

Proposition d'un sujet de thèse - Année 2017

TR SYNERGIE

Titre : Apport de la modélisation physique pour la cartographie de la biodiversité tropicale par imagerie satellite Sentinel-2

Title : Contribution of physical modeling for biodiversity mapping of tropical forest using Sentinel-2 satellite imagery

Mots-clés : Biodiversité tropicale, *communautés d'espèces*, DART, *pôle Theia*, Sentinel-2, *télédétection*, *transfert radiatif*

Champs disciplinaires : Information spatiale appliquée à l'écologie.

Thème de Recherche : SYNERGIE

Financement :

- Une demi-bourse de thèse Irstea est demandée en octobre 2016 ;
- Une demi-bourse de thèse CNES est demandée en octobre 2016 ;

Date de démarrage : septembre 2017.

Durée de financement : 3 ans.

Budget prévisionnel recherché : 125 000 € pour trois ans.

Direction de thèse :

Directrice de thèse : Christiane Weber (UMR TETIS Montpellier).

Encadrant principal : Jean-Baptiste Féret (UMR TETIS Montpellier).

Ecole doctorale : GAIA à l'Université Montpellier II

Résumé

Ce projet de thèse vise à évaluer le **potentiel des données acquises par les satellites Sentinel-2 pour la cartographie de la biodiversité en milieux de forêts tropicales**, notamment la **distribution spatiale des communautés d'espèces**. Le travail réalisé lors de cette thèse s'appuiera sur un certain nombre d'outils et données disponibles : des données Sentinel-2 mises à disposition dans le cadre du **pôle Théia**¹ et de la plateforme **SEAS Guyane**², une adaptation au cas multispectral d'une méthodologie permettant la cartographie de la biodiversité tropicale à partir de données d'imagerie hyperspectrale, une plateforme de simulation permettant de générer des données de télédétection à l'aide du modèle de transfert radiatif DART, et un jeu de données expérimentales issu d'une **campagne couplée aéroportée/terrain** réalisée en 2016 sur des sites expérimentaux documentés de **Guyane Française**. Cette campagne de terrain comprend des données hyperspectrales et LiDAR aéroportées, des acquisitions au LiDAR terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS) ainsi qu'une base de données de propriétés optiques de végétation et d'éléments forestiers.

Au cours de cette thèse, un passage à l'échelle sera effectué depuis les données terrain vers les données aéroportées puis vers les données satellite en s'appuyant sur des **données expérimentales** et des **données simulées** issues de la modélisation du transfert radiatif en 3 dimensions. Cette mise à l'échelle permettra notamment de 1) continuer la validation la chaîne de traitement pour la cartographie de la biodiversité à partir des données hyperspectrales en utilisant différents indicateurs de biodiversité, 2) participer à la finalisation d'une plateforme de simulation de données multispectrales et hyperspectrales basée sur le modèle de transfert radiatif DART, et 3) contribuer à la définition des variables essentielles de biodiversité mesurables par télédétection (**satellite remote**

¹ <https://www.theia-land.fr/>

² <http://www.guyane.ird.fr/plateformes-poles/plateformes/seas-guyane>

sensing essential biodiversity variables, SRS-EBV) dirigée par le Group on Earth Observations – Biodiversity Observation Network (**GEO BON**).

Summary

The main objective of this PhD project is to evaluate the **potential of the image data acquired by Sentinel-2 satellites for biodiversity mapping in tropical forest environments**, including the **spatial distribution of species communities**. This project will build up from a selection of tools and data available: Sentinel-2 data provided in the **Theia land data center** and the **SEAS Guyane platform**, an adaptation to the multispectral case of a methodology for tropical biodiversity mapping based on imaging spectroscopy, a simulation platform for the simulation of remote sensing imagery using the DART model, and a set of experimental data from a **coupled airborne/field campaign** performed in 2016 on a network of fully documented experimental sites of French Guiana. This dataset includes airborne LiDAR and hyperspectral data, as well as acquisitions of Terrestrial Laser Scanning and optical properties of vegetation data and forest elements.

Up-scaling from field observations to airborne data and then to satellite data will be performed. The global strategy will combine **experimental data** and **simulated data** from the radiative transfer modeling in 3D. This scaling will allow to 1) continue the validation of the processing chain for biodiversity mapping from imaging spectroscopy, using various biodiversity indicators, 2) participate in the finalization of a data simulation platform for multispectral and hyperspectral images based on radiative transfer model DART, and 3) contribute to the definition of **satellite remote sensing essential variables biodiversity (SRS-EBV)** led by the Group on Earth Observations - biodiversity Observation Network (**GEO BON**).

Contexte

L'érosion de la biodiversité et un défi actuel majeur au même titre que les changements climatiques, et les impacts tant sur le plan économique que géopolitique sont comparables (Tittensor et al., 2014). De nombreux facteurs sont en cause, pour la plupart en lien direct ou indirect avec l'activité humaine : changement d'occupation du sol, augmentation de la pollution, utilisation des ressources naturelles, changements climatiques et développement de pathogènes et d'espèces invasives (Ceballos et al., 2015; Morris, 2010). Ces facteurs montrent des interactions complexes entre l'érosion de la biodiversité, les changements climatiques et la dégradation des habitats (Chapin III et al., 2000).

En réponse à ces problématiques à l'échelle globale, la Convention sur la Diversité Biologique a été adoptée avec pour objectifs de développer un plan stratégique de conservation, de restauration et d'utilisation durable de la diversité biologique, basée sur un certain nombre d'indicateurs. L'implémentation de ce plan sous la responsabilité du Groupe en observation de la Terre – Observatoire de la biodiversité planétaire (**GEO BON**) doit assurer le développement d'un système de suivi performant, combinant des outils de modélisation se basant sur un certain nombre d'indicateurs de l'état, et de la dynamique des processus écologiques qui soient techniquement et financièrement mesurables à large échelle (Secades et al., 2014).

La télédétection est un outil crucial pour l'analyse régulière des milieux naturels à une échelle régionale ou globale. Les données fournies par les satellites apparaissent donc particulièrement appropriées pour aider à définir un certain nombre de **variables essentielles de la biodiversité (EBV)** (Jetz et al., 2016; Pereira et al., 2013; Skidmore et al., 2015). Le cadre de travail des EBVs se base sur la synergie entre les données *in situ*, la cartographie à fine échelle pour le suivi écosystèmes à partir de moyens de télédétection appropriés, puis la mise à l'échelle régionale et globale en combinant de données d'observation globale et des outils de modélisation. Ces EBVs sont définies comme les mesures nécessaires pour étudier, rendre compte et intégrer les changements de biodiversité dans les plans de gestions de l'échelle locale à l'échelle globale. Dans le but d'utiliser au mieux le potentiel

des données issues de télédétection, un travail est aussi actuellement en cours afin de définir les EBVs pertinentes que la télédétection satellite pourrait contribuer à mesurer. Ce sont les Satellite Remote Sensing –EBVs (SRS-EBVs) (Pettorelli et al., 2016b).

Les forêts tropicales représentent un réservoir de biodiversité et subissent une pression (anthropique, climatique) importante (Myers et al., 2000). De plus leur suivi est particulièrement compliqué en raison de la difficulté d'accès sur le terrain, et de la couverture nuageuse présente sous ces latitudes qui rend les observations par imagerie satellite optique difficiles. Il est donc nécessaire de mettre au point des méthodes efficaces permettant de quantifier cette biodiversité et son évolution, notamment au niveau des motifs de distribution spatiale des communautés d'espèces et leurs interactions avec des variables environnementales.

La télédétection est un outil particulièrement intéressant pour l'étude de la biodiversité, notamment par la mesure de propriétés biophysiques de la végétation. Il est donc important d'identifier le type de données qui pourraient permettre de définir des SRS-EBV à une échelle régionale ou globale, ainsi que les méthodologies associées. Les données de télédétection issues d'**imagerie hyperspectrale** aéroportée ont montré un fort potentiel pour l'étude des écosystèmes complexes, notamment les forêts tropicales. Des publications récentes ont ainsi démontré la possibilité de i) cartographier la biodiversité tropicale, notamment la richesse taxonomique locale et la distribution spatiale des communautés d'espèces (Féret and Asner, 2014; Vaglio Laurin et al., 2014) (Figure 1); estimer des propriétés de chimie foliaire (Asner et al., 2015a, 2015b; Chadwick and Asner, 2016); identifier certaines espèces d'arbres d'intérêt écologique particulier (Baldeck et al., 2015). L'imagerie hyperspectrale aéroportée est une source de données de grande qualité, mais sa disponibilité à une échelle régionale est actuellement inenvisageable pour des raisons logistiques et financières. Il s'agit cependant d'une source de données extrêmement précieuse permettant de fournir une information spatialement explicite à l'échelle de sites qui peut ensuite être exploitée en vue d'une mise à l'échelle à partir de données issues de capteurs moins résolus spatialement et spectralement (Vaglio Laurin et al., 2016). En 2016, le **Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)** a ainsi financé une campagne hyperspectrale aéroportée sur des sites expérimentaux documentés de Guyane Française afin d'aider au dimensionnement de futurs capteurs hyperspectraux satellites, et d'étudier le potentiel des capteurs satellites actuellement opérationnels.

Dans le cadre du programme d'observation de la Terre **Copernicus** sous la gouvernance de l'Union Européenne en partenariat avec l'agence spatiale européenne (ESA), les acquisitions par les **capteurs multispectraux Sentinel-2** ont débuté en 2015 et devraient être maintenues pour les prochaines décennies. Les satellites Sentinel-2 représentent actuellement **l'une des plus fortes opportunités pour la cartographie de la biodiversité tropicale**, en raison des caractéristiques instrumentales et de la fréquence de revisite, élément clé pour les acquisitions en milieux tropicaux particulièrement nébuleux.

Les données Sentinel-2 sont notamment mises à disposition par le **pôle thématique surfaces continentales Theia**. Theia propose aussi un certain nombre de produits issus de ces données de télédétection dans le cadre de son infrastructure de données. Ces produits de télédétection sont obtenus à l'aide de méthodes issues de travaux de recherche, dont le portage opérationnel est réalisé en collaboration avec les **centres d'expertise scientifique (CES)**. Dans la même dynamique, la plateforme **SEAS Guyane** se dote des moyens nécessaires à la mise en place d'un observatoire de la zone Antilles-Guyane, et plus largement de la zone Amazonie, avec notamment une antenne de réception, un centre d'archivage et de stockage, et des moyens de prétraitement et de traitement des données de télédétection, notamment les données Sentinel-2, Spot 6-7 et Pléiades. L'un des objectifs des projets menés dans le cadre de **SEAS Guyane** est d'identifier et aider au transfert des chaînes de traitement à fort potentiel pour la région Amazonie à échéance 2021. La mise au point d'un produit « biodiversité tropicale » dans ce contexte serait particulièrement intéressante et constitue un objectif applicatif fort à préparer à l'issue du projet dans le cadre d'un **CES Theia** en lien

avec la cartographie de différentes composantes de la biodiversité des forêts tropicales et porté par Irstea.

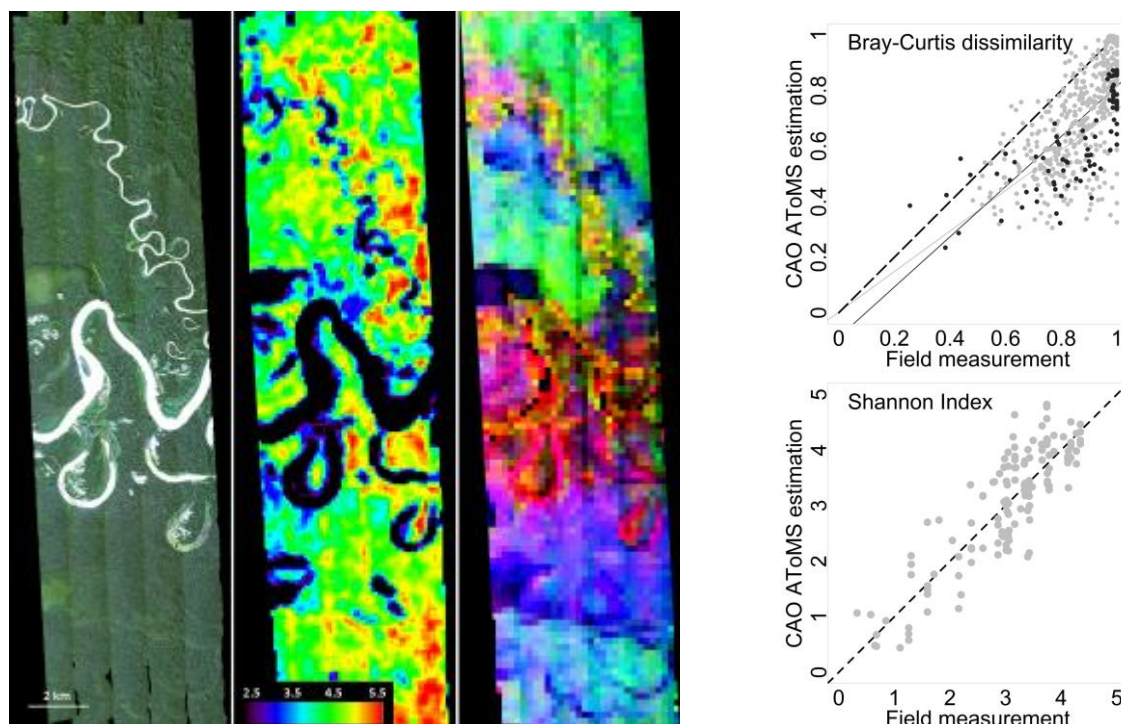


Figure 1. Cartographie de la biodiversité issue d'une image hyperspectrale acquise sur la forêt tropicale d'Amazonie Péruvienne (Féret and Asner, 2014). De gauche à droite sur les cartes: représentation RGB ; indice de Shannon représentant la diversité taxonomique locale (diversité- α); dissimilarité de Bray-Curtis représentant la distribution spatiale des communautés d'espèces (diversité- β) ; à droite : validation expérimentale des valeurs estimées par télédétection.

Objectif

L'objectif principal du projet de thèse est de **proposer une méthodologie pour la cartographie de la biodiversité des forêts tropicales à partir de données d'imagerie Sentinel-2**, avec pour ambition de contribuer à la définition des SRS-EBVs dans le cadre des discussions du réseau international GEO BON. Ce projet de thèse résulte de la convergence d'un certain nombre de résultats de recherche ainsi que de données acquises lors de campagnes effectuées notamment en Guyane en 2015 et 2016 lors de projets collaboratifs (CNES / TETIS / AMAP / CESBIO / ESE). L'objectif principal s'accompagne donc d'un certain nombre d'objectifs intermédiaires thématiques et techniques, qui incluent : i) la validation du modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2015) à l'aide des données expérimentales, ii) la mise au point et la validation de cartographies à échelle fine de la diversité taxonomique et de la distribution des communautés d'espèces de la forêt Guyanaise, à l'échelle de sites expérimentaux dans un premier temps, puis à échelle régionale.

Ce projet de thèse s'appuiera donc sur la fédération des communautés scientifiques issues du traitement de données de télédétection, de la modélisation physique de la végétation, et des écologues, au niveau Montpelliérain (TETIS, AMAP, Espaces-Dev, CEFE), et au niveau régional (CESBIO, EDB), avec en perspective l'enrichissement du **pôle national Theia**, de la station de Surveillance de l'environnement amazonien Assistée par Satellite (**SEAS Guyane**), et une contribution à la valorisation des données issues du programme européen Copernicus.

Pour atteindre ces objectifs, le doctorant et l'équipe encadrante s'appuieront sur :

- Une plateforme de simulation de données de télédétection (optique passive, LiDAR) construite autour du modèle de transfert radiatif 3D DART développé par le CESBIO. Cette plateforme a été développée dans le cadre des projets StemLeaf (LiDAR), et plus récemment HyperTropik (hyperspectral), tous deux financés par le CNES dans le cadre du programme TOSCA. Un travail de développement est toujours en cours avec la collaboration de l'UMR AMAP afin de finaliser cette plateforme, et il est attendu que le/la doctorant/e contribue à cette étape.
- Une librairie de cartographie de la biodiversité à partir de données de télédétection initialement développée pour des applications hyperspectrales et adaptée au cas multispectral (Féret and Asner, 2014). Une collaboration est en cours avec l'UMR AMAP afin de faire évoluer la librairie existante et implémenter les indicateurs de biodiversité utilisés spécifiquement au sein de l'UMR (Pélissier et al., 2003). Le doctorant aura à finaliser l'intégration des librairies « biodiversité » dans la librairie « traitement d'image ».
- Un ensemble de données expérimentales comprenant des acquisitions aéroportées (LiDAR, hyperspectral, imagerie très haute résolution spatiale) et des données au sol (LiDAR terrestre, propriétés spectrométriques de feuilles/troncs/litière, inventaires forestiers, cartes de houppiers, dosage de chimie foliaire). Le/la doctorant/e aura à se familiariser avec ces différents types de données.

Un objectif technique majeur de ce projet de thèse sera donc d'assimiler l'ensemble des données et outils disponibles dans une chaîne de traitement documentée et reposant sur des outils libres et données rendues publiques à terme, pour engager la réflexion sur le **transfert d'un produit 'cartographie de la biodiversité tropicale' au sein du pôle de données Theia.**

Etat de l'art

Ce projet de thèse se situe à la croisée de plusieurs thématiques, il requiert donc l'assimilation d'un certain nombre de concepts et connaissances de champs disciplinaires tels que le traitement du signal et l'analyse de données de télédétection, la physique du rayonnement et l'écologie.

Méthodes de cartographie de la biodiversité tropicale par télédétection

La cartographie de la biodiversité par télédétection est une application dont le développement est récent en raison de la complexité de la tâche tant dans la collecte et l'analyse des données sur le terrain (difficulté à définir un schéma d'échantillonnage valide, définition des indicateurs de biodiversité à utiliser) (Chiarucci, 2007; Palmer et al., 2002; Pélissier et al., 2003) que dans l'analyse des données issues de télédétection. Les écosystèmes tropicaux sont particulièrement difficiles à étudier en raison de la complexité de ces milieux, de la difficulté d'acquisition de données terrain, et dans la qualité de données issues de télédétection (forte nébulosité). La disponibilité des données acquises par le satellite LandSat a cependant permis un certain nombre d'avancées dans ce domaine au cours des vingt dernières années (Muro et al., 2016; Thessler et al., 2005; Tuomisto et al., 1995). Thessler et al. (2005) proposent ainsi une méthode permettant de cartographier les gradients floristiques en forêt tropicale humide à partir de données terrain combinées à des images satellite. Un certain nombre d'études ont depuis démontré le potentiel de la télédétection pour la cartographie de la biodiversité, en particulier en milieux tropicaux.

L'imagerie hyperspectrale a démontré un potentiel particulièrement intéressant pour la cartographie de la biodiversité et des gradients floristiques pour différents écosystèmes, allant des milieux de savane aux forêts tropicales et en passant par les prairies tempérées (Baldeck et al., 2014; Feilhauer et al., 2011; Féret and Asner, 2014; Vaglio Laurin et al., 2014). La plupart de ces méthodes reposent sur une adaptation de l'hypothèse de variabilité spectrale (Palmer et al., 2002) pour finalement mesurer l'hétérogénéité spectrale à différentes échelles.

La disponibilité des données Sentinel-2 du programme Copernicus ouvre aujourd'hui la voie à la mise au point de nouvelles méthodes pour la cartographie de la biodiversité (Rocchini et al., 2016; Skidmore et al., 2015; Vaglio Laurin et al., 2016). Dans le contexte d'une mise à l'échelle régionale, il est important de proposer une méthode nécessitant un besoin d'étalonnage très modéré en raison de la faible disponibilité de ces données. Les méthodes sélectionnées et adaptées dans le cadre du projet sont l'ont été dans cette perspective.

Avancées dans la modélisation physique des données issues de télédétection

Les outils de modélisation du transfert radiatif jouent un rôle primordial dans l'utilisation des données issues de télédétection, en contribuant notamment à la meilleure interprétation du signal physique, et à la mise au point de méthodes robustes pour l'estimation de différentes propriétés de végétation (Combal et al., 2003; Féret et al., 2011; Jacquemoud et al., 2009; Morton et al., 2014).

La modélisation des milieux complexes, comme les forêts tropicales structurellement hétérogènes et taxonomiquement très riches, représente un défi scientifique et technique important et une source potentielle de nombreuses avancées théoriques et méthodologiques. Les modèles de transfert radiatif en 3 dimensions (Gastellu-Etchegorry et al., 2015) sont dans ce cas essentiels, mais très difficiles à paramétrer en raison de la quantité de données à fournir en entrée du modèle (Jetz et al., 2016; Schneider et al., 2014). Du point de vue de la structure des couverts forestiers, Les développements récents s'appuyant sur les données expérimentales issues de capteurs LiDAR permet aujourd'hui d'aider à la représentation fine de la structure des couverts hétérogènes (Grau et al., 2014). Du point de vue de la radiométrie, les améliorations dans le domaine de la modélisation des propriétés optiques foliaires et la prise en compte d'un équipement pigmentaire foliaire étendu à la chlorophylle, aux caroténoïdes et aux anthocyanes, permet de simuler de manière réaliste les propriétés optiques foliaires sur l'ensemble d'un cycle de développement (Féret et al., Under review). Enfin, des avancées récentes ont été faites dans la fusion de données issues de capteurs optiques passifs multispectraux et hyperspectraux avec des données issues de LiDAR (Yin, 2015).

Hypothèses

Les données de télédétection acquises par la constellation satellite Sentinel-2 représentent à l'heure actuelle l'une des meilleures opportunités pour la cartographie de la biodiversité des milieux complexes, en particulier les forêts tropicales. Le lancement très récent de ces satellites ouvre ainsi la voie à l'exploration de nombreuses hypothèses scientifiques. Afin d'aider à la mise au point opérationnelle d'une méthode de cartographie basée sur ces données, il est nécessaire de parvenir à une meilleure compréhension des composantes spectrales et spatiales du signal mesuré par ce satellite. Cette bonne compréhension permettra alors de s'appuyer de façon optimale sur **l'hypothèse de variabilité spectrale (Spectral Variation Hypothesis, SVH)**, pour estimer au mieux la richesse taxonomique des forêts et la distribution des communautés d'espèces à une échelle spatiale fine (Palmer et al., 2002; Rocchini et al., 2016, 2010). Cette hypothèse suggère que l'information contenue dans la variabilité spatiale des propriétés spectrales de surface mesurées par un capteur peut être utilisée selon l'échelle d'étude comme indicateur de l'hétérogénéité des habitats, de l'environnement ou de la diversité taxonomique. La SVH est un concept assez général qui s'accompagne sur le plan pratique de nombreuses variantes tant sur le plan du type de données utilisées (multi/hyperspectral, résolution spatiale très haute à modérée...) que des méthodologies appropriées pour dériver des indicateurs de variabilité adaptés au milieu considéré.

La mise au point d'une telle méthode passe par une démarche de mise à l'échelle combinant des **données expérimentales** acquises à différentes échelles (données terrain, données de télédétection aéroportées et satellite) ainsi qu'une approche basée sur la **modélisation physique des interactions entre le rayonnement solaire et ces milieux complexes par leur diversité structurale et biologique**.

Les données expérimentales permettront notamment d'effectuer une validation fine des méthodologies appliquées à différentes échelles ainsi que des modèles physiques utilisés. Une fois

validés, ces modèles physiques seront ensuite utilisés de manière prospective afin de mieux comprendre les limites méthodologiques et instrumentales dans l'estimation des propriétés de végétation d'intérêt.

Plus largement, le cadre méthodologique développé dans le contexte des forêts tropicales pourra être étendu à l'étude d'autres milieux, sous réserve d'adaptation des indicateurs de variabilité spectrale en fonction du contexte d'étude. Un certain nombre d'études partageant un cadre méthodologique proche ou compatible ont ainsi permis de cartographier la distribution des communautés d'espèces pour d'autres types d'écosystèmes : savanes (Baldeck et al., 2014; Baldeck and Asner, 2013), prairies tempérées (Feilhauer et al., 2011).

Enfin, des données spatialisées sur les communautés floristiques de forêts tropicales sont aussi particulièrement intéressantes au-delà de la communauté des écologues intéressée par la biodiversité. Ces informations peuvent s'avérer extrêmement précieuses, notamment sur les thématiques associées au **stockage du carbone aérien** et à l'**activité microbienne des sols** associée à différents cycles géochimiques (carbone, phosphore, eau). Enfin, les modèles de distribution d'espèce à la base de nombreux travaux en **écologie théorique** et dans l'**étude des dynamiques en réponse aux changements climatiques** pourraient eux aussi bénéficier de l'accès facilité à des cartes de biodiversité issues de l'analyse de données de télédétection (He et al., 2015). Enfin, dans le cadre de la convergence des technologies et données disponibles avec le programme Copernicus, ce projet pourra donner lieu par la suite ou en parallèle à des collaborations au sein de TETIS et au-delà (N. Baghdadi, D. Ho Tong Minh, CES Biomasse porté par le CESBIO) pour étudier la synergie entre les données Sentinel-1 et Sentinel-2.

Zone d'étude et habitats concernés

La principale zone d'étude est localisée sur un certain nombre de **sites expérimentaux et sites d'étude situés en Guyane Française**. Ces sites ont fait l'objet d'un suivi et d'une documentation depuis de nombreuses années : **Nouragues, Paracou, Sinnamary, Montagne Tortue**. Les sites des Nouragues (suivi CNRS) et de Paracou (CIRAD) sont ainsi suivis depuis plus de 30 ans. Cette documentation comprend des **inventaires réguliers**, une **expertise scientifique** relative à l'historique des perturbations sur ces sites, ainsi qu'un grand nombre de mesures **in situ et campagnes aéroportées (Radar, LiDAR, très haute résolution spatiale...)**. Les communautés de chercheurs impliquées dans les projets sur ces sites expérimentaux comptent de nombreuses équipes internationales d'écologues, botanistes, physiologistes, forestiers et experts en télédétection.

Récemment en 2016, une campagne terrain financée par le CNES associée à une acquisition aéroportée a permis d'acquérir un jeu de données complet comprenant :

- Couverture hyperspectrale aéroportée : 400 bandes spectrales couvrant le domaine allant de 400 nm à 2500 nm
- Couverture LiDAR aéroportée avec une densité de points supérieure à 30 pts /m².
- Couverture THRS aéroportée (10 cm)
- Acquisitions TLS sur ~1ha permettant de réaliser une maquette 3D à haut niveau de détail en vue d'une validation.
- Caractérisation de propriétés optiques foliaires (réflectances et transmittance directionnelle hémisphérique sur le domaine 400-2500 nm sur plusieurs dizaines d'espèces et plusieurs centaines d'échantillons recueillies sur les sites des Nouragues et de Paracou), de tronc et de litière. L'échantillonnage spectral des propriétés optiques foliaires a été particulièrement intense sur la zone acquise au TLS afin de caractériser au mieux tous les individus émergents principaux).
- Délimitation d'espèces d'arbres

Irstea a pris une part active dans l'organisation de cette campagne à différents postes, de la collecte de données terrain à la préparation, la synchronisation et au bon déroulement de la campagne

aéroportée. La dynamique mise en place avec cette campagne représente une opportunité particulièrement intéressante de continuer à structurer des collaborations entre le monde de la télédétection et celui de l'écologie, notamment entre les unités TETIS, AMAP, CESBIO, Espace-Dev, CEFE, EDB (Laboratoire Evolution et Diversité Biologique, Toulouse), ainsi qu'avec les agences spatiales CNES et ESA, et les plateformes et infrastructures existantes (Theia, SEAS Guyane). Ce type de collaboration est aussi particulièrement attendu à l'international (Pettorelli et al., 2016a, 2016b; Rocchini et al., 2016). Des collaborations internationales sont aussi envisagées, notamment avec le Carnegie Institution for Science (Laboratoire Asner, Department of Global Ecology, Standord USA), permettant d'avoir accès à des jeux de données terrain et de télédétection aéroportée (hyperspectral + LiDAR) pour continuer la validation des produits cartographiques de biodiversité sur différents sites localisés en Amazonie Péruvienne.

Programme de travail

Activité 1 : Analyse bibliographique : i) indicateurs spatialisés pour la cartographie des communautés en forêts tropicales; ii) méthodes de cartographie et de suivi des forêts tropicales par télédétection hyperspectrale et multispectrale; iii) modélisation du transfert radiatif des milieux forestiers complexes.

Activité 2 : Prise en main des outils et données à disposition : i) chaîne de traitement des données hyperspectrales pour la cartographie de la biodiversité ; ii) plateforme de simulation de données de télédétection construite autour du modèle de transfert radiatif DART ; iii) ensemble des données terrain et d'imagerie aéroportée et satellite disponibles

Activité 3 : Validation des données de biodiversité obtenues à partir de l'imagerie hyperspectrale et des données Sentinel-2: i) validation à partir des données terrain existantes sur un nombre de parcelles limité ; ii) validation a posteriori par une campagne d'identification terrain des communautés d'espèces à l'échelle des sites expérimentaux et de leur voisinage en collaboration avec des écologues et botanistes.

Activité 4 : mise en place de simulations DART : i) validation du modèle à partir de maquettes détaillées issues de l'ensemble des données expérimentales acquises sur le terrain ; mise au point d'études de sensibilité permettant de déterminer la sensibilité des méthodes d'estimation de la biodiversité à un certain nombre de facteurs liés à l'acquisition des données et aux conditions du terrain comme la topographie.

Activité 5 : contribution à une étude de faisabilité en collaboration avec le pôle Theia pour le transfert d'une méthode de cartographie de la biodiversité tropicale dans le portfolio des méthodes mises à disposition

Activité 6 : Rédaction d'articles scientifiques

Activité 7 : Rédaction de la thèse

	Année 1				Année 2				Année 3			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Act.1												
Act.2												
Act.3												
Act.4												
Act.5												
Act.6												
Act.7												

Insertion de la thèse dans les enjeux de politique publique et de recherche

Ce travail de thèse devra contribuer à l'avancement de la connaissance sur la distribution spatiale des communautés d'espèces et des hotspots taxonomiques aux échelles locale et régionale en milieux de forêts tropicales. La mise au point d'une méthodologie permettra aussi de réaliser un suivi de l'évolution de cette biodiversité tout au long de la mission Sentinel-2, et éventuellement lors du lancement d'autres missions spatiales multispectrales et hyperspectrales aux caractéristiques instrumentales compatibles.

A l'échelle nationale et européenne, **le territoire de Guyane comprend une biodiversité floristique et faunistique particulièrement riche qui place la France au premier plan européen des ressources en biodiversité**. Les pressions importantes (utilisation des ressources naturelles comme l'orpaillage, changements climatiques ...) en font un territoire riche en enjeux et défis à relever des maintenant. Ces connaissances sont aussi parmi les premières missions de la future **agence française pour la biodiversité**. Les travaux programmés et les résultats espérés à l'issue de ces travaux seront là-aussi une contribution précieuse.

A l'échelle mondiale, les conclusions partagées par un certain nombre de structures assurant le suivi de la biodiversité globale démontrent l'accélération du déclin de la biodiversité et le manque de moyens et de connaissances pour répondre aux nombreux enjeux qui en découlent (cf. rapport [Living Planet 2016 de la WWF](#)). Il y a donc un besoin urgent de se doter des moyens permettant une meilleure connaissance sur l'ensemble des écosystèmes terrestres et aquatiques, parmi lesquels les forêts tropicales représentent un milieu particulièrement intéressant.

Insertion dans la stratégie Irstea et les projets en cours

L'UMR TETIS est une unité mixte de recherche pour les territoires et l'environnement par la télédétection et l'information spatiale. L'équipe ATTOS développe des techniques et méthodes permettant de détecter, identifier, caractériser et suivre des surfaces et des objets à partir de données aérospatiales ou acquises sur le terrain. Les techniques optiques, thermique, radar et lidar sont au cœur du projet de recherche qui est fortement orienté vers l'utilisation de la télédétection pour des applications liées à l'environnement et à l'aménagement du territoire. Ce projet de thèse trouvera donc parfaitement sa place au sein de l'unité, et pourra bénéficier des compétences internes issues des autres équipes, permettant d'ouvrir les perspectives du travail accompli, notamment par la combinaison avec des outils de **modélisation spatialisée**, la **fouille et l'analyse de grands volumes de données de télédétection**, et **l'étude d'utilisation des informations de télédétection dans un cadre local** (collaboration avec les écologues), **régional** (plateforme SEAS Guyane), **national** (pôle Theia) et **international** (GEO BON / GOFC-GOLD). Le projet doctoral bénéficiera de l'ensemble des moyens mis à disposition de la vingtaine de doctorants de l'UMR.

A l'échelle locale de l'unité TETIS, ce projet de thèse s'inscrit pleinement dans :

- i) le domaine de compétence de l'unité et la poursuite d'actions déjà engagées, tant en termes de développement d'outils, que de volonté de consolider le groupe de recherche « biodiversité »
- ii) la volonté de développer ou consolider les liens et collaborations existant avec les unités montpelliéraines de premier plan dans les thématiques de biodiversité et d'écologie comme le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) et l'UMR AMAP.

Ce projet de thèse s'inscrit aussi dans la stratégie du **département « Territoires »**, notamment le **Domaine d'activité « Fonctionnement et dynamique des écosystèmes »** à travers les **thématiques des effets du changement climatique et/ou des changements de gestion sur la structure, la dynamique et le fonctionnement des écosystèmes**. Il répond aussi aux objectifs du département en termes de consolidation de la connaissance sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes forestiers.

A l'échelle de l'institut, cette thèse s'inscrit principalement dans le **Défi 1** défini dans la stratégie 2020 d'Irstea. Ce défi 1 « **qualité environnementale** » consiste à concevoir des méthodes et outils pour définir, comprendre et agir sur la qualité environnementale. Cette thèse va contribuer à développer des outils et méthodes d'analyse permettant de valoriser les données de télédétection dont la disponibilité a été accrue grâce au programme **Copernicus**, en synergie avec le pôle thématique Theia. A l'issue de cette thèse, nous avons pour objectif de travailler avec les équipes du pôle Theia afin d'effectuer un transfert des avancées méthodologique permises par ce projet et dont le potentiel aura été identifié et validé, afin de développer une méthode opérationnelle ou de fournir des produits et services issus de cette méthode.

Enfin, cette thèse s'inscrit aussi dans le cadre de l'inflexion 3 « Biodiversité, services écosystémiques, et ingénierie écologique » : les méthodologies développées et mises en œuvre ont pour objectif de suivre différentes composantes de la biodiversité (diversité taxonomique locale, distribution spatiale de communautés d'espèces) à l'aide de données de télédétection. Les outils produits dans le cadre de ce projet seront mis à disposition pour qu'idéalement les réseaux d'observation et décideurs s'approprient les informations qui en sont produites afin d'améliorer les plans de suivi et gestion de la biodiversité à différentes échelles.

En cas de succès, cette nouvelle source d'information pourrait représenter une contribution importante pour de nombreux communautés et instances internationales, notamment le réseau d'observation de la Terre GEO BON. La disponibilité de cartes de biodiversité tropicale contribuerait ainsi à améliorer l'estimation du carbone forestier en permettant d'ajuster les relations statistiques dérivées de données Radar ou LiDAR à des types forestiers mieux définis. Les recherches scientifiques effectuées dans le domaine de la microbiologie des sols et notamment la relation existant entre les micro-organismes du sol et la composition floristique des forêts pourraient aussi tirer bénéfice de ces informations. Enfin, des collaborations dans le domaine de la modélisation spatialisée sont fortement envisageables afin d'aider à comprendre les interactions entre la biodiversité et de nombreux facteurs comme les variables environnementales et l'activité humaine.

La meilleure connaissance de la biodiversité des écosystèmes tropicaux et la mise à disposition de moyens permettant de suivre son évolution en relation avec les activités humaines ou les changements climatiques à venir permettra aussi d'améliorer la chaîne de décision face à ces enjeux majeurs que sont les l'érosion de la biodiversité et la dégradation des écosystèmes associée aux changements climatiques. L'élaboration des indicateurs écologiques doit permettre d'apporter des réponses concrètes aux besoins des politiques publiques. Enfin, ce travail de recherche permettra de développer les collaborations avec **l'Agence Française pour la Biodiversité**.

Le doctorant bénéficiera des connaissances et des données issues des projets et réseaux dans lesquels l'équipe d'accueil est impliquée :

- Projets TOSCA HyperTropik, HyperBio, StemLeaf et ExpeVal
- Projets ESA Hypos
- Participation au groupe de travail « fonctionnement des écosystèmes » du réseau GEO BON
- Collaborations actives avec l'équipe de développement du modèle DART au CESBIO
- Pôle Thématique surfaces continentales Theia.

Liaisons avec les équipes (internes et externes)

Contacts modélisation physique

- CESBIO : J.-P. Gastellu-Etchegorry (transfert radiatif avec DART)
- UMR AMAP: C. Lavalley-Guzman, N. Barbier (mise en place d'une plateforme de simulation)
- Collaborations internes à l'UMR TETIS : S. Durrieu (mise en place d'une plateforme de simulation, couplage optique / LiDAR pour associer diversité taxonomique et biomasse aérienne)

Contacts Télédétection des habitats naturels

- IRD, UMR AMAP: G. Vincent, C. Proisy
- Collaborations internes à l'UMR TETIS: S. Luque, N. Baghdadi, D. Ho Tong Minh (modélisation spatialisée, biomasse forestière)

Contacts Milieux forestiers / Ecologie / Botanique / Carbone / sols

- IRD, UMR AMAP: R. Pélissier, D. Sabatier, M. Réjou-Mechain (convergence des indicateurs de biodiversité terrain et télédétection, synergie biomasse/communautés d'espèces)
- CNRS, UMR CEFÉ: N. Fromin (communauté microbienne du sol associée à la composition floristique, cycle du carbone du sol)
- CNRS, UMR EDB: J. Chave (écologie des communautés, modélisation et analyse)
- ONF: L. Descroix (identification de la ressource en bois)
- Carnegie Institution for Science, Department of Global Ecology: G. Asner (écologie tropicale, télédétection)
- Collaborations Irstea: G. Kunstler (écologie des communautés, modélisation et analyse)

Profil du candidat

- Profil du candidat Master 2 ou Ingénieur en traitement d'images, spécialisé en télédétection et ayant des connaissances en écologie.
- Maîtrise de la programmation pour au moins un langage parmi Python et R.
- Aptitudes au travail en interdisciplinarité et sur le terrain.
- Capacité rédactionnelle (production d'articles scientifiques exigée).
- Bon niveau en anglais scientifique (rédaction d'articles scientifiques).

Laboratoire(s) d'accueil envisagé(s)

UMR TETIS

Directeur de thèse

Christiane WEBER (CNRS, UMR TETIS)

Responsables dans le laboratoire UMR-TETIS

Jean-Baptiste Féret

Financement sur 3 ans, pour un démarrage à l'automne 2017

- Une demi-bourse de thèse Irstea est demandée en octobre 2016
- Une demi-bourse CNES est demandée en octobre 2016
- Un projet ANR Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs a été soumis en octobre 2016

Références:

- Asner, G.P., Anderson, C.B., Martin, R.E., Tupayachi, R., Knapp, D.E., Sinca, F., 2015a. Landscape biogeochemistry reflected in shifting distributions of chemical traits in the Amazon forest canopy. *Nature Geoscience* 8, 567–573. doi:10.1038/ngeo2443
- Asner, G.P., Martin, R.E., Anderson, C.B., Knapp, D.E., 2015b. Quantifying forest canopy traits: Imaging spectroscopy versus field survey. *Remote Sensing of Environment* 158, 15–27. doi:10.1016/j.rse.2014.11.011
- Baldeck, C.A., Asner, G.P., Martin, R.E., Anderson, C.B., Knapp, D.E., Kellner, J.R., Wright, S.J., 2015. Operational Tree Species Mapping in a Diverse Tropical Forest with Airborne Imaging Spectroscopy. *PLOS ONE* 10, e0118403. doi:10.1371/journal.pone.0118403

- Baldeck, C.A., Colgan, M.S., Féret, J.-B., Levick, S.R., Martin, R.E., Asner, G.P., 2014. Landscape-scale variation in plant community composition of an African savanna from airborne species mapping. *Ecological Applications* 24, 84–93. doi:10.1890/13-0307.1
- Baldeck, C., Asner, G., 2013. Estimating Vegetation Beta Diversity from Airborne Imaging Spectroscopy and Unsupervised Clustering. *Remote Sensing* 5, 2057–2071. doi:10.3390/rs5052057
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., Garcia, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 1, e1400253–e1400253. doi:10.1126/sciadv.1400253
- Chadwick, K., Asner, G., 2016. Organismic-Scale Remote Sensing of Canopy Foliar Traits in Lowland Tropical Forests. *Remote Sensing* 8, 87. doi:10.3390/rs8020087
- Chapin III, F.S., Zavaleta, E.S., Eviner, V.T., Naylor, R.L., Vitousek, P.M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Lavorel, S., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Mack, M.C., Díaz, S., 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405, 234–242. doi:10.1038/35012241
- Chiarucci, A., 2007. To Sample or Not to Sample? That is the Question ... For the Vegetation Scientist. *Folia Geobotanica* 42, 209–216.
- Combal, B., Baret, F., Weiss, M., Trubuil, A., Macé, D., Pragnère, A., Myneni, R., Knyazikhin, Y., Wang, L., 2003. Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance. *Remote Sensing of Environment* 84, 1–15. doi:10.1016/S0034-4257(02)00035-4
- Feilhauer, H., Faude, U., Schmidtlein, S., 2011. Combining Isomap ordination and imaging spectroscopy to map continuous floristic gradients in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment* 115, 2513–2524. doi:10.1016/j.rse.2011.05.011
- Féret, J.-B., Asner, G.P., 2014. Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy. *Ecological Applications* 24, 1289–1296. doi:10.1890/13-1824.1
- Féret, J.-B., François, C., Gitelson, A., Asner, G.P., Barry, K.M., Panigada, C., Richardson, A.D., Jacquemoud, S., 2011. Optimizing spectral indices and chemometric analysis of leaf chemical properties using radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment* 115, 2742–2750. doi:10.1016/j.rse.2011.06.016
- Féret, J.-B., Noble, S.D., Gitelson, A.A., Jacquemoud, S., Under review. PROSPECT-Dynamic : modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. *Remote Sensing of Environment*.
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Yin, T., Lauret, N., Cajgfinger, T., Gregoire, T., Grau, E., Féret, J.-B., Lopes, M., Guilleux, J., Dedieu, G., Malenovsky, Z., Cook, B., Morton, D., Rubio, J., Durrieu, S., Cazanave, G., Martin, E., Ristorcelli, T., 2015. Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sensing* 7, 1667–1701. doi:10.3390/rs70201667
- Grau, E., Durrieu, S., Fournier, R., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Yin, T., Lauret, N., Bouvier, M., 2014. Comparing voxelisation methods of 3D terrestrial laser scanning with Radiative Transfer simulation to assess vegetation density. Presented at the ForestSAT2014.
- He, K.S., Bradley, B.A., Cord, A.F., Rocchini, D., Tuanmu, M.-N., Schmidtlein, S., Turner, W., Wegmann, M., Pettorelli, N., 2015. Will remote sensing shape the next generation of species distribution models? *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 1, 4–18. doi:10.1002/rse2.7
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., Ustin, S.L., 2009. PROSPECT+ SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113, S56–S66.
- Jetz, W., Cavender-Bares, J., Pavlick, R., Schimel, D., Davis, F.W., Asner, G.P., Guralnick, R., Kattge, J., Latimer, A.M., Moorcroft, P., Schaepman, M.E., Schildhauer, M.P., Schneider, F.D., Schrod, F., Stahl, U., Ustin, S.L., 2016. Monitoring plant functional diversity from space. *Nature Plants* 2, 16024. doi:10.1038/nplants.2016.24

- Morris, R.J., 2010. Anthropogenic impacts on tropical forest biodiversity: a network structure and ecosystem functioning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, 3709–3718. doi:10.1098/rstb.2010.0273
- 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. doi:10.1038/nature13006
- Muro, J., doninck, J.V., Tuomisto, H., Higgins, M.A., Moulatlet, G.M., Ruokolainen, K., 2016. Floristic composition and across-track reflectance gradient in Landsat images over Amazonian forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 119, 361–372. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.06.016
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. doi:10.1038/35002501
- Palmer, M.W., Earls, P.G., Hoagland, B.W., White, P.S., Wohlgemuth, T., 2002. Quantitative tools for perfecting species lists. *Environmetrics* 13, 121–137. doi:10.1002/env.516
- Pélissier, R., Couteron, P., Dray, S., Sabatier, D., 2003. Consistency between Ordination Techniques and Diversity Measurements: Two Strategies for Species Occurrence Data. *Ecology* 84, 242–251.
- Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., Bruford, M.W., Brummitt, N., Butchart, S.H.M., Cardoso, A.C., Coops, N.C., Dulloo, E., Faith, D.P., Freyhof, J., Gregory, R.D., Heip, C., Hoft, R., Hurtt, G., Jetz, W., Karp, D.S., McGeoch, M.A., Obura, D., Onoda, Y., Pettorelli, N., Reyers, B., Sayre, R., Scharlemann, J.P.W., Stuart, S.N., Turak, E., Walpole, M., Wegmann, M., 2013. Essential Biodiversity Variables. *Science* 339, 277–278. doi:10.1126/science.1229931
- Pettorelli, N., Owen, H.J.F., Duncan, C., 2016a. How do we want Satellite Remote Sensing to support biodiversity conservation globally? *Methods in Ecology and Evolution* 7, 656–665. doi:10.1111/2041-210X.12545
- Pettorelli, N., Wegmann, M., Skidmore, A., Mùcher, S., Dawson, T.P., Fernandez, M., Lucas, R., Schaeppman, M.E., Wang, T., O'Connor, B., Jongman, R.H.G., Kempeneers, P., Sonnenschein, R., Leidner, A.K., Böhm, M., He, K.S., Nagendra, H., Dubois, G., Fatoyinbo, T., Hansen, M.C., Paganini, M., de Klerk, H.M., Asner, G.P., Kerr, J.T., Estes, A.B., Schmeller, D.S., Heiden, U., Rocchini, D., Pereira, H.M., Turak, E., Fernandez, N., Lausch, A., Cho, M.A., Alcaraz-Segura, D., McGeoch, M.A., Turner, W., Mueller, A., St-Louis, V., Penner, J., Vihervaara, P., Belward, A., Reyers, B., Geller, G.N., 2016b. Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 2, 122–131. doi:10.1002/rse2.15
- Rocchini, D., Balkenhol, N., Carter, G.A., Foody, G.M., Gillespie, T.W., He, K.S., Kark, S., Levin, N., Lucas, K., Luoto, M., Nagendra, H., Oldeland, J., Ricotta, C., Southworth, J., Neteler, M., 2010. Remotely sensed spectral heterogeneity as a proxy of species diversity: Recent advances and open challenges. *Ecological Informatics* 5, 318–329. doi:10.1016/j.ecoinf.2010.06.001
- Rocchini, D., Boyd, D.S., Féret, J.-B., Foody, G.M., He, K.S., Lausch, A., Nagendra, H., Wegmann, M., Pettorelli, N., 2016. Satellite remote sensing to monitor species diversity: potential and pitfalls. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 2, 25–36. doi:10.1002/rse2.9
- Schneider, F.D., Leiterer, R., Morsdorf, F., Gastellu-Etcheberry, J.-P., Lauret, N., Pfeifer, N., Schaeppman, M.E., 2014. Simulating imaging spectrometer data: 3D forest modeling based on LiDAR and in situ data. *Remote Sensing of Environment* 152, 235–250. doi:10.1016/j.rse.2014.06.015
- Secades, C., O'Connor, B., Brown, C., Walpole, M., UNEP World Conservation Monitoring Centre, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014. Earth observation for biodiversity monitoring: a review of current approaches and future opportunities for tracking progress towards the Aichi biodiversity targets.

- Skidmore, A.K., Pettorelli, N., Coops, N.C., Geller, G.N., Hansen, M., Lucas, R., Mùcher, C.A., O'Connor, B., Paganini, M., Pereira, H.M., Schaepman, M.E., Turner, W., Wang, T., Wegmann, M., 2015. Environmental science: Agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature* 523, 403–405. doi:10.1038/523403a
- Thessler, S., Ruokolainen, K., Tuomisto, H., Tomppo, E., 2005. Mapping gradual landscape-scale floristic changes in Amazonian primary rain forests by combining ordination and remote sensing. *Global Ecology and Biogeography* 14, 315–325. doi:10.1111/j.1466-822X.2005.00158.x
- Tittensor, D.P., Walpole, M., Hill, S.L.L., Boyce, D.G., Britten, G.L., Burgess, N.D., Butchart, S.H.M., Leadley, P.W., Regan, E.C., Alkemade, R., Baumung, R., Bellard, C., Bouwman, L., Bowles-Newark, N.J., Chenery, A.M., Cheung, W.W.L., Christensen, V., Cooper, H.D., Crowther, A.R., Dixon, M.J.R., Galli, A., Gaveau, V., Gregory, R.D., Gutierrez, N.L., Hirsch, T.L., Hoft, R., Januchowski-Hartley, S.R., Karmann, M., Krug, C.B., Leverington, F.J., Loh, J., Lojenga, R.K., Malsch, K., Marques, A., Morgan, D.H.W., Mumby, P.J., Newbold, T., Noonan-Mooney, K., Pagad, S.N., Parks, B.C., Pereira, H.M., Robertson, T., Rondinini, C., Santini, L., Scharlemann, J.P.W., Schindler, S., Sumaila, U.R., Teh, L.S.L., van Kolck, J., Visconti, P., Ye, Y., 2014. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science* 346, 241–244. doi:10.1126/science.1257484
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., Kalliola, R., Linna, A., Danjoy, W., Rodriguez, Z., 1995. Dissecting Amazonian Biodiversity. *Science* 269, 63–66. doi:10.1126/science.269.5220.63
- Vaglio Laurin, G., Chan, J.C.-W., Chen, Q., Lindsell, J.A., Coomes, D.A., Guerriero, L., Frate, F.D., Miglietta, F., Valentini, R., 2014. Biodiversity Mapping in a Tropical West African Forest with Airborne Hyperspectral Data. *PLoS ONE* 9, e97910. doi:10.1371/journal.pone.0097910
- Vaglio Laurin, G., Puletti, N., Hawthorne, W., Liesenberg, V., Corona, P., Papale, D., Chen, Q., Valentini, R., 2016. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment* 176, 163–176. doi:10.1016/j.rse.2016.01.017
- Yin, T., 2015. Modélisation 3D du transfert radiatif pour simuler les images et données de spectroradiomètres et Lidars satellites et aéroportés de couverts végétaux et urbains. Toulouse 3, Toulouse.