Projet BIOLID- ANR- INDECO 2012. Compte-rendu de fin de projet

S. Durrieu, Frédéric Gosselin, M. Bouvier, B. Herpigny

▶ **To cite this version:**

S. Durrieu, Frédéric Gosselin, M. Bouvier, B. Herpigny. Projet BIOLID- ANR- INDECO 2012. Compte-rendu de fin de projet. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.13. hal-02601203

HAL Id: hal-02601203
https://hal.inrae.fr/hal-02601203

Submitted on 16 May 2020

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.

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR	**Compte-rendu de fin de projet**	BIOLID-INDECO 2012 20/02/2015 13 pages

Institut Carnot Irstea

Appel d'offre INDECO 2012

Projet BIOLID

Abondement Carnot 2010

A IDENTIFICATION 1
B RESUME CONSOLIDE PUBLIC 1
C MEMOIRE SCIENTIFIQUE 2
C.1 Enjeux et problématique, état de l'art 2
C.2 Approche scientifique et technique 3
C.3 Résultats obtenus 6
C.4 Exploitation des résultats 6
C.5 Discussion 8
C.6 Références 9
D LISTE DES LIVRABLES 10
E IMPACT DU PROJET 10
E.1 Indicateurs d'impact 10
E.2 Liste des publications et communications 11
E.3 Liste des éléments de valorisation ..... **Erreur ! Signet non défini.**
E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) 12

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	BIOLID
Titre du projet	Etude du lien entre structure 3D de la végétation forestière mesurée par lidar et biodiversité
Nom de l'institut Carnot	Irstea
Période du projet (date de début – date de fin)	01-02-2013 / 31-01-2015
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme Sylvie Durrieu
Téléphone	04-67-54-87-32
Adresse électronique	sylvie.durrieu@teledetection.fr
Date de rédaction	20-02-2015
Co-rédacteurs	Frédéric Gosselin, Marc Bouvier, Basile Herpigny

Budget total du projet	18 476 €
Part pris sur l'abondement 2010	A remplir

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Le projet BIOLID est un projet de recherche appliquée de l'institut Carnot Irstea. Le projet a commencé en 2013 et a duré 2 ans. Il a bénéficié d'une aide de l'abondement Carnot de xxx € pour un coût global de l'ordre de 18 k€.

L'objectif du projet BIOLID était de développer de nouvelles approches pour explorer le lien entre structure de la végétation forestière et biodiversité en s'appuyant sur la technologie Lidar pour caractériser la structure de la végétation. Parvenir à construire des modèles fiables décrivant le lien entre la biodiversité et la structure de la végétation est utile à la fois pour analyser les structures les plus propices à la biodiversité et pour fournir aux gestionnaires, dans le contexte de gestion durable de la ressource forestière, des outils de suivi et de gestion de cette biodiversité. Les approches Bayésiennes, récemment introduites en modélisation écologique, offrent un cadre de travail particulièrement intéressant pour prendre en compte les spécificités des relations complexes entre la biodiversité et les nombreuses variables environnementales susceptibles de l'influencer. Par ailleurs, le Lidar est une technologie de télédétection émergente qui offre un potentiel inégalé pour décrire la structure en 3D de la végétation à différentes échelles, permettant ainsi d'envisager une amélioration considérable de la caractérisation de la structure par rapport à celle généralement obtenue par les méthodes traditionnelles de terrain, et donc une amélioration des modèles décrivant le lien entre structure forestière et biodiversité. Dans ce contexte, le projet BIOLID s'est focalisé sur l'étude de la biodiversité floristique sur deux sites d'étude couverts par des données lidar, une zone de plaine, centrée sur l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) de l'ANDRA, et une zone de montagne, dans les Vosges. L' abondance des 8 espèces les plus représentées sur chaque site et la richesse spécifique de 3 groupes écologiques (plantes héliophiles, à héliophilie intermédiaire et sciaphiles) ont été étudiées en s'appuyant sur des modèles Bayésiens qui reliaient chacun des indicateurs de biodiversité à une série de variables environnementales abiotiques complétée par une variable de structure de la végétation dérivée des données lidar. 10 variables lidar, calculées sur 4 voisinages de tailles différentes, 15 m, 50 m, 100 m et 200 m. 440 modèles ont ainsi été construits. Pour chaque modèle la significativité statistique de l'apport de la variable lidar a été étudiée ainsi que la magnitude et la direction des effets de cette variable.

Comme déjà observé dans des études précédentes, la sensibilité des indicateurs de biodiversité floristique aux paramètres de structure s'est révélée variable selon les sites d'étude. Sur le site de l'OPE aucune conclusion n'a pu être tirée sur l'amélioration des modèles d'abondance par l'intégration d'une variable de structure lidar - bruit trop important au niveau des effets de la variable lidar- et la richesse spécifique des 3 groupes écologiques étudiés s'est révélée globalement insensible aux variables de structure lidar testés (81 % des modèles indiquent des effets faibles de ces variables). Sur les Vosges les résultats expriment, au contraire, 25 % des modèles pour les 8 indicateurs d'abondance, respectivement 28 %, pour les 3 indicateurs de richesse spécifique, indiquent une relation significative des indicateurs aux variables lidar, soulignant l'intérêt d'utiliser ces variables dans les modèles.

Une différence entre les comportements individuels des espèces les plus représentées et ceux du groupe écologique auxquelles elles appartiennent a été notée. Les groupes héliophiles et sciaphiles semblent répondre de façon assez directe au niveau de lumière, avec cependant un effet d'impact à distance des trouées pour la richesse du groupe des plantes sciaphiles, effet qui semble révéler un comportement d'espèce d'intérieur forestier de ce groupe déjà rapporté pour d'autres organismes (oiseaux par exemple). Le lien entre l'abondance de chaque espèce et la structure du couvert, lorsqu'il a pu être mis en évidence, est beaucoup plus complexe à expliquer même s'il implique assez souvent des variables de hauteur de végétation, à différentes échelles.

L'intérêt de pouvoir caractériser la structure de la végétation sur un voisinage au-delà de celui généralement utilisé pour des relevés dendrométriques de terrain a été clairement mis en évidence. L'analyse de la structure sur des placettes de 15 m sur lesquelles la biodiversité est observée n'a pas suffi dans la majorité des cas pour expliquer cette biodiversité locale. Utiliser des données lidar pour améliorer la modélisation du lien entre biodiversité et structure forestière apparait donc comme une piste de recherche prometteuse.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : ~~oui~~ / non

C.1 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

La prise en compte et le maintien de la biodiversité, dans le contexte de gestion durable de la ressource forestière, nécessite de développer des outils permettant d'étudier l'impact des pratiques de gestion du milieu forestier sur la biodiversité. La structure en 3D de la végétation est à la fois une des conséquences de ces pratiques et un facteur important qui va déterminer le fonctionnement des écosystèmes forestiers, conditionner le microclimat (lumière, humidité et température) et la qualité de certains habitats et donc le niveau potentiel de biodiversité. Parvenir à construire des modèles fiables décrivant le lien entre la

biodiversité et la structure forestière constitue un défi majeur et est une étape indispensable au développement de stratégies et de pratiques de gestion durable. Deux pistes de recherche s'avèrent intéressantes à explorer pour relever ce défi. La première est le développement d'un cadre de modélisation adapté à la complexité et aux spécificités des liens entre la biodiversité, décrite au travers d'indicateurs synthétiques, et les conditions environnementales, décrites par des variables abiotiques et biotiques. Les approches Bayésiennes, récemment introduites en modélisation écologique, offrent un cadre de travail particulièrement intéressant pour prendre en compte les spécificités des relations complexes entre la biodiversité et les nombreuses variables environnementales susceptibles de l'influencer. L'équipe EFNO de Nogent sur Vernisson développe des modèles de prédiction d'explication des variations de la biodiversité basés sur les approches Bayésiennes. Ces modèles ont en particulier été utilisés pour étudier le lien entre biodiversité floristique et structure forestière, domaine d'application peu exploré à ce jour. La seconde piste de recherche vise à développer notre capacité à mesurer la structure en 3D de la végétation forestière. Généralement mesurée sur le terrain elle se limite d'une part à la mesure de quelques paramètres dendrométriques classiques qui ne permettent pas d'appréhender cette structure dans toute sa complexité et qui ne permet pas d'autre part de ne caractériser qu'un voisinage restreint autour des relevés de biodiversité. La télédétection et en particulier la technologie lidar, dont l'utilisation en milieu forestier a commencé à se développer il y a une dizaine d'années, apparaissent comme une solution prometteuse pour dépasser les limites actuelles de la mesure en 3D de la structure des peuplements forestiers. L'équipe TETIS à Montpellier s'intéresse à la technologie lidar pour la caractérisation et le suivi des milieux forestier et a développé des méthodes de caractérisation de la structure forestière, jusqu'à maintenant utilisées en entrée de modèles de prédiction de la ressource forestière.

Objectifs du projet :
Dans ce contexte, l'objectif du projet BIOLID était d'évaluer le potentiel du Lidar pour produire des informations sur la structure 3D de la végétation à même d'améliorer la modélisation du lien entre structure forestière et biodiversité floristique, tout en se plaçant dans un cadre de modélisation Bayésienne.
Les indicateurs de biodiversité floristique retenus pour cette étude sont l'abondance des espèces herbacées les plus représentées sur les zones d'étude et la richesse spécifique en herbacées de trois grands groupes écologiques basés sur la tolérance à la lumière (plantes héliophiles, intermédiaires et sciaphiles).
Trois objectifs spécifiques ont été identifiés : 1) quantifier globalement l'apport de variables de structure lidar dans les modèles d'abondance et de richesse ; 2) évaluer l'intérêt de pouvoir mesurer la structure sur des voisinages de différentes surfaces (i.e., mesure de la structure sur des cercles de rayons identique aux relevés de terrain traditionnels, soit 9 ou 15 m, puis 50 m, 100 m et 200 m) ; 3) amorcer une interprétation écologique des résultats.

C.2 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Sites d'étude et données :

Deux sites d'étude ont été retenus. Le premier, d'environ 30 000 km², est occupé par plusieurs massifs forestiers de feuillus de plaine en Lorraine (autour du site de l'OPE de l'ANDRA) caractérisé par un climat semi-continental soumis à une influence atlantique. Les forêts, gérées de façon intensive, sont dominées par le hêtre (*Fagus sylvatica L.*), le charme (*Carpinus betulus L.*), et l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus L.*).
Le second, d'environ 50 000 km², est situé en zone de montagne, dans le massif des Vosges, avec des peuplements feuillus, résineux et mixtes. Le climat est semi continental et l'altitude varie de 120 m à 1420 m. Les peuplements souvent inéquiennes sont dominés par le hêtre (*Fagus sylvatica L.*), le sapin pectiné (*Abies alba Mill*.) et l'épicéa commun (*Picea abies (L.) H.Karst*).

Les données lidar ont été acquises sur une sous-partie des deux sites d'étude à l'aide de systèmes lidar aéroportés. Les surfaces couvertes par les données lidar sont respectivement de 60 km² et 1200km² pour les sites de plaine et de montagne et avec des densités d'impulsions émises de respectivement 20.7 impulsions/m² et 3.4 impulsions/m².
Les données lidar ont été prétraitées par les fournisseurs de données, Sintegra pour le site de plaine et l'IGN pour le site de montagne. Un Modèle Numérique de Surface (MNS) raster à 1m de résolution été produit ainsi que, après identification des points sols par la méthode « TIN-iterative » (Axelsson, 2000), un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à la même résolution. A partir des données fournies, les élévations des points lidar ont été transformées en hauteur au-dessus du sol en soustrayant l'élévation indiquées apr le MNT au niveau de la position planimétrique (X,Y) du point lidar.

Pour le site de plaine, les relevés terrain comprenaient 49 placettes circulaires de 9 m de rayon sur la zone couverte par les données lidar (données mises à disposition par AgroParisTech) et 741 placettes circulaires de 15 m de rayon (données mises à disposition par l'IGN) sur le reste du site.
Pour le site de montagne, les relevés terrain comprenaient 1170 placettes circulaires de 15 m de rayon (données mises à disposition par l'IGN) dont 170 se trouvaient sur la zone couverte par les données lidar.
Sur ces placettes l'information recueillie comprenait : l'abondance des espèces de la strate basse, la richesse spécifique des herbacées de trois groupes écologiques définis selon la préférence à lumière et en s'appuyant sur les 9 classes de la typologie d'Ellenberg (Ellenberg et al., 1992) (plantes sciaphiles de 1 à 3, plantes à héliophilie intermédiaire de 4 à 6, plantes héliophiles de 7 à 9). La table autécologique des correspondances de Julve (1998) a été utilisée pour évaluer l'indicateur d'Ellenberg pour chaque espèce.

Les variables environnementales abiotiques suivantes ont aussi été relevées ou estimées pour chaque placette: les caractéristiques du sol (pH et capacité en eau du sol (SWC)), la température moyenne annuelle, la radiation solaire globale, la topographie (altitude, pente et orientation). Se référer à l'annexe A dans Zilliox et Gosselin (2014) pour plus de détails sur le calcul de ces variables.

Enfin le taux de couvert (C%) des arbres et la surface terrière de chaque placette ont aussi été estimés (variables biotiques).

Méthode

Au total 11 variables de biodiversité ont été étudiées par site : les abondances des 8 espèces le plus représentées sur chacun des sites et la richesse spécifique de 3 groupes écologiques constitués des plantes héliophiles, à héliophilie intermédiaire et sciaphiles.
Les modèles statistiques Bayésiens ont été développés pour relier une variable de biodiversité à au plus une variable Lidar, en prenant en compte l'effet d'autres variables écologiques façonnant la niche des espèces ou groupes d'espèces herbacées. Ont ainsi été pris en compte le pH du sol, la radiation solaire (au-dessus du peuplement), la température, les précipitations et la topographie. Les modèles de l'abondance des espèces utilisaient par ailleurs une structure probabiliste développée récemment à EFNO (Herpigny, B. and F. Gosselin, 2015). L'apport pour la modélisation du lien entre structure forestière et biodiversité floristique de 10 variables lidar calculées sur 4 voisinages de taille différente (15 m, 50 m, 100 m et 200 m) a été étudié. Ces variables comprenaient des métriques lidar standards, issues de l'analyse des distributions des hauteurs des points lidar inclus dans les voisinages étudiés, et des variables visant à caractériser le taux de pénétration de la lumière ou à décrire la structure forestière (tableau 1).

Tableau 1: *Description des variables lidar avec zi la hauteur avec zi, la hauteur des points lidar, n, le nombre total de points lidar sur le voisinage considéré et N, le nombre total de cellules de 1 m² du modèle numérique de surface (DSM) et du modèle numérique de terrain (DTM) dans ce même voisinage.*

Variable Lidar	Description
CH_{max}	Hauteur maximale de la canopée: $CH_{max} = max(z_i)$ avec z_i hauteur des points lidar sur le voisinage considéré
CH_{median}	Hauteur médiane de la végétation : $CH_{median} = median(z_i)$
CH_{mean}	Hauteur moyenne de la végétation: $CH_{mean} = \frac{1}{n}\sum_1^n z_i$
σ^2_{CH}	Variance des hauteurs de la vegetation : $\sigma^2_{CH} = \frac{1}{n}\sum_1^n (z_i - CH_{mean})^2$
Gini	Gini coefficient: $Gini = \frac{2\sum_1^n i z_i}{n\sum_1^n z_i} - \frac{n+1}{n}$ (Lexerød & Eid, 2006)
Cv_{LAD}	Coefficient de variation du profil vertical de densité foliaire (Bouvier et al., 2015). Le profil a été obtenu en calculant un profil de transmittance et en utilisant la loi de Beer-Lambert .
Gap_{max}	Taille de la plus grande trouée (végétation <=2 m)
C_f	Taux de couvert (végétation >=2 m) $C_f = \frac{N_{(DSM-DTM)>1m}}{N}$
C_r	Taux de pénétration de la lumière : $C_r = \frac{n_{z>2m}}{n}$ (Hopkinson and Chasmer, 2009)
VOL_{can}	Volume total de la canopée : $Vol_{can} = \sum_1^N (DSM - DTM)$ (Véga et al., Submitted)

Les données lidar ne couvrant pas la totalité des sites d'étude, une approche en deux étapes a dû être adoptée pour construire ces modèles. La première étape a consisté à calibrer les modèles pour définir les paramètres des variables environnementales abiotiques en utilisant l'ensemble des relevés terrain disponibles sur chaque zone d'étude et en prenant le taux de couvert relevé sur le terrain comme variable biotique décrivant la structure forestière. La seconde étape visait à étudier l'apport des variables lidar pour expliquer la biodiversité locale. Chacune des variables lidar calculées a été testée individuellement, en remplacement de la variable de structure mesurée sur le terrain, afin d'estimer la magnitude et la direction du lien entre chaque indicateur de biodiversité et cette variable.

Afin d'analyser l'apport des variables lidar dans les modèles bayésiens développés deux approches statistique ont été utilisées. La première consiste à calculer une version modifiée du critère d'information de la déviance (DIC) (Celeux et al., 2006). Le DIC permet de comparer les modèles dans un souci de parcimonie, c'est-à-dire en prenant en compte le fait que l'ajout d'un paramètre statistique dans un modèle améliore forcément l'adéquation du modèle aux données modélisées. Sur des modèles simples, utiliser les DIC à des fins de comparaison entre modèles donne des informations proches de la notion de significativité statistique. Cette approche ne permet ainsi pas de démêler les effets « forts » des effets « faibles » et n'indique pas la direction des effets.
En plus de cette analyse de la significativité statistique nous avons donc aussi estimé la magnitude et la direction des effets des variables Lidar sur les variables de biodiversité en suivant une méthodologie proche de celle employée dans des travaux antérieurs d'EFNO (Barbier et al., 2009 ; Zilliox and Gosselin, 2014). Les effets sur les valeurs de la moyenne de l'indicateur de biodiversité de chaque paramètre β, associé à la variable lidar étudiée, ont été analysés en étudiant l'effet d'une augmentation d'un écart-type (σ) de cette variable lidar sur la moyenne de la distribution résultante de l'indicateur de biodiversité. L'effet de l'augmentation de la variable lidar a d'abord été évalué en calculant la valeur p du test d'hypothèse d'égalité des moyennes de l'indicateur de biodiversité avant et après augmentation de cette variable lidar. Le test permet de déterminer si le ratio entre les deux moyennes, directement relié au produit β*σ en raison de la forme des modèles, est significativement différent de 1.

Par ailleurs un test d'équivalence a été utilisé pour identifier les cas pour lesquels l'effet lié à l'augmentation de la variable lidar sur le logarithme (pour la richesse spécifique) ou le logit (pour l'abondance) de la moyenne de l'indicateur de biodiversité avait une probabilité empirique supérieure à 0,95 d'être dans l'intervalle qualifié d'intervalle négligeable. Ainsi on peut distinguer d'une part les effets fortement négligeables, respectivement négligeables, lorsque 95 % des valeurs $\beta*\sigma$ sont situées dans un intervalle $[-b_1 ; +b_1]$, respectivement $[-b_2 ; +b_2]$, avec $b_2>b_1$ et d'autre part les effets négatifs faibles et forts lorsque $\beta*\sigma$ a une probabilité de 95% d'être $<-b_1$, respectivement $<- b_2$, et les effets positifs faibles et forts lorsque $\beta*\sigma$ a une probabilité de 95% d'être $>b_1$, respectivement $>b_2$. Les valeurs de b_1 et b_2 sont différentes pour l'analyse des effets sur les indicateurs d'abondance et sur les richesses spécifiques et ont été fixées en s'appuyant sur des études antérieures menées par l'équipe EFNO.

Le traitement des données et les analyses statistiques ont été faits à l'aide du logiciel R (http://www.r-project.org/). Le système d'information géographique ArcGIS (http://www.esrifrance.fr/) a aussi été utilisé pour l'affichage et la mise en forme de certaines données spatiales.

C.3 RESULTATS OBTENUS

Pour chaque site 440 modèles ont ainsi été construits, 320 pour les abondances des 8 espèces les plus représentées et 120 pour les richesses spécifiques des 3 groupes écologiques étudiés.
Pour chaque modèle les informations suivantes sont disponibles :

- La différence (ΔDIC) entre les DIC du modèle avec la variable lidar étudiée et du modèle sans variable lidar, qui sert ici de référence. Plus le ΔDIC est faible plus on peut considérer que la variable lidar a amélioré le modèle.
- Le niveau de significativité lors du test de la différence entre moyennes des distributions des indicateurs de biodiversité pour mesurer l'impact de la modification du paramètre de la variable lidar. La différence est jugée hautement significative (**), significative (*) ou non significative.
- L'analyse de la distribution de l'indicateur de biodiversité après modification du paramètre de la variable lidar qui conduit à la typologie des effets de la variable lidar suivante:
    - Effet significatif : faible, négatif fort, positif fort, pas d'information sur la magnitude
    - Effet non-significatif : faible, pas d'information sur la magnitude

C.4 EXPLOITATION DES RESULTATS

En raison du grand nombre de modèles obtenus et des différents critères d'analyse et de comparaison des modèles disponibles plusieurs approches ont été développées pour guider l'interprétation des résultats. L'analyse n'est pas complètement achevée (article en cours de rédaction) mais les principaux résultats sont rapportés ci-dessous.

1- Apport des variables de structure Lidar pour modéliser l'abondance et la richesse floristique (Tableau 2, Figure 1):

Sur le site de Bure on ne peut pas conclure à une amélioration des modèles d'abondance par l'intégration d'une variable de structure lidar. Trop de modèles sont classés dans une catégorie « pas d'information » (76 %) pour pouvoir interpréter ces résultats. Cela indique un bruit important au niveau des effets de la variable lidar, bruit probablement lié au nombre de placettes insuffisant pour ce site pour étudier les indicateurs choisis ou à une variabilité insuffisante de certaines variables de structure ou des niveaux d'abondance sur ce site relativement homogène (en cours d'étude). En revanche les

résultats montrent qu'un nombre élevé de modèles (81 %) indiquent des effets faibles des variables Lidar pour la richesse spécifique des 3 groupes écologiques étudiés permettant d'indiquer que, sur ce site, la richesse spécifique n'est globalement pas sensible aux paramètres de structure lidar testés.
Sur les Vosges les résultats expriment, au contraire, l'intérêt d'utiliser des variables de structure lidar dans les modèles. 25 % des modèles pour les 8 indicateurs d'abondance, respectivement 28 %, pour les 3 indicateurs de richesse spécifique, indiquent une relation significative des indicateurs aux variables lidar, dont 7% et 4% respectivement impliquent des relations fortes.

Table 2: *Le nombre de modèles par catégorie d'effet de la variable lidar sur le modèle. Le paramètre associé à la variable lidar peut-être significativement ou non significativement différent de 0 et donner lieu à un effet négligeable (=faible) ou non-négligeable (=fort) de direction positive ou négative. Dans certains cas le nombre de données est insuffisant pour avoir une conclusion fiable sur la magnitude de l'effet (pas d'information claire sur le fait que l'effet soit faible ou fort).*

Effet de la variable lidar		Site de l'ANDRA		Site des Vosges	
		Abondance	Richesse	Abondance	Richesse
Significatif	Faible	0	0	0	5 *(4.2%)*
	Négatif fort	3 *(0.9%)*	0	0	4 *(3.3 %)*
	Positif fort	0	0	22 *(6.9 %)*	1 *(0.8 %)*
	Pas d' information	19 *(5,9 %)*	14 *(11.7%)*	59 *(18.4%)*	29 *(24.2%)*
Non-significatif	Faible	75 *(23,4%)*	97 *(80.8%)*	135 *(42.2%)*	55 *(45.8 %)*
	Pas d' information	223 *(69,7%)*	9 *(7.5 %)*	104 *(32.5%)*	26 *(21.7%)*
Total		320	120	320	120

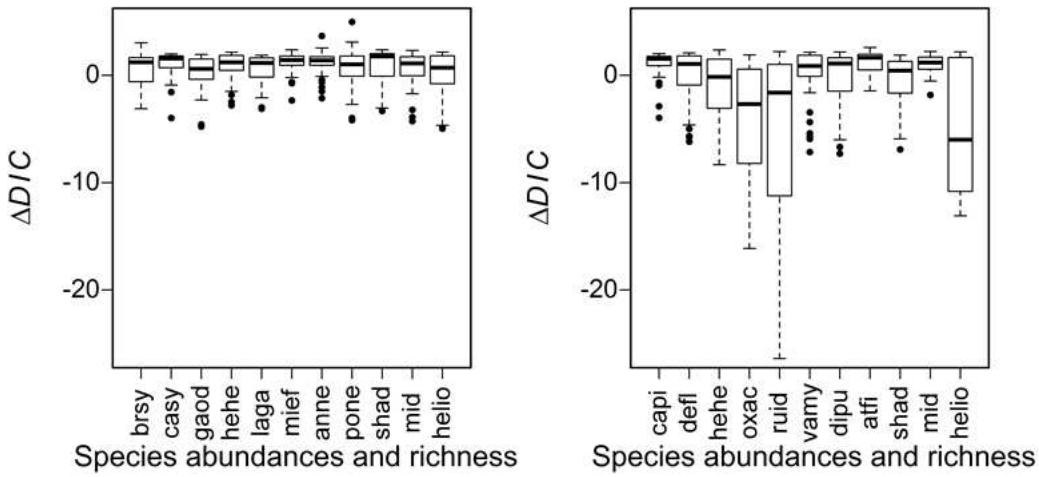

Figure1 : *Distribution des ΔDIC pour les 40 modèles obtenus pour chaque indicateur de biodiversité, abondance des espèces les plus représentées et richesse spécifique, sur le site de l'OPE (à gauche) et sur les Vosges (à droite). Les distributions sont présentées sous forme de boîtes à moustaches : la ligne horizontale représente la médiane, la boîte est délimitée par les 25^{ième} et 75^{ième} percentiles, les moustaches par les 5ème et 95^{ième} et les outliers sont représentés par des points.*

2- Influence de la distance

Le nombre de modèles pour lesquels l'effet de la variable lidar est significatif augmente avec la taille de voisinage pour les deux sites jusqu'à un voisinage de 100m. Ce nombre continue d'augmenter sur les Vosges alors que sur Bure il diminue à nouveau lorsque la structure est analysée sur un cercle de 200m autour des relevés de biodiversité.
Dans les Vosges, on observe aussi un nombre maximum de modèles ayant un paramètre lidar significativement différent de 0 et pour un voisinage d'un rayon de 100 m. Sur Bure

les 3 modèles classés « significatif/négatif » correspondent à des variables lidar calculées sur un voisinage de 50 m pour deux modèles et 100 m pour un des modèles.
En considérant les 2 sites, seuls 5 modèles sur les 25 avec des effets de la variable lidar forts et positifs ou négatifs (soit 20%) correspondent à des variables lidar calculées sur 15 m. Ce rayon est le rayon maximal généralement utilisé pour des relevés dendrométriques sur le terrain. L'analyse de la structure sur des placettes de 15 m sur lesquelles la biodiversité est observée ne suffit pas dans la majorité des cas pour expliquer cette biodiversité locale.

3- Analyse de l'impact de la structure sur les indicateurs sensibles à une variable lidar

En analysant plus en détail les résultats des modèles ayant un paramètre lidar montrant un effet fort sur la variable de biodiversité on s'aperçoit que, sur Bure, seules les abondances de 2 espèces, l'une de type héliophile et l'autre d'héliophilie intermédiaire, sont sensibles aux paramètres de structure lidar. L'abondance du brachypode des bois (*Brachypodium sylvaticum*) et celle du pâturin des bois (*Poa nemoralis*), espèce d'héliophilie intermédiaire pour la première et héliophile pour la seconde, diminuent avec une augmentation de la hauteur maximale du couvert sur un voisinage de 50 m pour le premier et 50 m et 100 m pour le second. L'amélioration du modèle de prédiction des abondances de ces espèces apportée par l'introduction de ces variables lidar dans le modèle reste cependant très faible (ΔDIC de 1.62, 1.75 et 1.77 respectivement).

Dans les Vosges, seules les abondances de 3 espèces appartenant à la classe des plantes intermédiaires et la richesse spécifique des groupes de plantes héliophiles et sciaphiles montrent des relations fortes à des paramètres de structure lidar.
En dehors de l'abondance du Framboisier (*Rubus idaeus*) qui semble directement influencée positivement par la présence de trouées dans un voisinage de 15 m à 100 m, l'interprétation du lien entre la structure et l'abondance de l'Oseille des bois (*Oxalis acetosella*) et de la Myrtille (*Vaccinium myrtillus*) est plus difficile. Pour les deux, l'abondance augmente lorsque des indicateurs de hauteur du peuplement ou de volume de la canopée augmentent, surtout dans un voisinage de 100 m à 200 m. Pour l'abondance d'autres espèces, le meilleur modèle implique aussi des variables de hauteur (la digitale – *Digitalis purpurea* ; *Carex pilulifera* ; le lierre *Hedera helix*). Les effets sont observés à des échelles variables – 15m pour le carex, ; plutôt 100 à 200m pour le lierre ; entre 15 et 100m pour la digitale. Ces relations impliquent aussi des variables de hauteur différentes : assez rarement la hauteur maximale – sauf pour la myrtille – plutôt des hauteurs moyennes ou médianes.
La richesse spécifique des groupes héliophile et sciaphile semble quant à elle répondre de façon assez directe à la présence de lumière. Pour les plantes sciaphiles, la richesse spécifique diminue avec la taille de la plus grande trouée, mesurée sur un voisinage de 100 ou 200m. Cela pourrait indiquer qu'une partie des espèces sciaphiles évitent non seulement les trouées mais aussi le voisinage des grandes trouées, montrant ainsi un comportement d'espèce d'intérieur forestier déjà rapporté pour d'autres organismes (oiseaux par exemple). La richesse des plantes héliophiles augmente avec le taux de pénétration du signal lidar, que l'on peut assimiler à un taux de pénétration de la lumière, et diminue avec l'augmentation de la hauteur médiane des points lidar ou du volume de la canopée. Un accès à plus de lumière même diffuse au travers de micro-trouées semble suffisant pour favoriser la richesse spécifique de ce groupe.

C.5 DISCUSSION

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt, pour améliorer les modèles de biodiversité, de mesurer la structure forestière sur un voisinage plus étendu que celui traditionnellement adopté pour des mesures de terrain. Ainsi, les mesures de structure par télédétection lidar se révèlent particulièrement intéressantes pour progresser dans la modélisation des indicateurs de biodiversité.

Comme déjà observé dans des études précédentes, la sensibilité des indicateurs de biodiversité floristique aux paramètres de structure s'est révélée variable selon les sites d'étude. Il est souhaitable de comprendre comment cette variation s'explique. Une possibilité est que l'effet des variables de structure varie en fonction des conditions stationnelles (Zilliox and Gosselin, 2014). Pour tester cette hypothèse il nous faudrait beaucoup plus de données Lidar, mieux réparties dans l'espace, données que nous n'avons pas à l'heure actuelle. Il faudrait alors soit envisager des interactions entre les effets des variables structurelles et les conditions stationnelles soit modéliser explicitement l'impact des variables structurelles sur les axes de la niche.
Il est aussi intéressant de noter la différence entre les comportements individuels des espèces les plus représentées et les comportements du groupe écologique auxquelles elles appartiennent. Les groupes héliophiles et sciaphiles semblent répondre de façon assez directe au niveau de lumière, avec cependant un effet d'impact à distance des trouées pour la richesse du groupe des plantes sciaphiles. Le lien entre l'abondance de chaque espèce et la structure du couvert, lorsqu'il a pu être mis en évidence, est beaucoup plus complexe à expliquer. Il implique néanmoins assez souvent des variables de hauteur, à différentes échelles. Ces résultats, s'ils ne démontrent pas un effet généralisé des variables Lidar sur l'ensemble de la flore, indiquent néanmoins assez clairement son intérêt, essentiellement en tant que méthode intéressante en termes de rigueur/coût pour accéder à des variables à large échelle (exemple : surface de trouée maximale dans un rayon de 200m) et pour accéder à des données de hauteur fiables et de différents types, qui semblent ressortir comme une des variables intéressantes pour expliquer les variations d'une partie de la biodiversité floristique.
Enfin, il est possible que, dans certains cas, une dimension temporelle non négligeable soit aussi en jeu, rendant difficile l'interprétation directe entre paramètres de structure ou accès à la lumière et abondance.

C.6 REFERENCES

- Barbier, S., Chevalier, R., Loussot, P., Bergès, L., and Gosselin, F. (2009). Improving biodiversity indicators of sustainable forest management: Tree genus abundance rather than tree genus richness and dominance for understory vegetation in French lowland oak hornbeam forests. For. Ecol. Manag. 258, S176–S186.
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., and Renaud, J.-P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. Remote Sens. Environ. 156, 322–334.
- Celeux, G., Forbes, F., Robert, C.P., and Titterington, D.M. (2006). Deviance information criteria for missing data models. Bayesian Anal. 1, 651–673.
- Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., and Werner, W. and Paulißen D. (1992). Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2nd ed. (Indicator values of plants in central Europe.) (Scripta geobotanica; 18). Gottingen: Erich Goltze KG 258p.
- Julve, P. (1998). Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Version 2013. Catminat.
- Herpigny, B., and Gosselin, F. (2015). Analyzing plant cover class data quantitatively: Customized zero-inflated cumulative beta distributions show promising results. Ecol. Inform. 26, Part 3, 18–26.
- Hopkinson, C., and Chasmer, L. (2009). Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. Remote Sens. Environ. 113, 275–288.
- Lexerød, N.L., and Eid, T. (2006). An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning. Forest Ecology and Management 222.1 (2006): 17-28.
- Vega, C., Renaud, J.-P., Durrieu, S., Bouvier, M., and Saint-André, L. (Submitted). On the interest of penetration and volume metrics to improve lidar-based models of forest parameters. Remote Sens. Environ.

- Zilliox, C., and Gosselin, F. (2014). Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space. For. Ecol. Manag. 321, 105–116

D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, …)	Responsable	Commentaires
13/04/2013	L1	Etat d'avancement du projet BIOLID - AO INDECO 2012	Rapport	UMR TETIS / UR EFNO	Rapport interne Irstea
23/10/2013	L2	Le projet BIOLID : Etude du lien entre structure 3D de la végétation forestière mesurée par lidar et biodiversité	Diaporama- Compte rendu premières analyses	UMR TETIS / UR EFNO	
19/02/2015	L3	Rapport final du projet BIOLID - AO INDECO 2012	Rapport	UMR TETIS/ UR EFNO	Rapport interne Irstea
19/02/2015	L4	Rapport final du projet BIOLID - AO INDECO 2012 – ANR-Carnot	Modèles	UMR TETIS/ UR EFNO	
Courant 2015	L5	Présentation finale du projet séminaire interne Irstea	Diaporama	UMR TETIS/ UR EFNO	

Remarque : les données n'ont pas été mentionnées dans la liste des livrables car elles ont été mises à disposition par d'autres organismes et ne sont pas propriété d'Irstea : les relevés de biodiversité sur le site de l'OPE de l'ANDRA ont été mis à disposition AgroParisTech et INRA, ceux du site des Vosges par l'IGN et les données Lidar ont été mises à dispositions par le consortium du projet ANR FORESEE.

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications
International	**Revues à comité de lecture**	1
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0
	Communications (conférence)	2
France	**Revues à comité de lecture**	0
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	0
	Communications (conférence)	0
Actions de diffusion	**Articles vulgarisation**	0
	Conférences vulgarisation	0
	Autres	1

Autres valorisations scientifiques (à détailler en** Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	0
Brevet internationaux en cours d'obtention	0
Brevets nationaux obtenus	0
Brevet nationaux en cours d'obtention	0
Licences d'exploitation (obtention / cession)	0
Créations d'entreprises ou essaimage	0
Nouveaux projets collaboratifs	0
Nouveaux projets contractuels	0
Colloques scientifiques	0
Autres (préciser)	0

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Publication :

- Bouvier, M., Durrieu, S., Gosselin, F., Herpigny, B., Using lidar to improve floristic biodiversity monitoring in forest ecosystems, à soumettre pour le 28/02/2015 à Remote Sensing of Environment (retenue pour le N° spécial RSE suite à ForestSat 2014)

Conférences internationales :

- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R., Gosselin, F., Monnet, J-M., Morin, N., Debise, H. and Renaud, J.-P. (2013). Observation des forêts en 3D. Utilisation de données Lidar pour l'estimation de la ressource forestière et d'indicateurs de biodiversité. Géomatique 2013, 3-4 oct. 2013, Montréal, Canada
- Bouvier, M., Herpigny, B., Durrieu, S., Gosselin, F., Fournier, R. and Grau, E. (2014). The potential of LiDAR for forest structure assessment in biodiversity monitoring. ForestSat 2014, 4-7 Nov. 2014, Riva del Garda, Italy.

Conférences/ateliers nationaux :

- Bouvier, M., Herpigny, B., Durrieu, S., Gosselin, F., 2013, BIOLID, Etude du lien entre structure 3D de la végétation forestière mesurée par lidar et biodiversité, Séminaire INDECO 2013, 23 oct. 2013, Paris

E.3 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Organisme ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien à l'institut Carnot (7)	Valorisation expérience (8)
Bouvier Marc	H	Marc.bouvier@teledetection.fr	20/02/15	Master Interaction Climat Environnement-UVSQ	France	10 mois IE Irstea	Irstea-UMR TETIS	Doctorant	10 mois	02/2015	CDD	EPST	Ingénieur	Oui	Oui
Herpigny Basile	H	bherpigny@gmail.com	20/02/15	Doctorat en Sciences à l'Université libre de Bruxelles	Belgique (UE)	Thèse	Irstea, EFNO, Domaine des Barres	Post-doc	1,5 mois	02/2015	Pas connu à ce stade				

Aide pour le remplissage

(1) Adresse email : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
(2) Poste dans le projet : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
(3) Durée missions : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
(4) Devenir professionnel : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
(5) Type d'employeur : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) Type d'emploi : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
(7) Lien à l'institut Carnot : préciser si l'employeur est ou non un partenaire de l'institut Carnot
(8) Valorisation expérience : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact).