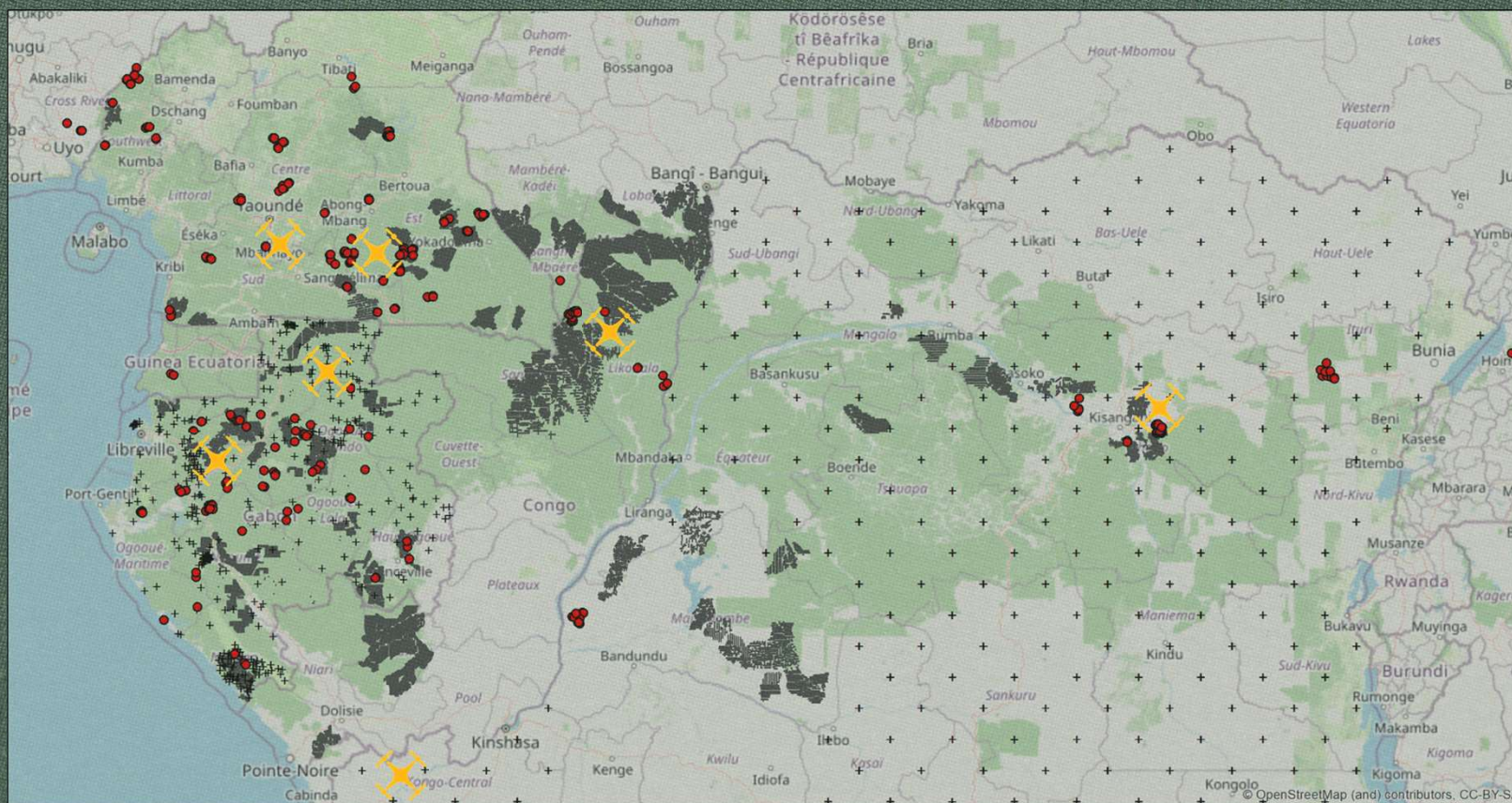
Forest Model / IBM (TROLL)

Global Climate-Vegetation models (e.g. ORCHIDEE)

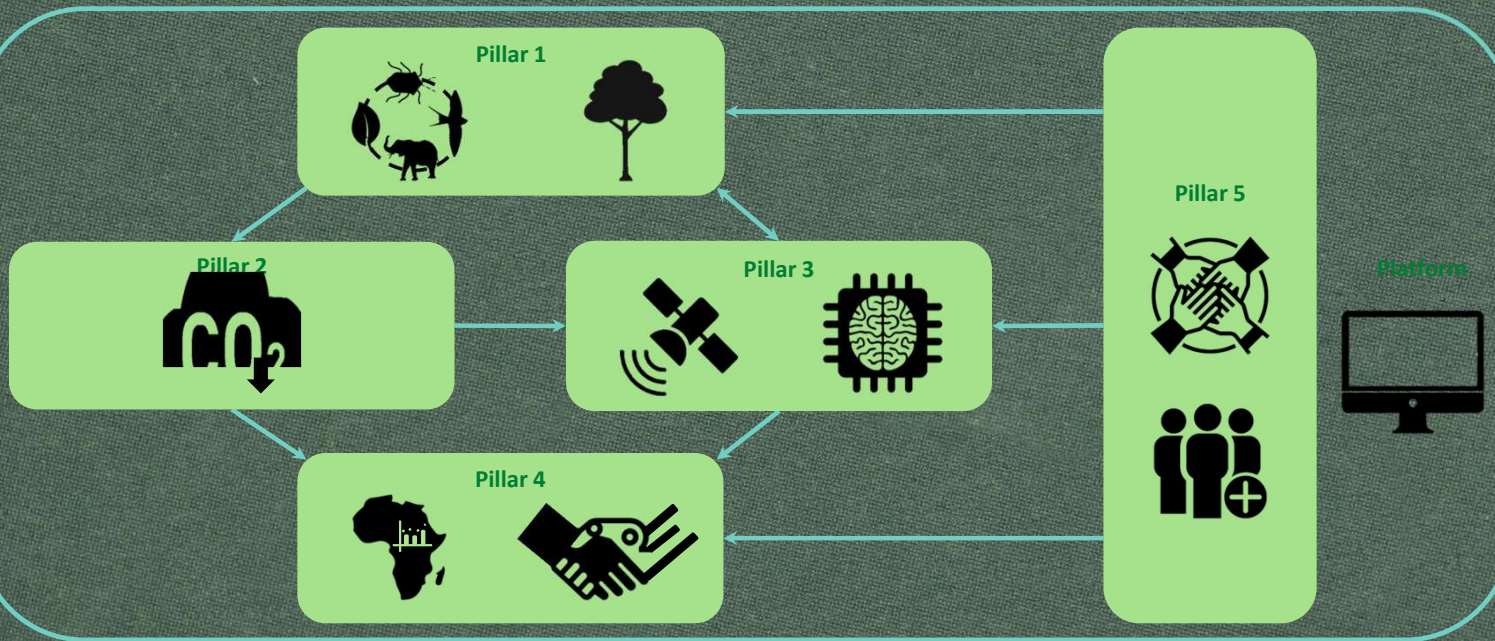
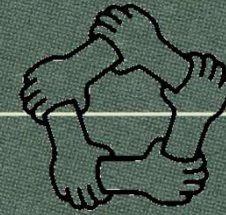
Radiative Transfer models (DART, PROSPECT)



CoForFUNC- TOWARD A BIOME-SCALE MONITORING OF THE CONGO BASIN FOREST FUNCTIONAL COMPOSITION



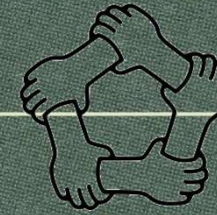
Implication in “high stakes” projects



UNIVERSITY OF MONTPELLIER | ED GAIA | 2024



Implication in "high stakes" projects



nature communications



Perspective

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-37232-2>

Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange

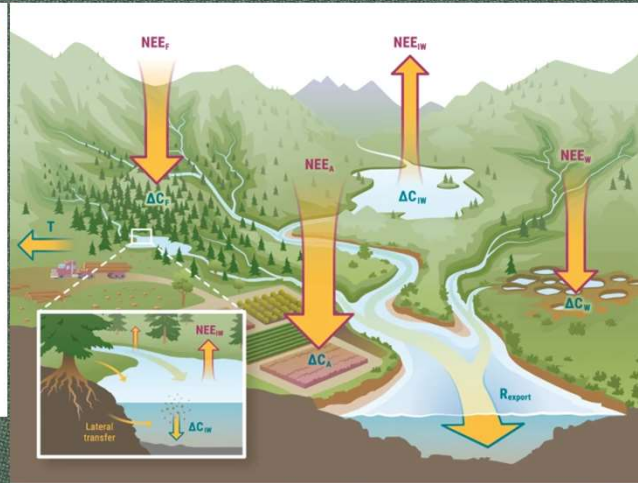
Received: 23 April 2022

Accepted: 1 March 2023

Published online: 21 March 2023

[Check for updates](#)

Joan P. Casas-Ruiz^{1,14}, Pascal Bodmer^{2,14}, Kelly Ann Bona³, David Butman⁴, Mathilde Couturier², Erik J. S. Emilson⁵, Kerri Finlay⁶, H el ene Genet⁷, Daniel Hayes⁸, Jan Karlsson⁹, David Par e¹⁰, Changhui Peng², Rob Striegl¹¹, Jackie Webb¹², Xinyuan Wei⁸, Susan E. Ziegler¹³ & Paul A. del Giorgio²



Need for a broad/comprehensive monitoring framework addressing vertical and lateral C fluxes

In most of the tropics (and Africa in particular), even basic hydrological and climate variables are not monitored...



Dynamics of continental ecosystems in Central Africa



Congo Basin Science Initiative

UNIVERSITY OF MONTPELLIER | ED GAIA | 2024

Setting the agenda in research

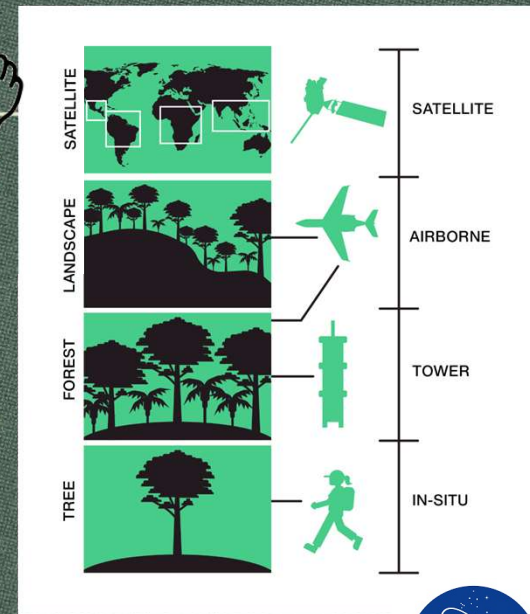
Comment



A warden with an orphaned mountain gorilla in the Virungu National Park sanctuary in the Democratic Republic of the Congo.

Congo Basin rainforest – invest US\$150 million in science

Lee J. T. White, Eve Bazaiba Masudi, Jules Doret Ndongo, Rosalie Matondo, Arlette Soudan-Nonsult, Alfred Ngomanda, Ifo Suspense Averti, Cornelle E. N. Ewango, Bonaventure Sonk e & Simon L. Lewis



PANGAEA

PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation

Thank you !

Local communities

Field assistants

Drone pilots in supersites

Taxonomists and Parataxonomists

Lab and institute support services

Partners





Thank you!

Synthesis on upscaling

AIM: exploit textural, spectral and temporal remote sensing signal to characterize Forests (state, dynamics and function)



IS THERE AN IDEAL OPTICAL SATELLITE SENSOR ?

Issues	Short term solution	Mid term solutions
Cloud and haze seasonal pattern	Use dry season mosaics	A composite icon representing mid-term solutions, featuring a drone at the top, a gear in the middle, and a circuit board at the bottom, all in black.
Resolution trade-off	Sentinel 2 a reasonable trade-off (at the expense of texture)	
Changing angular configuration	BRDF calibrated per land cover type	
Limited info on 3D structure	Focus on function, composition and forest types	

⇒ A great deal can be done at a relevant (landscape to region) scale with existing methods

Synthesis on upscaling



LiDAR



RT modelling



Manual processing



Architecture



AI



Close range photogrammetry













SOLVING PLOT LEVEL CAL/VAL SHORTAGE

Issues	Current solution	Mid term solution
Representativity of plot data	Continue network extension	
Spatial structure in the data	Use spatial buffers	
Commercial inventories abundant but poorly georeferenced	Aggregate over >1km grid	
Plot georeferencing	DGPS only in open. Multiply points or use tacheometer.	
Local changes in tree allometry		
Limited info on forest 3D structure in plots	Include crown dimensions in field inventory	
Generate artificial data for cal/val and sensitivity		
No info on leaf area		
No info on vertical fluxes		EC Flux towers
No info on lateral fluxes	None	Micro catchments

Synthesis on upscaling



SOLVING TREE LEVEL CAL/VAL SHORTAGE

Issues	Current solution	Mid term solution
Linking crown to trunk	Field SIG	Detectree + Sam 
Leaf physio and spectral response change with age	Age-specific sampling for each species 	Linking spectra to function, PROSPECT 
Upscaling from leaves to crown	Leaf cohort structuration  	DART 
Identify phenophases	 	 
Identify species	Hyperspectral airborne data 