Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant

Paulina Pinto

▶ **To cite this version:**

Paulina Pinto. Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant : Rapport final convention de recherche/développement ONF-INRA N°12000381. [Rapport de recherche] Institut National de la Recherche (INRA), Nancy; Office National des Forêts (ONF), Nancy, Pôle R&D. 2016. hal-01402494

HAL Id: hal-01402494
https://hal.science/hal-01402494

Submitted on 29 Nov 2016

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.

Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant

Rapport final convention de recherche/développement
ONF-INRA N° 12000381

Paulina E. Pinto

Citation recommandée :
Pinto, P.E. 2016. Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant. Rapport final convention de recherche/développement ONF-INRA N°12000381. Nancy : ONF, INRA, 135p.

Comité de pilotage

Vincent BADEAU, IR1 INRA
Laurent BERGES, CR IRSTEA
Jean-Luc DUPOUEY, DR INRA
Jean-Claude GEGOUT, Pr. AgroParisTech
Jean-Christophe HERVE, Directeur LIF- IGN
Myriam LEGAY, Chef du Département RDI de l'ONF
Jean LADIER, CR ONF
Olivier PICARD, Directeur IDF-CNPF et du RMT Aforce
Christian PIEDALLU, IR AgroParisTech
Quentin PONETTE, Pr. Université de Louvain, Belgique

Remerciements et contributions

Ce projet a été soutenu par l'INRA (Département Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques, EFPA), l'Office National des Forêt et a bénéficié de l'appui du LabEx ARBRE (ANR-12-LABXARBRE-01). Il a été porté par l'Unité Ecologie et Ecophysiologie Forestières (EEF, UMR INRA-UL 1137), le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB, UMR INRA-AgroParisTech 1092) et le Département RDI de l'ONF.

Rédacteurs Proposition Projet Interface : Vincent Badeau (EEF-INRA), Jean-Claude Gégout (LERFOB-AgroParisTech) et Myriam Legay (RDI-ONF) (Rédacteurs) ; Meriem Fournier (Directrice LERFOB, AgroParisTech) et André Granier (Directeur EEF-INRA) (Responsables Scientifiques).

Membres du Comité de Pilotage : Vincent Badeau (EEF), Laurent Bergès (IRSTEA), Jean-Luc Dupouey (EEF-INRA), Jean-Claude Gégout (LERFOB), Jean-Christophe Hervé, (IGN), Myriam Legay (RDI-ONF), Jean Ladier (ONF), Olivier Picard (IDF-CNPF), Christian Piedallu (LERFOB), Quentin Ponette (Université de Louvain).

Fournisseurs de données et modèles : Vincent Badeau (EEF, modèles de distribution NBB) ; Jean-Daniel Bontemps et Pierre Mérian (LERFOB, modèles de distributions, Projet ANR ORACLE) ; Jean-Claude Gégout (LERFOB, Valeurs Indicatrices EcoPlant ; chimie du sol sur jeu de données national) ; Gersande Gérard (ONF, données flore massifs forestiers en Argonne) ; Christian Piedallu (LERFOB, modèles de distribution LERFOB-bio ; données climatiques spatialisées) ; Ingrid Seynave (LERFOB, modèles d'Indice de Fertilité) ; Stéphanie Wurpillot (IGN, jeu de données national avec flore chronométrée).

Participants à l'acquisition de données : Patrick Behr, Pierre Montpied (EEF-INRA), Sébastien Daviller (LERFOB-INRA), Fabien Spicher, David Thiebaut (LERFOB-AgroParisTech).

Participants à la préparation de formations : Emeric Dioudonat, Milène Gentils (ONF-Agence de Versailles), Myriam Legay, Noémie Pousse (RDI-ONF), Bernard Jabiol, François Lebourgeois, Vincent Pérez (LERFOB).

Rédacteurs : Mentionnés dans chacune des trois parties de ce document.

Participants aux projets déposés : *Projet OBUP* : J-C. Gégout; Ch. Piedallu ; J-C. Pierrat (LERFOB) ; I. Seynave (GisCoop) ; J-L. Dupouey, P. Montpied (EEF), M. Legay, C. Richter, V. Boulanger (ONF), S. Cavaignac (FCBA), E. Paillassa, P. Gonin (IDF), Y. Dumas, S. Perret (IRSTEA). *Projet ForManClim* dans les versions 2015 et 2016: G. Gérard (ONF Agence Verdun), M. Gentils (ONF Agence Versailles), M. Legay, N. Pousse (ONF RDI), Q. Ponette (Université de Louvain), J-C. Gégout, E. Lacombe, Ch. Piedallu (LERFOB), V. Badeau (EEF).

Je remercie également les enseignants, chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs des **Laboratoires EEF** et **LERFOB** qui ont accueilli ce Projet Interface au sein de leurs unités. Aux ingénieurs, techniciens, aménagistes et chargés de sylviculture de l'**Office National des Forêt** qui ont participé à cette mission lors des séminaires, entretiens ou formations.

Que soient chaleureusement remerciées toutes les personnes, qui ont rendu possible les résultats atteints lors de ce Projet Interface.

Avant-propos

Ce rapport du Projet Interface ONF-INRA « **Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant** » est structuré en trois parties qui synthétisent les travaux relatifs aux trois principales thématiques abordées dans le cadre de ce projet :

Partie 1 : Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique

Partie 2 : Choix des essences dans un contexte de changement climatique : les modèles de distribution comme un outil d'aide à la décision forestière.

Partie 3 : Utilisation intégrée des nouveaux outils à l'échelle de la gestion d'une forêt dans un contexte de changement climatique.

Ce document a été conçu de manière à permettre différents niveaux de lecture :

(i) Une **lecture rapide** avec un **résumé exécutif** (p.7) et une synthèse des principales **réalisations et productions** (p. 35-38).

(ii) Une **lecture thématique** par chapitre qui synthétise l'état de l'art et les principaux résultats obtenus pour chacun des trois thèmes abordés dans ce projet. Chacune de ces trois parties pouvant être lue de façon indépendante (Partie 1, p.11-17 ; Partie 2, p.19-28 ; Partie 3, p.29-31).

(iii) Une **lecture complète et détaillée** de chaque thème et des annexes associées qui développent les réalisations scientifiques et les actions de transfert effectuées pour les trois thèmes abordés dans ce projet.

Sommaire

Remerciements 3

Avant-propos 4

Résumé exécutif 7

Introduction 9

Partie 1 : Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique 11

1.1 La bioindication, état de l'art 11

1.2 Les nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle basé sur la bioindication des plantes 14

Partie 2 : Choix des essences dans un contexte de changement climatique : les modèles de distribution comme un outil d'aide à la décision forestière 19

2.1 Choix des essences et changement climatique, état de l'art 19

2.2 Modèles de distribution comme outils pour le choix des essences 21

Partie 3 : Utilisation intégrée des nouveaux outils à l'échelle de la gestion d'une forêt dans un contexte de changement climatique 29

Conclusions et perspectives 33

Réalisations et productions 35

5.1 Données acquises dans le cadre du projet Interface ONF-INRA 35

5.2 Projets réalisés et encadrement d'étudiants 36

5.3 Diffusion des résultats du projet d'interface au monde de la recherche 36

5.4 Diffusion des résultats du projet d'interface au monde de la gestion 37

5.5 Contenu du CD communiqué 39

Table 3 : Description des fichiers communiqués 39

Bibliographie 41

Annexe 1. Diffusion des résultats au monde de la recherche 45

1.1 Pinto P.E., Dupouey J-L., Hervé J.Ch., Legay M., Wurpillot S., Montpied P., Gégout J.C. "Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species", *Ecological Indicators (sous presse)*..... 47

1.2 Pinto P., Dupouey J.L, Gégout J.C., Hervé JCh., Legay M., "Optimizing floristic survey for plant bioindication of forest characteristics", In Proceeding of the 58th Annual symposium of the IAVS. Understanding broad-scale vegetation patterns. p298. Brno, Czech Republic, 19-24/07/2015 (Résumé, support lightning talk, Poster)..... 59

Annexe 2. Seminaire pour diffusion des résultats au monde professionnel 65

Pinto P. (2015) Séminaire Labex ARBRE « Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique » Restitution du Projet Interface ONF-INRA «Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant ». Nancy, France, 23/06/2015.

2.1 Programme..... 67

2.2 Session 1 "Développement de nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle"..... 69

2.3 Session 2 "Les modèles de distribution comme outils pour le choix des essences"..... 81

2.4 Session 3 "Nouveau outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique : Application à l'échelle locale" 101

Annexe 3 : Exemple de formations réalisées pour l'ONF 117

« Adaptation des essences aux évolutions climatiques: Questions posées par les gestionnaires en forêt domaniale de Marly ». Formation demandée par l'agence ONF de Versailles pour le service forêt (1 Responsable de service, 2 aménagistes, 2 animateurs sylvicoles, le Directeur d'agence, et 1 personne de chacune des 5 Unité Territoriales). 1 journée de cours en salle et sortie terrain.

3.1 Rapport d'évaluation de la formation (Milène Gentils, Responsable du service forêt de l'Agence interdépartementale ONF de Versailles)..... 119

3.2 Programme de la formation..... 121

3.3 Synthèse de la sortie terrain en Forêt de Marly..... 123

3.4 Description sur fosses pédologiques en Forêts Domaniales de Marly et Saint-Germain (Auteur : Noémie Pousse, RDI-ONF)..... 125

3.5 Fiche terrain utilisé pour l'inventaire de la flore (avec VI EcoPlant)..... 135

Résumé exécutif

Le Projet d'Interface « Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant » a été mené par l'Unité Ecologie et Ecophysiologie Forestières (EEF, UMR INRA-UL 1137), le Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB, UMR INRA-AgroParisTech 1092) et le Département RDI de l'ONF. L'objectif général de ce projet a été de **développer une nouvelle génération d'outils pour le choix des essences et l'évaluation de la production des forêts**. Trois objectifs spécifiques ont été abordés :

(i) Adapter les nouveaux outils basés sur la bioindication pour une utilisation efficace sur le terrain à l'échelle de l'aménagement forestier ;
(ii) Evaluer les modèles de distribution et de productivité de plusieurs essences forestières importantes à des échelles nationales, régionales et locales ;
(iii) Tester, évaluer et adapter l'application à l'échelle du massif forestier des modèles de distribution actuels et futurs et des modèles de productivité des essences calibrés à l'échelle nationale.

Dans un objectif d'optimiser les méthodes de bio-indication pour la caractérisation stationnelle, 309 et 166 placettes acquises aux échelles nationales et locales respectivement ont été utilisées qui couplaient des inventaires floristiques chronométrés et des données d'acidité et de nutrition minérale issues d'analyses de sol réalisées en laboratoire. Nous avons confronté les résultats obtenus par bio-indication, en sélectionnant un temps d'acquisition croissant des données floristiques, avec les mesures de laboratoire. A chaque pas de temps, la performance de la bioindication a été évaluée par la racine de l'erreur quadratique moyenne et le R^2 de la régression linéaire entre valeurs bio-indiquées et mesurées. Pour répondre au second objectif spécifique relatif à l'évaluation des modèles de distribution, trois différents types de modèles corrélatifs de distribution, provenant des laboratoires participant au projet d'interface, ont été comparés pour six des essences majeures de la forêt française (*Fagus sylvatica, Quercus robur, Quercus petraea, Pinus sylvestris, Quercus pubecent, Quercus ilex)*. La capacité prédictive de ces modèles a été déterminée avec un jeu de données indépendant issu des campagnes 2012-2013 de l'IGN à la résolution de la placette de 700 m2 (n=13.098) et à la résolution de 8x8 km (n=6.054). Ce travail a été réalisé aux échelles spatiales de la France entière, des sylvoecorégions et de l'aire de distribution des essences. Dans un dernier temps, les méthodes optimisées de bio-indication et les modèles de distribution et de croissance calibrés à l'échelle nationale ont été appliqués au niveau de deux forêts. Pour ce faire, un dispositif de 115 placettes a été établi dans les forêts du massif Vosgien de Rupt-sur-Moselle et de la Forêt Domaniale de Gérardmer sur une maille systématique de 200m et 250m.

Nos résultats montrent que lorsque l'objectif est d'estimer les ressources nutritionnelles du sol par bio-indication par les plantes, il est possible de réduire considérablement le temps consacré à l'inventaire floristique et donc son coût : 10-15 minutes sont nécessaires pour une bioindication optimale au lieu de 28 minutes en moyenne lorsqu'un relevé floristique complet

est utilisé. Une précision de 80% de la précision maximale a été obtenue après 4-5 minutes d'inventaire (6-12 espèces inventoriées) et cela pour les trois variables étudiées (pH, S/T, C/N). Ces résultats sont indépendants du niveau nutritionnel du sol et sont semblables aux échelles nationale et locale. Ils pourraient permettre une utilisation renouvelée des méthodes de bioindication en vue d'aider à la prise de décision dans la gestion forestière.

Par rapport à l'évaluation des modèles de distribution, nous avons déterminé que la taille de l'aire de distribution des essences, à l'échelle de la France, explique une bonne part de la qualité des modèles : on arrive à bien prédire la distribution des essences localisées et moins bien celle des essences disséminées (e.g. *P. sylvestre*). Les différents modèles, dans un scénario climatique actuel, conduisent à des distributions très cohérentes entre elles et proches de la distribution actuelle des essences. Les modèles qui intègrent des variables de sol précises (obtenues par bio-indication) sont un peu plus performants à l'échelle de la France, mais contrairement à ce qui était attendu, ils ne s'avèrent pas beaucoup plus performants à l'échelle de l'aire de distribution des espèces. Par opposition aux résultats obtenus avec le climat actuel, les projections de distribution pour le climat futur conduisent à des divergences marquées entre modèles pour certaines essences. Les différences de distributions prédites entre modèles pour ces essences limitent leur utilisation comme outil d'aide à la décision dans un niveau opérationnel. Par contre elles permettent d'établir de façon formalisée des cartes d'incertitude reposant en chaque point du territoire sur les niveaux de convergence/divergence entre types de modèles et entre périodes présente et future. Ces cartes, outre l'aide qu'elles peuvent apporter aux gestionnaires locaux, présentent une grande utilité à des niveaux décisionnels stratégiques. La compréhension des facteurs responsables des divergences d'aire de répartition future associés aux différents modèles soulèvent de nouvelles questions qui permettront d'avancer dans la connaissance sur l'autoécologie des essences.

Ce projet d'Interface entre l'ONF et l'INRA a permis d'appliquer à l'échelle locale les avancées scientifiques récentes pour développer et transmettre aux gestionnaires les nouvelles approches de caractérisation et de cartographie des paramètres du milieu et de quantification des possibilités actuelles et futures de présence et de croissance des principales essences françaises. L'application locale de ces nouvelles techniques sur plusieurs massifs forestiers a montré que les modèles de bioindication, de distribution et de productivité des essences développés à l'échelle de la France étaient assez fins pour discriminer les différentes conditions stationnelles et potentialités des essences à l'échelle de la parcelle. Ces résultats très prometteurs devraient permettre le déploiement, en collaboration étroite avec l'ONF, de certains des résultats de ce Projet Interface. Plus que des résultats spécifiques de chacune des essences étudiées, ce projet Interface propose une démarche formalisée et fondée sur les avancées scientifiques récentes de caractérisation stationnelle et de prédiction des potentialités de présence et de productivité des essences de l'échelle locale à l'échelle nationale. Les avancées futures pourront ainsi être facilement intégrées à cette démarche qui cherche à répondre de manière flexible et évolutive aux questions sur l'adaptation des essences aux changements environnementaux.

Introduction

Les forêts françaises ont subi des effets significatifs liés au changement climatique. Certains, comme l'augmentation de productivité (Badeau et al., 2010 ; Bontemps et al,. 2009), se sont avérés bénéfiques et d'autres comme l'augmentation de l'intensité de dépérissements (Bréda, 2010) risquent de causer des dommages importants. Malgré ces évidences**, le choix des essences** par le gestionnaire forestier repose encore avant tout sur l'analyse des espèces en place, de leurs performances, et des accidents éventuels du passé. Or ces références se trouvent invalidées par les changements globaux et les outils traditionnels (catalogues de station et guides de sylviculture) ne sont plus adaptés aux besoins des gestionnaires pour définir les essences à favoriser sur les parcelles lors de l'aménagement forestier.

Depuis plus de 10 ans les Laboratoires de l'INRA Ecologie et Ecophysiologie Forestière (EEF) et d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFOB) travaillent sur le comportement des essences en lien avec le milieu et ses évolutions. Des approches formalisées d'évaluation du climat par des modèles climatiques spatialisés (Piedallu & Gégout, 2007; Piedallu et al 2011 ; Lebon E. & Badeau V., 2010) et d'évaluation des conditions de sols par bioindication avec la flore forestière (Gégout et al, 2003 ; Gégout et al., 2008) ont été développées lors de cette période. Ces indicateurs quantitatifs ont été testés avec succès à l'échelle nationale pour établir des modèles environnementaux de distribution (Pinto *et al.*, 2008 ; Coudun *et al.*, 2006 ; Piedallu et al., 2016 ; Cheaib et al, 2012) et de croissance des essences (Seynave *et al.*, 2005 ; Seynave *et al.*, 2008 ; Pinto *et al.*, 2008).

Ce développement en outils sur le milieu et les essences ont justifié la création d'un Projet d'Interface INRA-ONF liant chercheurs et professionnels de la gestion forestière. L'objectif général de ce projet a été de **développer une nouvelle génération d'outils pour le choix des essences et l'évaluation de la production des forêts**. Pour ce faire, les avancées scientifiques récentes ont été utilisées pour développer et transmettre aux gestionnaires les nouvelles approches de caractérisation et de cartographie des paramètres du milieu et de quantification des possibilités actuelles et futures de présence et de croissance des principales essences françaises. Ces nouveaux outils évolutifs cherchent à : (i) intégrer plusieurs approches de modélisation reliant station et choix des essences; (ii) prendre en compte de larges territoires avec une précision locale ; (iii) estimer la gamme et la source des incertitudes, liées aux modèles, sur les projections. Les questions d'adaptation de la sylviculture pour tenir compte du réchauffement climatique n'ont pas été traitées du fait de l'ampleur déjà importante des tâches devant être réalisées. Plusieurs objectifs spécifiques liés aux outils et méthodes employés, aux échelles de travail et aux essences traitées ont été abordés:

(i) Adapter les nouveaux outils basés sur la bioindication pour une utilisation efficace sur le terrain à l'échelle de l'aménagement forestier.

(ii) Evaluer les modèles de distribution et de productivité de plusieurs essences forestières importantes à des échelles nationales, régionales et locales.

(iii) Tester, évaluer et adapter l'application à l'échelle du massif forestier des modèles de distribution actuels et futurs et des modèles de productivité des essences calibrés à l'échelle nationale.

Ces travaux ont été conduits au sein des deux Unités d'Accueil, EEF et LERFOB, en collaboration avec le Département RDI de l'ONF et le comité de pilotage suivant a contribué fortement à l'orientation des travaux : Myriam LEGAY, Chef du Département RDI de l'ONF ; Jean LADIER, CR ONF ; Jean-Luc DUPOUEY, DR INRA ; Vincent BADEAU, IR1 INRA ; Jean-Claude GEGOUT, Pr. AgroParisTech ; Christian PIEDALLU, IR AgroParisTech ; Jean-Christophe HERVE, Directeur du L'IF-IGN ; Laurent BERGES, CR IRSTEA ; Olivier PICARD, IDF ; Quentin PONETTE, Pr. Université de Louvain, Belgique ; Le Chef de département EFPA (Jean-Marc Güel, DR INRA; Thierry Caquet, DR INRA). Ce comité de pilotage s'est réuni une fois par an et un compte rendu, résumant les échanges et décisions, a été envoyé aux participants à l'issue de chaque réunion. Une restitution finale et publique a été présentée le 23 Juin 2015 au Centre de Nancy d'AgroParisTech. Ce séminaire labélisé ARBRE a réuni 40 participants : Chercheurs de l'INRA, de l'IGN, Enseignants chercheurs d'AgroParisTech, membres de la RDI et gestionnaires de l'ONF ainsi que des représentants de la forêt privée. Mr. Quentin Ponette, Professeur de l'Université de Louvain, Olivier Picard, Directeur de l'IDF-CNPF et du RMT Aforce et Eric Lacombe, Professeur de sylviculture à AgroParisTech ont animé les discussions autour des trois principaux objectifs et sujets développés dans le cadre du projet et qui sont relatifs : (i) aux nouvelles méthodes de description des stations forestières par bioindication, (ii) à la prédiction de la distribution des essences comme outil d'aide à la décision dans un contexte climatique changeant et (iii) à l'application de ces nouveaux outils à l'échelle de l'aménagement forestier. Ce rapport exécutif structuré en trois parties synthétise les travaux réalisés durant les trois années du projet d'interface relatifs aux trois thématiques présentées lors de la restitution finale.

A l'issue de ce Projet interface, l'Ingénieur Chargée de Mission a Intégré le LERFOB à AgroParisTech comme Ingénieur de Recherche contractuel. Ainsi, les résultats du projet sont aujourd'hui diffusés aux étudiants des formations Ingénieurs et Master et les travaux menés dans ce projet auront une continuité au sein de l'Unité issue du futur rapprochement entre EEF-LERFOB dont l'adaptation de la gestion forestière face aux changements climatiques constitue une thématique de recherche transversale.

Partie 1 : Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique

1.1. La bioindication, état de l'art

Auteurs : Paulina Pinto; Jean-Claude Gégout; Jean-Luc Dupouey.

Un bioindicateur est un substitut biologique à la mesure directe, qui renseigne sur l'état ou le fonctionnement d'un paramètre de l'écosystème. Parmi les nombreuses catégories d'êtres vivants susceptibles d'être utilisées comme bioindicateurs, **les plantes** occupent une place importante. Leur présence ou leur absence est l'un des paramètres les plus fréquemment utilisés comme bioindicateur. Cette approche présente plusieurs avantages par rapport aux mesures directes sur le terrain : (i) le faible coût lié aux observations de la flore (présence ou absence d'espèces), en comparaison avec les mesures qui nécessitent plus d'équipement et de temps d'acquisition; (ii) la capacité de prédire des types de facteurs écologiques très variés (climat, sol, ...) à partir d'un même relevé floristique; (iii) la capacité d'intégration temporelle et spatiale de la flore d'une placette lorsqu'elle est utilisée pour estimer une variable nutritionnelle ou hydrique alors qu'une mesure physique sur un échantillon de sol à un instant donné n'a pas d'intérêt s'il ne représente pas des données stationnelles intégrées sur plusieurs années. Cet aspect est important pour les variables (comme l'azote) dont on désire connaître les effets moyens et leurs évolutions globales, à l'échelle d'un site; (iv) la possibilité de remonter dans le temps en l'absence de mesures anciennes, car des relevés floristiques existent depuis le début du 20ème siècle et la bio-indication devient essentielle pour évaluer les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des milieux en l'absence de mesures directes de dépôts avant les années 1990. Elle est rendue possible par l'existence de riches bases de données anciennes.

Le premier système quantitatif de bioindication par la végétation a été mis au point par l'écologiste allemand Heinz Ellenberg. Il a établi, à partir d'observations sur le terrain, de mesures en laboratoire et de son expérience, des **valeurs indicatrices** (VI) pour la flore vasculaire et les principales espèces muscinales d'Europe continentale (Ellenberg, 1974, 1992). Ces valeurs indicatrices correspondent au préférendum écologique des espèces pour sept facteurs du milieu: la lumière, la température, la continentalité, l'humidité, l'acidité, l'azote et la salinité. D'autres systèmes ont à la suite été établis sur les mêmes bases pour la Suisse (Landolt, 1977, 2010), le Royaume-Uni (Hill *et al*, 1999), la Grèce (Böhling *et al*., 2002) et l'Italie (Pignatti *et al*, 2005). En France, les préférences écologiques des espèces pour l'humidité du sol et l'acidité sont fournies dans la flore forestière (Rameau *et al*., 1989; 1993). Les avancées récentes dans le domaine de la modélisation de la réponse des espèces vis-à-vis des facteurs écologiques et la constitution des

grandes bases de données (i.e. EcoPlant pour les forêts françaises) ont permis d'établir un nouveau système de bioindication des conditions de milieu (Gégout, *et al*., 2003; 2005). Par rapport aux méthodes traditionnelles, les VI d'EcoPlant présentent l'avantage d'être issues d'une méthode formalisée, généralisable et améliorable par l'acquisition de nouvelles données ainsi que d'être calibrées à partir des variables physiques sur l'ensemble du territoire français. Couplées aux dizaines de milliers de relevés floristiques de l'inventaire forestier national, cette approche permet la caractérisation fine des conditions environnementales à l'échelle du territoire métropolitain (Fig. 1a). Les valeurs indicatrices de conditions de sol issues d'EcoPlant et celles d'Ellenberg s'avèrent très efficaces pour prédire la disponibilité en azote des sols (Adrianarisoa, *et al*., 2009).

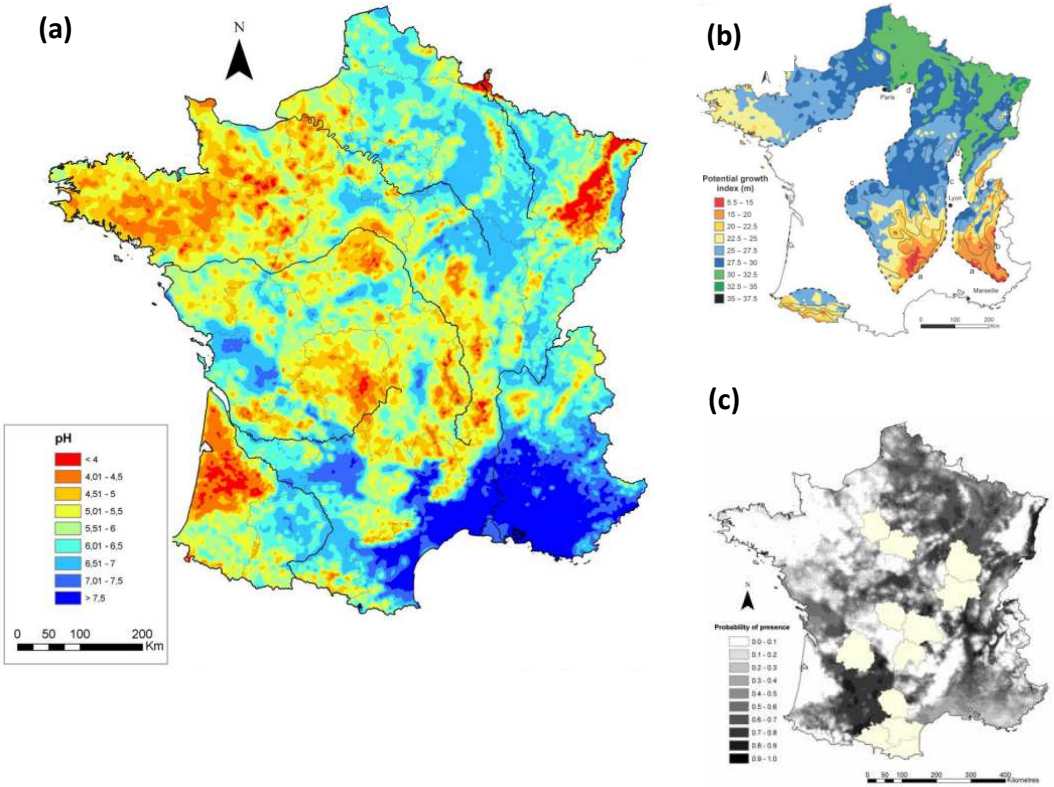


Figure 1. **(a)** Carte des pH de l'horizon A des sols forestiers français estimés à partir des valeurs indicatrices d'EcoPlant et de 104 375 placettes de l'Inventaire Forestier National. **(b)** Carte des prédictions de l'indice de fertilité du Hêtre en France calculé sur 97 281 placettes de l'Inventaire Forestier National à partir d'un modèle intégrant des VI pour sol issues d'EcoPlant (Seynave *et al*., 2008). **(c)** Habitats prédits pour l'Erable champêtre en France à partir d'un modèle intégrant le pH bioindiqué (Coudun, *et al*., 2006).

En Europe tempérée, la gestion forestière repose sur une caractérisation fine du milieu où la bioindication par les plantes constitue un des moyens traditionnellement utilisés pour l'évaluation de la qualité des milieux forestiers (Cajander, 1926; Duchaufour, 1948; Hawkes, 1997; Wilson *et al*., 2001), ou pour prédire les capacités de production des peuplements (Becker & Le Goff, 1988; Nieppola, 1993; Lahti, 1995, Seynave *et al,* 2004, 2008, Fig 1b). Le caractère

indicateur des plantes vis-à-vis des facteurs de la production forestière a également été utilisé en Amérique du Nord (Wang, 1995, Strong, *et al.*, 1991; Host & Pregitzer, 1991). Les valeurs indicatrices de conditions de sol issues d'EcoPlant et celles d'Ellenberg ont également été utilisées, avec une efficacité comparable à celle des variables mesurées, pour prédire la distribution des essences aux échelles régionale et nationale (Pinto & Gégout, 2005 ; Coudun *et al.*, 2006, Fig. 1c). Dans un **contexte de changement des écosystèmes** liés aux activités anthropiques, la bioindication a partir des VI d'Ellenberg a été utilisée pour analyser les changements à long terme des caractéristiques édaphiques (Diekmann & Dupré, 1997; Falkengren-Grerup, 1986; Lameire *et al.*, 2000; Thimonier *et al.*, 1992, 1994, Fig. 2).

Cependant, le caractère ordinal des VI traditionnelles et leur lien indirect avec les variables environnementales limite leur intégration dans les modèles de distribution et de productivité des essences qui deviennent, dans un contexte de **changement globaux**, des **outils d'aide à la décision pour le choix des essences** de plus en plus utiles pour une gestion forestière adaptée au nouveau contexte climatique. L'intérêt d'utiliser des VI issues des méthodes formalisées, reliées directement aux variables physiques du sol, est de construire des modèles de production ou de distribution des essences qui tiennent compte des principaux facteurs climatiques et édaphiques influant le développement des plantes (Fig 1b,c). Ces modèles génériques permettent d'une part des prédictions en tout point de l'espace et du temps, et d'autre part une meilleure résolution spatiale qu'avec des variables mesurées indisponibles sur de nombreux sites. Ces nouvelles applications à différentes échelles (de la parcelle au territoire) renouvellent l'utilité des méthodes de bioindication pour la gestion forestière.

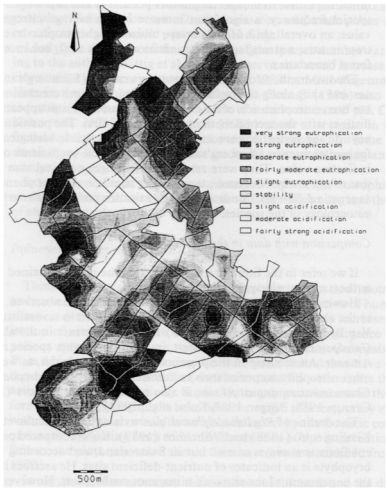


Figure 2. Eutrophisation dans une forêt de plaine en Lorraine bioindiquée avec les valeurs indicatrices d'Ellenberg, (noir: zones à forte eutrophisation; gris clair: zones sans changement (Timonier, *et al.*, 1992).

Dans ce nouveau contexte, une première action a été mené au sein du Projet interface «Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant » en vue **d'adapter les nouveaux outils de bioindication pour une utilisation efficace sur le terrain à l'échelle de l'aménagement forestier.** Cette action a été renforcée par le projet de Valorisation OBUP (Pinto, et al. 2013 ; Pinto, 2014) soutenu par le LABEX ARBRE et par une collaboration avec l'IGN.

1.2 Les nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle basé sur la bioindication des plantes

Auteurs : Paulina Pinto; Jean-Luc Dupouey ; Jean-Christophe Hervé; Myriam Legay ; Stephanie Wurpillot, Pierre Montpied ; Jean-Claude Gégout

Introduction et objectifs : le nouveau système formalisé de bioindication par les valeurs indicarices des espèces établi à partir de la base de données EcoPlant a servi de base pour réaliser la caractérisation des conditions stationnelles (Gégout et al., 2005 ; Gégout, 2006). Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un inventaire floristique complet établi par un botaniste sur un site pour bioindiquer ses caractéristiques nutritionnelles. Cette approche a permis de produire des cartes nationales, à résolution kilométrique, de l'acidité et de la qualité de nutrition azotée des sols (Fig.1a) ainsi que d'établir des modèles environnementaux de distribution spatiale des essences (Pinto *et al.*, 2008 ; Coudun *et al.*, 2006). Ce système a également été validé dans des modèles de croissance des essences (Seynave *et al.*, 2005 ; Seynave *et al.*, 2008 ; Pinto *et al.*, 2008) permettant de prédire la productivité des peuplements. Cependant, cette méthode de bioindication basée sur un inventaire complet des espèces présentes dans une placette, est très couteuse en temps d'acquisition (30 à 60 minute/site), et elle implique un niveau d'expertise en botanique pas toujours à la portée des experts de terrain (sylviculteurs, gestionnaires,…) ce qui a limité son utilisation dans l'aménagement des forêts et d'autres écosystèmes naturels.

L'objectif du travail réalisé sur ce sujet dans le cadre du poste d'interface a été d'optimiser la méthode de réalisation d'inventaires floristiques pour bioindiquer les qualités nutritionnelles des sites (acidité, azote, richesse minérale) pour que la méthode devienne utilisable en routine pour l'aménagement et la gestion forestière. Nous avons cherché en particulier à déterminer dans quelle mesure il est possible de diminuer la durée des inventaires floristiques sur les placettes par la réalisation d'inventaires non exhaustifs. Le nombre d'espèces trouvées augmente très rapidement en début d'inventaire puis beaucoup plus lentement ensuite du fait de la présence d'espèces de petite taille en faible quantité sur le site. Il semble donc possible de diminuer fortement la durée d'inventaire sans diminuer proportionnellement le nombre d'espèces trouvées. On a ainsi cherché à répondre à la question suivante : **Est-il possible de réduire le temps d'acquisition des données flore sur le terrain quand l'objectif est d'estimer les ressources du sol par bioindication ?**

Méthode: Nous avons travaillé à la fois à des échelles nationale et locale pour englober la grande variabilité des écosystèmes forestiers français, et pour veiller à l'applicabilité des résultats à divers types de peuplements et pratiques de gestion. A large échelle, 304 placettes ont été répartis sur l'ensemble du territoire français à partir d'une sélection de placettes de

l'Inventaire Forestier National. À l'échelle locale, 166 placettes ont été installées selon un échantillonnage systématique dans trois forêts du nord-est de la France (Fig. 3). Dans chaque placette un inventaire floristique chronométré a été réalisé et le pH-H_2O, rapport C/N et S/T ont été mesurés en laboratoire à partir d'un échantillon de la couche A-sol pour caractériser respectivement l'acidité, la nutrition azotée et la nutrition minérale. Ces mêmes paramètres de sol ont été prédits au niveau de chaque placette à partir de l'inventaire de végétation en utilisant les valeurs indicatrices (VI) pour le pH, le rapport C/N et S/T de la base de données EcoPlant. En utilisant une procédure de ré-échantillonnage, les valeurs bioindiquées sur chaque placette ont été calculées par nombre ou proportion croissant d'espèces du relevé d'une part, et pour un effort d'échantillonnage croissant en temps d'acquisition d'autre part. Les valeurs prédites sont comparées avec les valeurs mesurées et la performance des prévisions a été évaluée par: (i) l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des prédictions fournies par la bioindication, et (ii) le carré du coefficient de corrélation linéaire (R^2) entre l'échantillon mesuré à partir du sol et celui obtenu par bioindication par la flore.

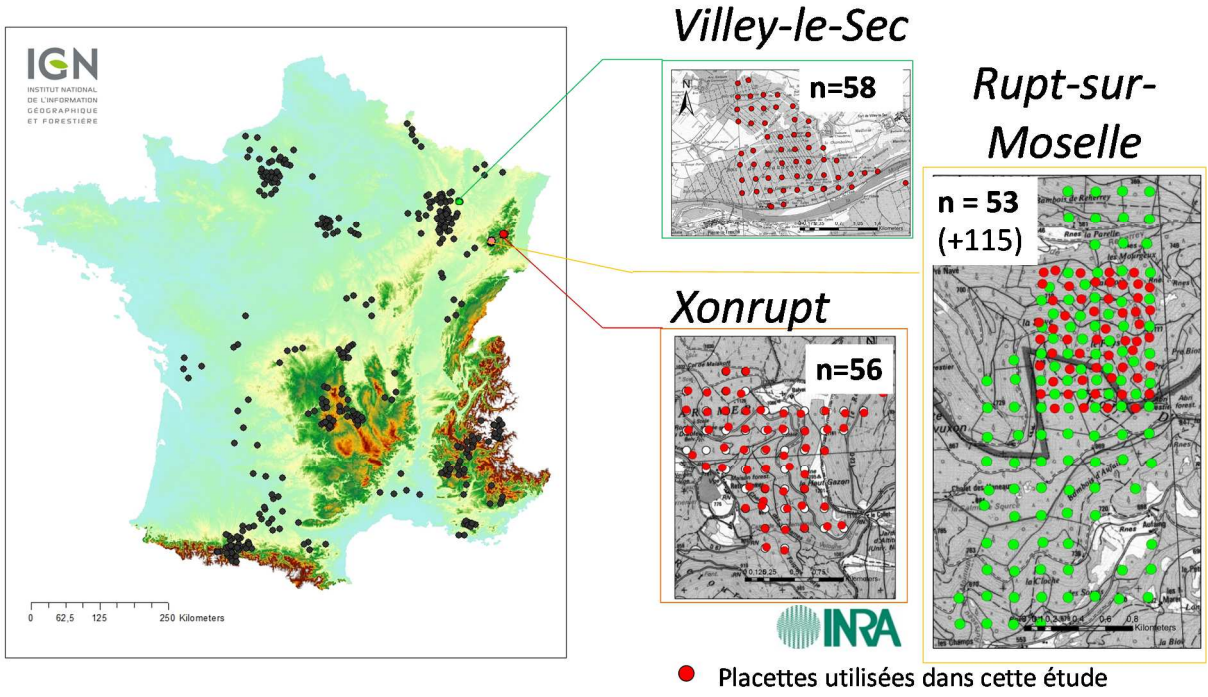


Figure 3: Carte des 304 parcelles échantillonnées sur tout le territoire français (noir) et de l'emplacement des trois forêts échantillonnées dans le nord-est de la France: Villey-le-Sec (vert, n = 58), Rupt-sur-Moselle (rouge, n = 52) et Xonrupt (orange, n = 56).

Résultats : Le nombre plutôt que la proportion d'espèces utilisées dans l'estimation a été déterminant pour la qualité des prédictions du pH-H2O (Fig. 4a,b). La bioindication du pH-H_2O et S/T est optimale en utilisant les 20-25 premières espèces recensées par placette, correspondant à un inventaire de 14 minutes de durée en comparaison avec les 28 minutes en moyenne nécessaires pour un inventaire complet (Fig. 5b,c). La bioindication du rapport C/N a montré une

performance inférieure avec un plus grand nombre/temps nécessaire pour atteindre la qualité maximale de prédiction (respectivement 25 espèces, 25-35') (Fig. 5b,c). Une précision de 80% de la précision maximale a été obtenue après 4-5 minutes d'inventaire (6-12 espèces inventoriées) et cela pour les trois variables étudiées. Ces résultats sont indépendants du niveau nutritionnel du sol (Annexe, 1.1 ; Fig.3c) et sont semblables aux échelles nationale et locale (Fig. 6). Ces travaux mettent en évidence que les espèces les plus abondantes, recensées les premières, sont les plus informatives et suffisent pour atteindre une bonne qualité de bio-indication, tandis que les autres espèces n'apportent pas d'information significativement utile (Annexe 1.1, Fig.4).

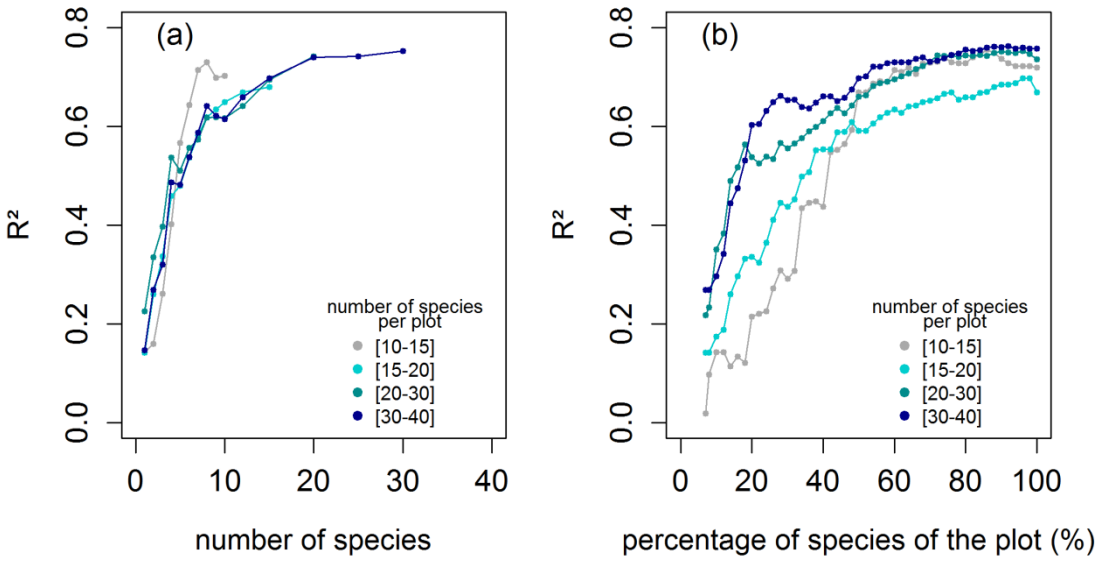


Figure 4 : Qualité de la bioindication mesurée par le R^2 entre les valeurs de pH mesurées et bioindiquées sur les 304 parcelles (échelle nationale), en fonction de : **(a)** le nombre d'espèces par placette utilisée dans la bioindication; et **(b)** le pourcentage d'espèces par placette utilisée pour la bioindication.

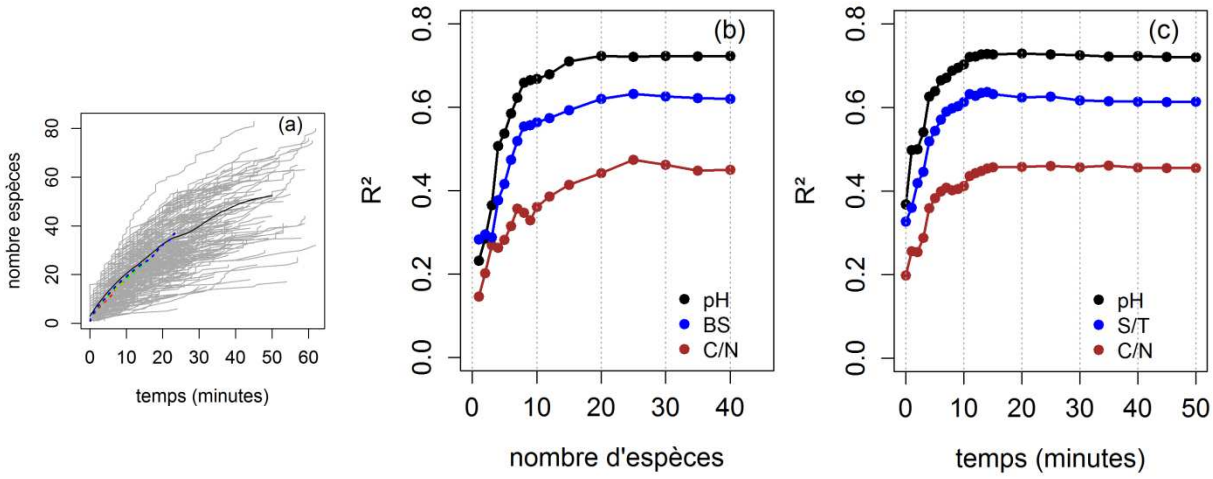


Figure 5 : **(a)** Vitesse de réalisation de l'inventaire avec la présentation du nombre d'espèces relevées en fonction du temps d'inventaire. Chaque ligne grise représente un des 304 relevés étudiés. La courbe noire

représente le nombre moyen d'espèces relevées en fonction du temps d'inventaire. Les courbes tiretées rouge, verte et bleue représentent la même chose avec un jeu de relevés constant ayant respectivement duré au moins 10, 20 et 25 minutes. **(b et c)** La qualité de la bioindication déterminée par le coefficient de détermination (R^2) de la régression linéaire entre les valeurs de pH, C/N et S/T mesurées et bioindiquées sur les 304 placettes étudiées (échelle nationale). La qualité de la bioindication est fournie en fonction de : le nombre d'espèces par placette utilisées dans la bioindication **(b)**; et le temps d'inventaire **(c)**.

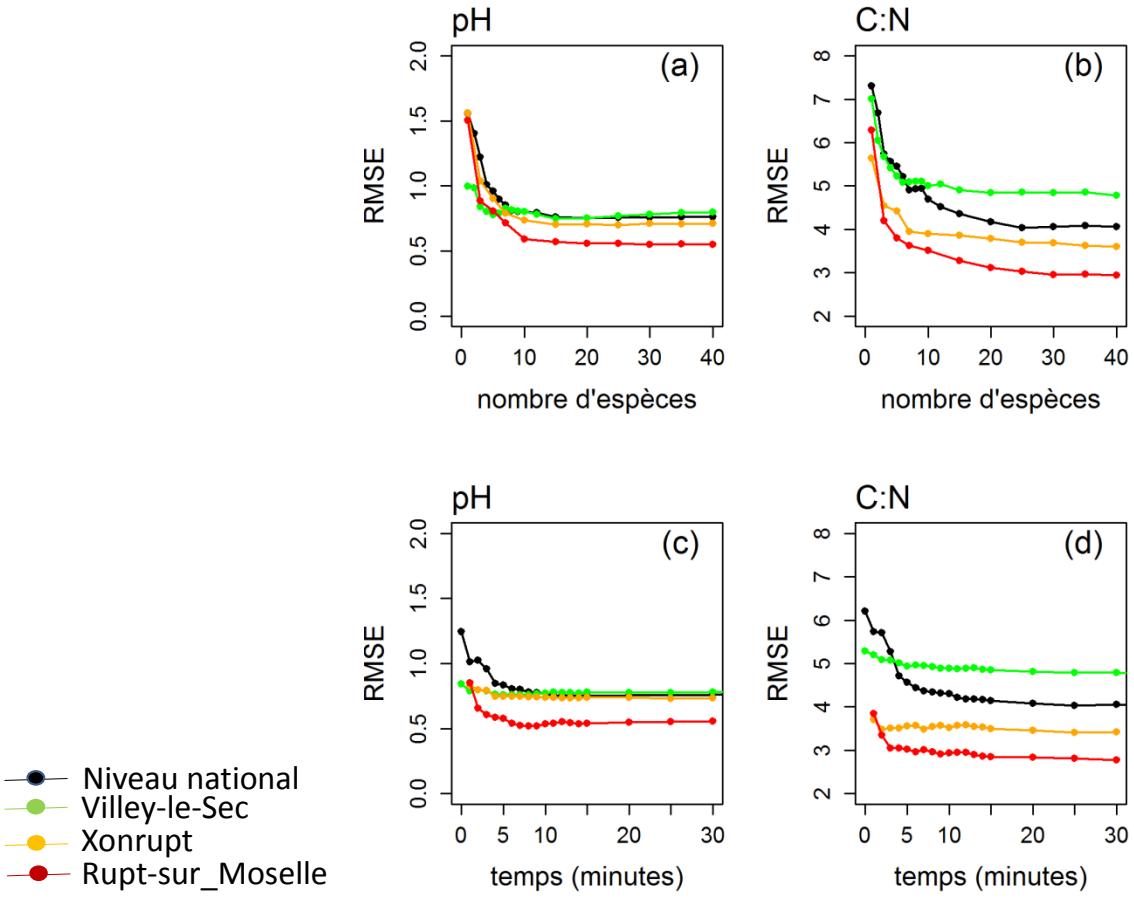


Figure 6 Qualité des prédictions déterminée par l'erreur quadratique moyenne (RMSE) en fonction du nombre d'espèces utilisées dans la bioindication **(a, b)** et du temps d'inventaire par placette **(c, d)**.

Conclusions : Lorsque l'objectif est d'estimer les ressources nutritionnelles du sol par bioindication par les plantes, il est possible de réduire considérablement le temps consacré à l'inventaire floristique et donc son coût. Cela est particulièrement vrai lorsque l'objectif est de cartographier les caractéristiques du sol. Nos résultats pourraient permettre une utilisation renouvelée des méthodes de bioindication en vue d'aider à la prise de décision dans la gestion forestière.

Partie 2 : Choix des essences dans un contexte de changement climatique : les modèles de distribution comme un outil d'aide à la décision forestière

Auteur : Paulina Pinto. Ont contribué à la réflexion V. Badeau (EEF), J.D. Bontemps, M. Legay (ONF) ; Ch. Piedallu (LERFoB). Cette partie du projet interface a pu être menée à bien grâce aux données fournies sur la distribution des essences par V. Badeau (EEF), J.D. Bontemps, P. Mérian et Ch. Piedallu (LERFoB).

2.1 Choix des essences et changement climatique, état de l'art

Les forêts européennes et françaises ont subi au cours des dernières années une augmentation sensible à la fois de productivité (de 50 à 100 % depuis les années 1950) et d'intensité des dépérissements (Bontemps et al., 2009 ; Bréda & Badeau, 2008). A l'échéance de la fin du XXI^{e} siècle, les modèles climatiques prédisent une augmentation des températures moyennes comprise entre 2 et 6°C suivant les scénarios. Cette augmentation devrait non seulement affecter la productivité des peuplements en place mais aussi leur distribution spatiale en France (Piedallu et al ,2009 ; Lenoir et al., 2008 ; Lebon & Badeau, 2010 ; Badeau et al, 2010). La plupart des sites où les essences sont actuellement en équilibre avec leur milieu devraient subir des températures trop chaudes ou une contrainte hydrique trop forte pour leur maintien à la fin du XXI^{e} siècle, quels que soient les scénarios de changements climatiques pris en compte (Bréda et al., 2010). Malgré ces évidences**, le choix des essences** par le gestionnaire forestier repose encore avant tout sur l'analyse des espèces en place, de leurs performances, et des accidents éventuels du passé. Or ces références se trouvent invalidées par les changements globaux, et en particulier par le changement climatique.

Lorsque l'aménagiste remet en cause le choix de l'essence en place, ce à quoi il sera de plus en plus souvent amené (Legay, et al. 2010), il recherche une bonne adéquation entre les caractéristiques du milieu et l'écologie des essences choisies. Pour cela, il dispose généralement d'un **catalogue des stations forestières**, où sont décrits les différents types de milieux et leurs caractéristiques**,** à l'échelle de la région naturelle. Cet outil décrit de façon qualitative les conditions nutritionnelles, hydriques, topographiques et altitudinales des différents types d'écosystèmes (appelés types de stations) rencontrés dans la région et fournit des clés d'identification de terrain qui permettent à l'utilisateur de rattacher un site à un type de station. **Un guide des essences**, complémentaire au catalogue, fournit ensuite à dire d'expert une liste d'essences conseillées, possibles ou à proscrire pour chaque type de stations défini dans un catalogue de stations forestières. C'est essentiellement sur cette base que sont choisies les essences-objectifs. Dans un contexte de changement climatique, ces outils traditionnellement utilisés par le gestionnaire ne sont plus adaptés du fait qu'ils ne permettent pas d'intégrer le

climat et ses évolutions dans le choix des essences à favoriser ou à prescrire. La connaissance des variables qui contrôlent la présence des essences et qui déterminent leur aire de répartition et leurs évolutions futures a été identifié comme un outil prévisionnel indispensable pour le choix des essences de demain (Riou-Nivert, 2008).

Des progrès conceptuels, technologiques et informationnels sont disponibles aujourd'hui pour la caractérisation des milieux, la projection des conditions écologiques futures et le choix des essences afin de fournir aux gestionnaires une **nouvelle génération d'outils permettant le choix éclairé des essences à** favoriser avec une vision à la fois locale et globale, et permettant d'intégrer les évolutions environnementales dans les processus décisionnels liés à la gestion. Le concept de comportement des essences s'est clarifié. Il ne comprend plus seulement la notion de productivité (décrite sous forme de classes) mais inclut explicitement les notions de niche (Hutchinson, 1957) permettant d'évaluer le caractère favorable des milieux à la présence des essences et de vulnérabilité permettant de définir les risques de dépérissement des peuplements avant leur âge de récolte ou de mort « naturelle ». Des bases de données sont maintenant disponibles qui comprennent d'une part la présence et l'absence des espèces et d'autre part les valeurs des gradients énergétiques, hydriques et nutritionnels sur les mêmes sites. Ces bases de données ont permis la modélisation de la probabilité de présence des espèces le long des principales dimensions environnementales selon la théorie de la niche écologique des espèces (Hutchinson, 1957). Au tournant des années 2000, ces modèles ont été spatialisés sous SIG grâce aux couvertures numériques des facteurs explicatifs pour réaliser **des cartes de distribution** fournissant en tout point de l'espace géographique la probabilité de présence des espèces (Guisan A. & Zimmerman N., 2000, Badeau V. et al., 2010). Ces modèles ce sont avérés très performants dans la prédiction de l'aire de répartitions des principales essences de la forêt française par rapport aux approches de modélisation basés sur des processus, disponibles pour un groupe plus restreint d'essences et plus exigeants aux niveau des variables d'entrées (voir, Cheaib A., 2012). Le calcul des variables du sol à fine résolution spatiale sur le territoire national (Gégout, 2005, Piedallu & Gégout, 2007, Piedallu et al., 2007) a permis d'intégrer ces variables aux modèles de niche climatique et ainsi de différencier et expliciter les effets liées à la nutrition et à l'eau du sol sur la distribution des essences (Coudun, et al. 2006, Fig. 1c ; Pinto et al., 2008). Les modèles de distribution permettent ainsi d'évaluer le caractère plus ou moins adapté des conditions de milieu pour une espèce, et constituent une approche formelle et quantitative de choix des essences. La possibilité d'introduire des scénarios climatiques futurs dans les modèles de distribution offre la possibilité de **projeter le devenir potentiel de zones actuellement favorables (ou défavorables) aux essences.**

L'objectif de cette deuxième action au sein du Projet Interface a été d'utiliser les modèles de distribution des principales essences françaises, parmi ceux développés par les laboratoires LERFOB et EEF travaillant depuis plus de 10 ans sur la réponse des essences aux facteurs environnementaux, pour **fournir au gestionnaire de terrain et décideurs forestiers des éléments pour le choix des essences en contexte de réchauffement climatique**.

2.2 Modèles de distribution comme outils pour le choix des essences

Introduction et objectifs : Les modèles réalisés par le LERFoB et EFF sont des modèles de niche réalisée établis à partir de nombreuses placettes réparties sur le territoire français et contenant des inventaires floristiques exhaustifs. Ces modèles corrélatifs, basés sur la niche réalisée des essences (Hutchinson, 1957), se sont avérés très performants pour décrire l'aire de répartition des essences à l'échelle de la France (Cheaib, et. al, 2012). Ces modèles présentent des avantages par rapport aux modèles basés sur des processus, comme: (i) leur disponibilité pour un nombre important d'essences forestières françaises, et (ii) la disponibilité des variables d'entrée des modèles. Néanmoins l'utilisation par le gestionnaire forestier de ces méthodes récentes pour la prédiction de présence future des essences se heurte à la multiplicité des modèles existants. Dans un premier temps, il s'est avéré nécessaire de comparer les principaux modèles corrélatifs disponibles avec un approfondissement sur : **la qualité** des modèles, **les différences d'aires futures** prédites conduisant à des incertitudes sur les préconisations à fournir, et la **compréhension des causes conduisant aux différences** de prédictions. Pour ce faire, on a cherché à répondre aux questions suivantes : (i) Quelle est la qualité de prédiction des modèles dans un climat présent à une résolution d'intérêt local (placette de 700 m2) et à une résolution d'intérêt régional (pixel de 64 km2) ? (ii) Dans quelle mesure, la qualité des modèles de distribution dépend de l'aire de référence choisie : France entière versus aire de distribution de l'essence étudiée (élimination de vastes zones potentielles faciles à prédire d'absence de l'essence) *?* (iii) Les tendances d'évolution de la distribution des essences aux échelles nationale et régionale -**régression, stabilité, expansion**- sont-elles cohérentes entre les modèles ? (iv) Quelles sont les différences de niche qui permettent d'expliquer les différences observées entre modèles ?

Matériel et méthodes : Trois types de modèles de niche de type corrélatifs ont été sélectionnés, leurs caractéristiques sont résumées dans la Table 1. Les trois types de modèles ont été calibrés à partir des présences/absences des essences observées sur les placettes de l'Inventaire Forestier National (IFN) dont la placette, unité statistique de base de 700 m^2 a été gardée (modèles d'ORACLE et LERFOB-bio - source LERFoB) ou agrégée à 8-km (modèle NBB - source EEF). Les variables explicatives différentes pour les trois modèles, sont toutes liées au bilan énergétique, hydrique ou nutritionnel des espèces. Une description plus détaillée de ces modèles et des calculs des variables associées se trouve dans les références bibliographiques signalées dans la Table 1. Les essences étudiées, choisies parmi les principales essences de la forêt française, sont les suivantes : Hêtre (*Fagus sylvatica L.),* Chêne pédonculé *(Quercus robur L.),* Chêne sessile *(Quercus petraea (Matt) Leibl.,* Pin sylvestre *(Pinus sylvestris),* Chêne pubescent *(Quercus pubescens)* et Chêne vert *(Quercus ilex L.).* Ceci nous a permis d'intégrer des essences à

trait de vie différents (sempervirentes et caducifoliées), tempérées et méditerranéennes, et ayant un comportement écologique différencié au niveau des besoins hydriques et nutritionnels. Les modèles de distribution de ces essences sont représentés à des résolutions spatiales de 8-km (64 km^2) pour NBB et ORACLE et au pas kilométrique pour LERFOB-bio.

Table 1 : Synthèse des modèles de distribution utilisés dans le cadre du projet.

Variables calibration	**NBB**	**ORACLE**	**LERFOB-bio**
1. variables explicatives			
climatiques	Déficit hydrique été , P09-11, P03, P07, Humidité relative 09-11, Humidité spécifique08, NGG03-05, NGG06-08, GDD01-04, GDD01-03, ETP06-08, ETP07, ETP10, Tmax absolues (30 ans), Amplitude thermique	P12-02, P06-08, VPD06-08 (Déficit de pression de vapeur), T12-02, T06-08	Tmean13 Déficit hydrique été
periode concerné	1971-2000	1971-2000	1961-1990
source	SAFRAN	SAFRAN	LERFOB
résolution spatialle	8 x 8 km	8 x 8 km	1 x 1 km
résolution temporelle	horaires	horaires	mensuelles
méthode d'agrégation	moyennes mensuelles et saisonnieres	moyennes mensuelles et saisonnieres	moyennes mensuelles et saisonnieres
sol	pH	PH, CN, RUM, profondeur du sol	pH, C/N, TW, PW
source	Infosol	LERFOB	bioindiqués à partir de flore
résolution	8 x 8 km	1 x 1 Km	placette 700 m2
méthode d'agrégation	max à 8 x 8 km	non	non
2. variables Y (P/A)			
source	IGN	IGN	IGN
periode	ancienne méthode [..-2004], Loiret [2005-2009]	[2005-2009]	2005-2011
unité statistique de base	pixel 64 km2 (plac. 700 m2)	placette 700 m2	placette 700 m2
n plot	8989	33470	46768
si IGN indiquer le strate	arbres	flore (semis + arbres recensables)	flore (semis + arbres recensables)
3. Méthode modélisation	Regression logistique	GAM	GAM
4. Résolution de représentation	8 x 8 km	8 x 8 km	1 x 1 km
	Cheaib, et al 2010	***Mérian & Bontemps,2013.***	***Piedallu, et al., accepté***

P09-11, P12-02, P06-08, P03, P07 : Respectivement précipitations moyennes mensuelles de septembre à novembre; de décembre à février, de juin à août, de mars ; de juillet; **Humidité relative 09-11** : Humidité relative moyenne de septembre à novembre ; **Humidité spécifique 08** : humidité spécifique du mois d'Aout ; **NGG 03-05, NGG 06-08:** respectivement, somme du nombre de jours de gel de mars à mai; de juin à aout ; **ETP06-08, ETP07, ETP10** respectivement**,** évapotranspiration potentielle moyenne des mois de juin à aout, de juillet et d'octobre; **Tmax**, température absolue maximale calculée sur 30 ans ; **VPD 06-08 :** déficit de pression de vapeur moyen des mois d'été (juin, juillet, aout) ;**T12-02**, **T06-08, Tmean13** respectivement, températures moyennes des mois de décembre à février, de juin à août, température moyenne annuelle ; Déficit hydrique été, déficit hydrique cumulé des mois de juin, juillet et aout. **pH**, pH eau du sol ; **CN**, rapport carbone organique/azote total ; **RUM**, réserve utile maximale du sol ; profondeur du sol (prospectable à la tarrière pédologique), **TW**, indice d'engorgement temporaire, **PW**, indice d'engorgement permanent.

Dans un premier temps, **la validation des modèles pour le climat actuel** a été réalisé à deux résolutions, une d'intérêt régional (64 km^2) et une deuxième d'intérêt local (700 m^2) et à deux échelles : (i) France, (ii) aire de répartition de chaque essence. On a comparé les prédictions issues des modèles aux présence/absences observées dans les placettes de l'Inventaire Forestier National (IFN). Pour confronter les probabilités de présence (valeurs continues de 0 à 1) aux présences/absences de l'IFN et pour faciliter la comparaison entre modèles, on a calculé un seuil

pour transformer les probabilités continues en données binaires de type présence/absence. On a utilisé pour chaque essence le seuil qui maximise les bonnes prédictions de chaque modèle par apport aux observations de presence/absence dans les données de l'IFN. La performance des prédictions a été mesuré par la TSS (« true skill statistic »), où **TSS** = sensibilité+spécificité-1, **sensibilité** = présences bien prédites/(présences bien prédites + présences mal prédites) et **spécificité** = absences bien prédites/(absences bien prédites + absences mal prédites) (Allouche, et al., 2016). La TSS tiens ainsi compte simultanément des erreurs d'omission (sensibilité) et de commission (spécificité). Cet indice prend des valeurs de -1 à +1, où +1 indique des prédictions parfaites et des valeurs nulles ou négatives indiquant des performances correspondant à un tirage aléatoire. On a procédé en 5 étapes pour l'évaluation des modèles à des résolutions d'intérêt régional (64 km^2) et local (700 m^2) à l'échelle de la France : (1) constitution d'un jeu de données de **validation A**, indépendant à partir des données des campagnes de l'IGN de 2012 et 2013 dont les données n'ont pas été utilisées dans les modèles traités (N=13,098) avec le calcul pour chaque placette de 700 m^2 des variables explicatives de milieu incluses dans les différents modèles et présences/absences (P/A) des essences ; (2) constitution d'une grille de 8x8km avec recalcul des paramètres de milieu des variables explicatives et agrégation des P/A (N=6,054) à cette maille pour la constitution d'un jeux de **validation B**; (3) Calcul, pour chaque modèle appliqué à chaque essence, d'un seuil de probabilité permettant le passage des cartes de probabilités de présence à des cartes de P/A pour chaque jeux de validation (N= 13,098 ; N= 6,054) ; (4) Calcul des probabilités de présence, puis prédictions des P/A des essences pour tous les modèles aux échelles placette (N= 13,098) et maille 8x8km (N=6,054). (5) Evaluation de la qualité des modèles par comparaison des présences/absences observées et prédites à une résolution d'intérêt local (placette de 700 m2 ; N= 13,098) et à une résolution d'intérêt régional (pixel de 64 km2 ; N=6,054). Deux critères ont été utilisés pour évaluer la performance globale de chaque modèle : AUC [0-100] (Area Under the Curve ; Manel et al., 2001) et TSS[-1 - +1].

Dans l'objectif d'évaluer dans quelle mesure, la qualité des modèles de distribution dépend de l'aire de référence choisie, on a évalué pour chaque essence les prédictions issues de chaque modèle au sein de l'aire de répartition de l'essence. Cette aire de distribution a été définie comme les pixels de 64 km2 qui contenaient au moins une présence de l'espèce.

Dans un deuxième temps, on a réalisé **la confrontation spatiale des modèles pour un climat actuel et un climat futur**. Pour ce faire on a utilisé les projections climatiques à l'horizon 2055, pour le scénario d'émissions A1B de l'IPCC issus du modèle ARPEGE AGCM de Météo-France (Déqué, 2007). Pour confronter les prédictions en 2055 entre modèles on a appliqué le même seuil décrit précédemment pour transformer les probabilités de présences en présences/absences. Pour chaque essence et pour chaque période (actuelle et 2055), on a généré des cartes de distribution potentielle avec les incertitudes liées aux différences de distribution prédites par les 3 modèles analysés. Quatre types de pixel de 1 km^2 sont distingués : (i) espèce prédite présente pour les trois modèles ; (ii) espèces prédite présente pour deux des trois modèles et absent pour le troisième modèle; (iii) espèce prédite présente pour un seul des trois modèles et absente pour les deux autres, (iv) espèce prédite absente pour les trois modèles. Ces cartes permettent de mettre en évidence pour chaque période l'aire de répartition

de chacune des essences et les zones d'incertitudes liées aux modèles. La combinaison de ces cartes de distribution actuelle et future, par essence, a permis de générer des cartes nationales de distribution incluant les incertitudes ou chaque pixel de 1km^2 représente (i) la prédiction de présence de l'essence conjointement pour les trois modèles et pour les climats actuel et futur; (ii) la prédiction de présence de l'essence, pour les climats actuel et futur, pour au moins un des trois modèles.

Pour étudier si les tendances d'évolution de la distribution des essences aux échelles nationale et régionale sont cohérentes entre les modèles EEF et LERFoB, on a généré des cartes où on distingue quatre types de pixel (8kmx8km) : (i) espèce prédite présente dans le climat actuel mais absente en 2055 [1,0]; (ii) espèce prédite absente dans le climat actuel et présente en 2055 [0,1] ; (iii) espèce prédite présente dans le climat actuel et en 2055 [1,1] ; (iv) espèce prédite absente dans les climats actuel et futur [0,0]. Cet analyse a été réalisée à l'échelle nationale et synthétisée au niveau des 14 régions bio-climatiques (Dupias & Rey, 1985) globalement homogènes pour leur végétation, géologie et climat.

Dans le cas de divergences des aires de distribution actuelles et/ou futures entre modèles, on a analysé l'effet de chaque variable sur la réponse de l'essence étudiée selon les différents modèles pour identifier les facteurs qui engendrent les différences d'évolutions.

Résultats : La qualité des modèles est globalement bonne avec des AUC comprises entre 0.72-0.92 et des TSS comprises entre 0.4 et 0.94 (Table 2), à la seule exception du modèle N-NBM pour le Pin sylvestre. Les modèles qui intègrent des variables de sol précises (LERFOB-bio) sont un peu plus performants à l'échelle de la France.

Table 2 : Succès des prédictions de distribution des essences d'après l'AUC et la TSS, sensibilité, spécificité et seuil de probabilité (pour définir la présence et l'absence de l'espèce) obtenus pour les trois types de modèles et les six essences (N= 13,098).

Essence	Modèle	Seuil	AUC	Sensitivité	Specificité	TSS
Hêtre	N-NBM	0.59	0.83	0.89	0.63	0.5
	ORACLE	0.342	0.83	0.88	0.66	0.5
	LERFOB-bio	0.455	0.85	0.82	0.74	0.6
Chêne pedenculé	N-NBM	0.786	0.73	0.89	0.5	0.4
	ORACLE	0.385	0.78	0.81	0.63	0.4
	LERFOB-bio	0.421	0.8	0.86	0.59	0.5
Chêne sessile	N-NBM	0.651	0.73	0.83	0.54	0.4
	ORACLE	0.295	0.76	0.81	0.62	0.4
	LERFOB-bio	0.266	0.79	0.85	0.6	0.4
Quercus pubescens	N-NBM	0.328	0.91	0.85	0.83	0.7
	ORACLE	0.232	0.9	0.78	0.86	0.6
	LERFOB-bio	0.182	0.93	0.87	0.86	0.7
Chêne vert	N-NBM	0.123	0.98	0.93	0.95	0.9
	LERFOB-bio	0.124	0.98	0.95	0.93	0.9
Pin sylvestre	N-NBM	0.583	0.7	0.49	0.79	0.3
	ORACLE	0.191	0.8	0.68	0.78	0.5
	LERFOB-bio	0.212	0.82	0.75	0.74	0.5

La hiérarchie des essences en fonction de la qualité des prédictions dans un scénario actuel est la même pour les trois types de modèles : une meilleure prédiction pour les essences méditerranéennes dont l'aire de répartition à l'échelle de la France est plus réduite ou localisée (e.g. Chêne pubescent, Chêne vert) ; une moins bonne capacité prédictive des modèles de distribution pour les essences disséminées soit par des effets de plantation réalisées en dehors de l'aire de répartition naturelle (e.g. Pin sylvestre) ou parce qu'elles ont été favorisées ou défavorisées par la gestion forestière (e.g. Chêne sessile, Chêne pédonculé) (Table 2).

Ce niveau de performance des modèles est resté très stable quand ils ont été confrontés à un jeu de validation à maille de 8km (N=6,054) (Fig. 7a) et appliqués à l'échelle de l'aire de distribution des essences (Fig. 7b). En effet, leur évaluation ne s'est pas dégradée significativement et les essences mieux ou moins bien prédites sont restées les mêmes (Fig. 7a,b). Les modèles qui intègrent des variables de sol précises, contrairement à ce qui était attendu, ne s'avèrent pas beaucoup plus performants lorsqu'ils sont appliqués uniquement à l'échelle de l'aire de distribution des espèces (Fig. 7b). Cela met en évidence d'une part que la performance des modèles n'est pas dépendante du jeu de validation utilisé et d'autre part que l'applicabilité des modèles nationaux reste possible à des échelles régionales.

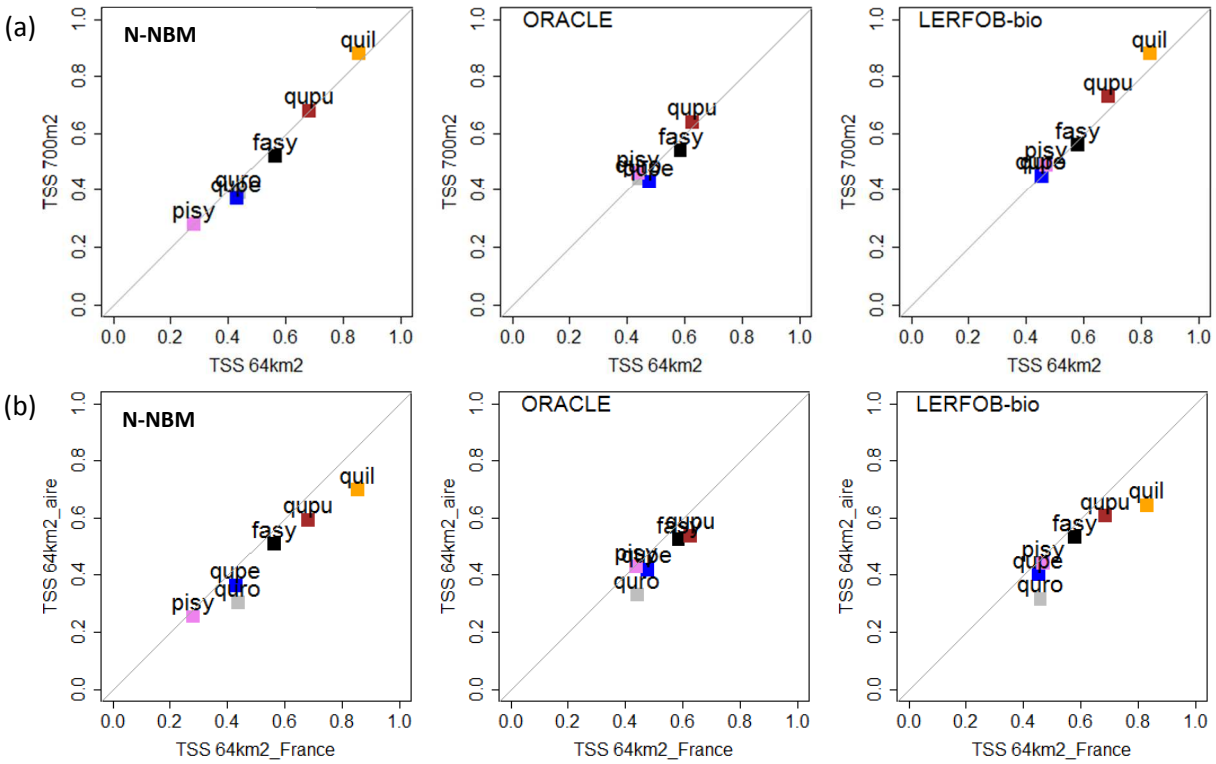


Figure 7 : (a) Performance des modèles (N-NBM, ORACLE, LERFOB-bio) pour les six essences étudiées (mesuré par la TSS), selon leur application à une échelle locale de 700m^2 (« TSS 700 m2 », N= 13,098 jeux de validation A) ou à une échelle régionale de 64km^2 (« TSS 64km2 »; N= 6,054 jeux de validation B). **(b)** Performance mesuré par la TSS, des modèles N-NBM, ORACLE, LERFOB-bio pour les six essences étudiées, selon leur application à une échelle de 64km^2 (Jeux de validation B) soit sur l'ensemble de la France (« TSS 64km2_France ») ou sur l'aire de répartition des essences (« TSS 64km2_aire »).

La confrontation par essence, entre modèles, des projections présentes et futures, a permis de distinguer trois situations différentes : (i) Cohérence des projections futures pour des essences en expansion ou en régression (respectivement, Chêne pubescent et Hêtre) (Fig. 9, Annexe 2.2 ; Fig. 8, respectivement) (ii) Divergence des projections futures lorsque le poids respectif des variables thermiques et de bilan hydrique diffèrent dans les modèles (e.g. Chêne pédonculé, Fig. 9b). Un poids fort du bilan hydrique dans le modèle N-NBM qui conduit à une rétraction de l'aire du Chêne pédonculé dans un climat futur, non compensée par l'effet positif de l'augmentation de température (Fig. 11, Annexe 2.2). (iii) Possibilité d'une faible cohérence pour la prédiction de l'aire actuelle et de forte cohérence dans un scénario futur (cas du Pin sylvestre, Fig. 8, Annexe 2.2).

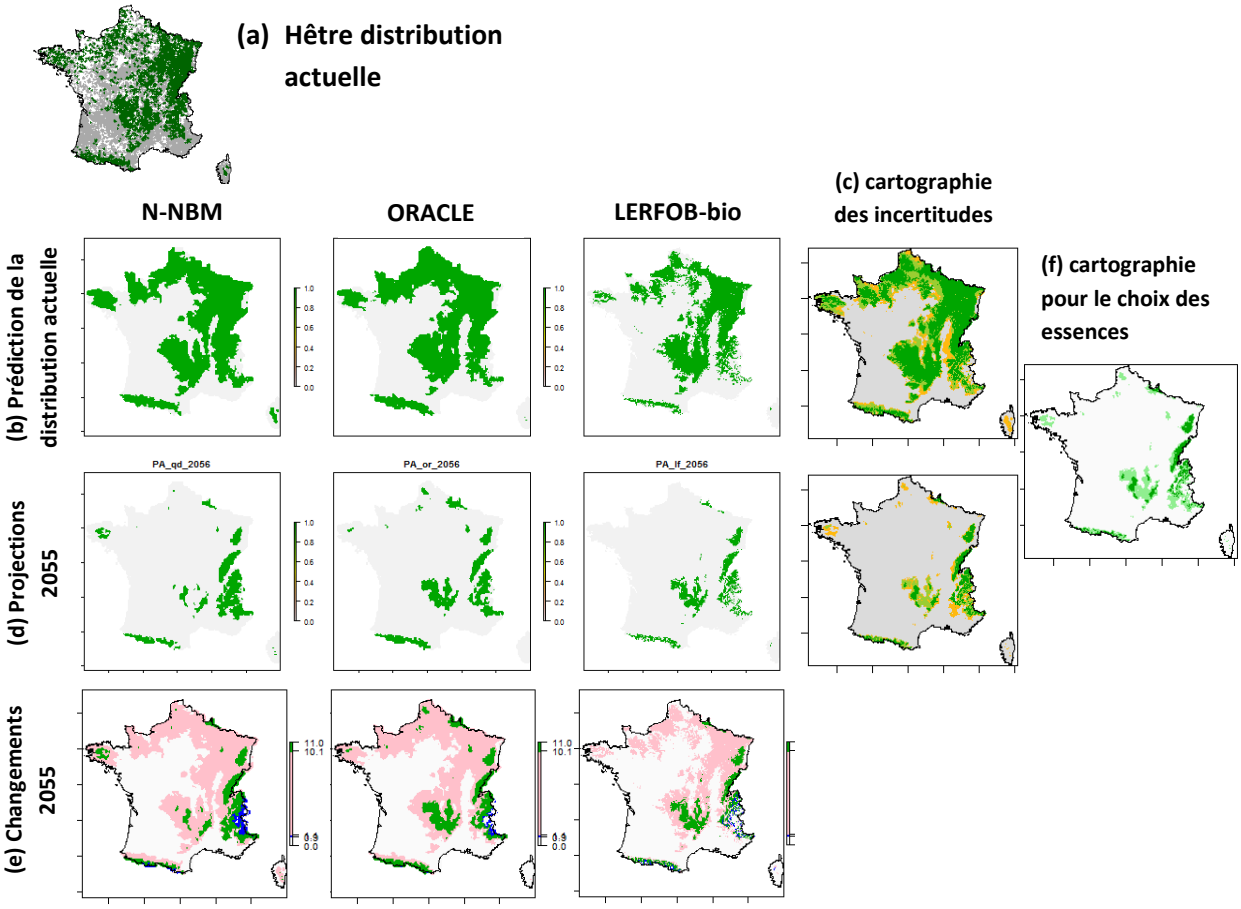


Figure 8 : Distribution du Hêtre dans le scenario climatique actuel : **(a)** Distribution actuelle du Hêtre observé sur les données de l'IFN ; **(b)** Présences prédites par chacun des trois modèles (vert= présence; gris= absent) et **(c)** par l'ensemble des trois modèles avec l'incertitudes liée aux modèles (hêtre prédit présent dans : 0,1,2 ou 3 modèles, respectivement blanc, orange, vert clair, vert foncé). **(d)** Prévision future de la distribution du Hêtre selon chacun des trois modèles et par l'ensemble des trois modèles avec l'incertitudes liée aux modèles**(c)** ; **(e)** Projections des changements dans la distribution du Hêtre prévus par les modèles étudiés à l'horizon 2055 (stabilité, vert ; colonisation en bleu et retrait en rose) ; **(f)** cartographie pour le choix des essences où on distingue en vert foncé la prédiction de présence de l'essence conjointement pour les climats actuel et futur par les trois modèles, et la prédiction de présence du Hêtre conjointement pour les climats actuel et futur par au moins un des trois modèles.

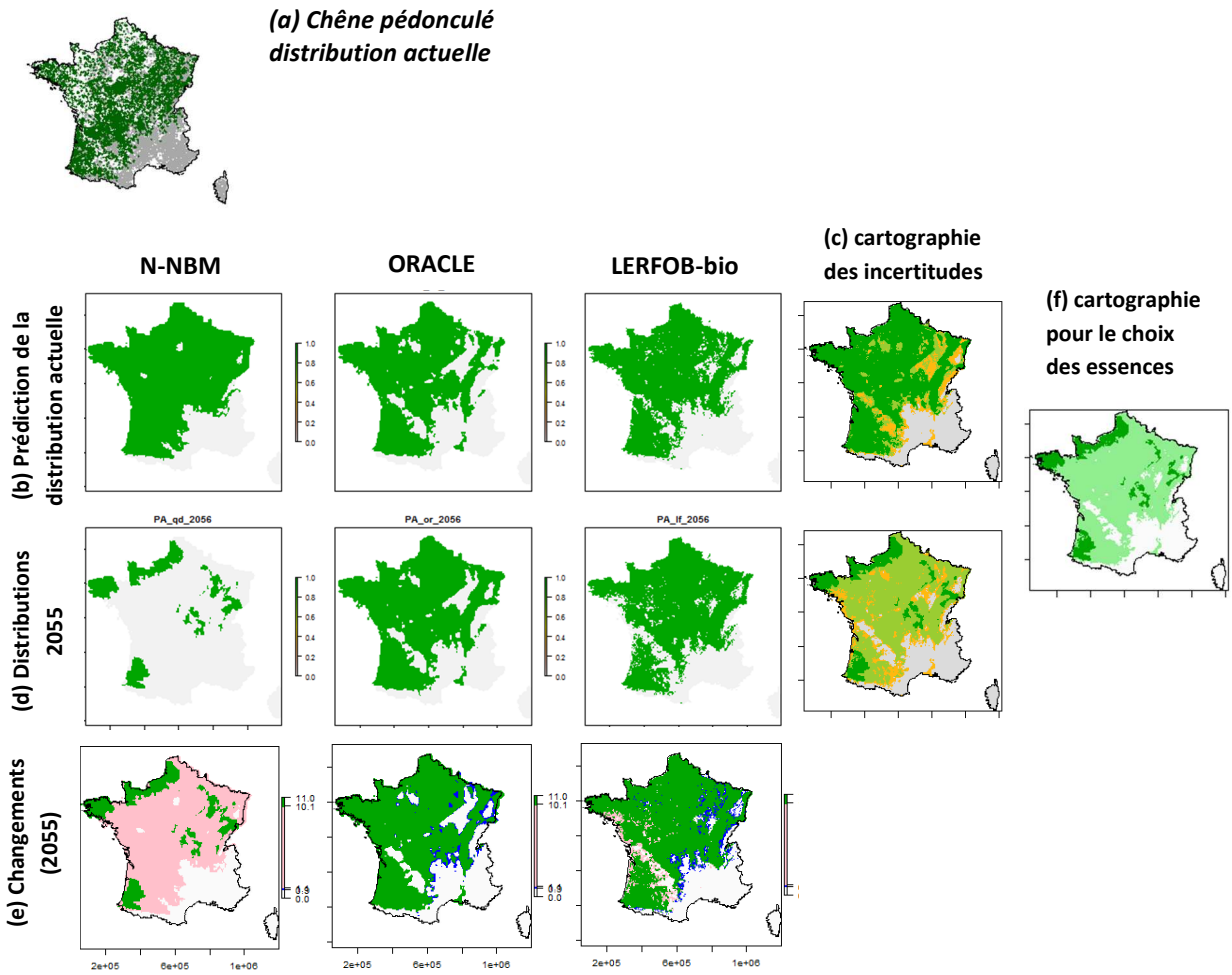


Figure 9 : Distribution du Chêne pédonculé dans le scenario climatique actuel : **(a)** Distribution actuelle du Chêne pédenculé observé sur les données de l'IN ; **(b)** prédite par chacun des trois modèles (vert= présence; gris= absent) et **(c)** par l'ensemble des trois modèles avec l'incertitudes liée aux modèles (hêtre prédit présent dans : 0,1,2 ou 3 modèles, respectivement blanc, orange, vert clair, vert foncé). **(d)** Prévision future de la distribution du Chêne selon chacun des trois modèles et par l'ensemble des trois modèles avec l'incertitudes liée aux modèles **(c,** même légende que fig. 8) ; **(e)** Projections des changements dans la distribution du Chêne pédenculé prévus par les modèles étudiés à l'horizon 2055 (stabilité, vert ; colonisation en bleu et retrait en rose) ; **(f)** cartographie pour le choix des essences où on distingue en vert foncé la prédiction de présence de l'essence conjointement pour les climats actuel et futur par les trois modèles, et la prédiction de présence du Chêne conjointement pour les climats actuel et futur par au moins un des trois modèles.

Conclusions : La taille de l'aire de distribution des essences, à l'échelle de la France, explique une bonne part de la qualité des modèles : On arrive à bien prédire la distribution des essences localisées et moins bien celle des essences disséminées (e.g. *P. sylvestre*). Les différents modèles dans un scénario climatique actuel donnent des distributions très cohérentes entre elles et avec la réalité. Les modèles qui intègrent des variables de sol précises sont un peu plus performants à l'échelle de la France, mais contrairement à ce qu'on aurait attendu, ils ne s'avèrent pas beaucoup plus performants à l'échelle de l'aire de distribution ce qui met en évidence que les modèles climatiques restent assez robustes quand on les applique à l'échelle de l'aire de répartition des essences (ou régionale). Les modèles de niche étudiés donnent des éléments

permettant d'identifier de manière formelle les facteurs qui contrôlent la distribution des essences et ainsi de mieux identifier les essences vulnérables face au changement climatique. Les fortes incertitudes associées aux modèles dans les projections futures pour certaines essences ne permettent pas d'appliquer ces modèles comme outil d'aide à la décision dans un contexte opérationnel. Par contre, elles permettent d'établir de façon formalisée le champ des possibles par les cartes de distribution future avec les incertitudes associées, utiles à des niveaux décisionnels stratégiques. La compréhension des facteurs derrières les divergences d'aire de répartition future associés aux différents modèles soulève de nouvelles questions qui permettront d'avancer dans les connaissances sur l'autoécologie des essences.

Partie 3 : Utilisation intégrée des nouveaux outils à l'échelle de la gestion d'une forêt dans un contexte de changement climatique

Auteur : Paulina Pinto. Ont contribué à la réflexion V. Badeau (EEF), E. Lacombe (LERFOB), M. Legay (ONF), V. Perez, Ch. Piedallu, I. Seynave (LERFoB).

Introduction : Dans un contexte de changement climatique, le gestionnaire doit tenir compte des changements à long terme quand il est confronté aux choix des essences lors de l'aménagement. Cette prise en compte vise à éviter la vulnérabilité potentielle des peuplements face au réchauffement. Aujourd'hui, les outils disponibles (catalogues de station couplés aux guides de sylviculture) ne tiennent pas compte des évolutions environnementales à long terme. Ceci nous a conduit à développer des outils et méthodes renouvelés qui intègrent le climat dans la définition des caractéristiques stationnelles et des potentialités des essences. L'objectif de cette dernière thématique développée au sein du Projet Interface ONF-INRA a été d'évaluer l'application, à l'échelle locale, des nouveaux outils de caractérisation des stations forestières et des potentialités des essences dans un contexte de changement environnemental. On a cherché plus précisément à répondre aux questions suivantes : (i) Peut-on appliquer à l'échelle du massif forestier les nouveaux outils de description du milieu basés sur la bio-indication et établis à l'échelle nationale ? (ii) Peut-on appliquer les modèles de distributions d'espèces et de potentialités de croissance pour le choix des essences à l'échelle d'un massif forestier ? (iii) Peut-on intégrer de façon formalisée l'impact attendu du réchauffement dans ces nouvelles approches ?

Matériel et Méthodes : On a utilisé un dispositif existant dans la forêt de Rupt-sur-Moselle, lequel a été complété conjointement par les laboratoires EEF et LERFOB dans le cadre de ce projet (Fig. 3, Partie 1). Cette forêt est située dans le massif des Vosges dans un contexte siliceux (grès, granites riches, granites acides) entre 550 et 880m d'altitude. On y retrouve une partie de forêt domaniale, de forêt communale (2 communes) et privée. Au total 168 placettes ont été réalisées sur un réseau de 100 à 200m avec inventaires floristiques et dendrologiques complets, descriptions des conditions écologiques et du sol et analyses de sol réalisées en laboratoire. Les conditions de sol ont de plus été décrites par bioindication à partir de la flore. Par croisement sous SIG de variables climatiques spatialisées avec les coordonnées des placettes, on a pu caractériser les conditions hydriques et thermiques des sites. Ces variables ont été intégrées dans les modèles de distribution et de croissance des essences (Hêtre, Erable sycomore, Sapin) pour prédire à l'échelle du point les potentialités de présence de ces essences.

Résultats : La méthode de bioindication à partir de la flore, en utilisant les valeurs indicatrices d'EcoPlant, nous a permis de distinguer les variations de milieu à l'échelle de 50m. La Figure 10

illustre la cohérence spatiale entre l'acidité mesurée et prédite par bio-indication, ainsi qu'avec le substrat géologique : coïncidence des pH <4 avec les grès acides (rose) et des pH>5.0 avec les granites riches des Vosges (vert). Ces résultats confirment l'approche à l'échelle de la parcelle des études stationnelles traditionnelles basées sur la bioindication par les plantes.

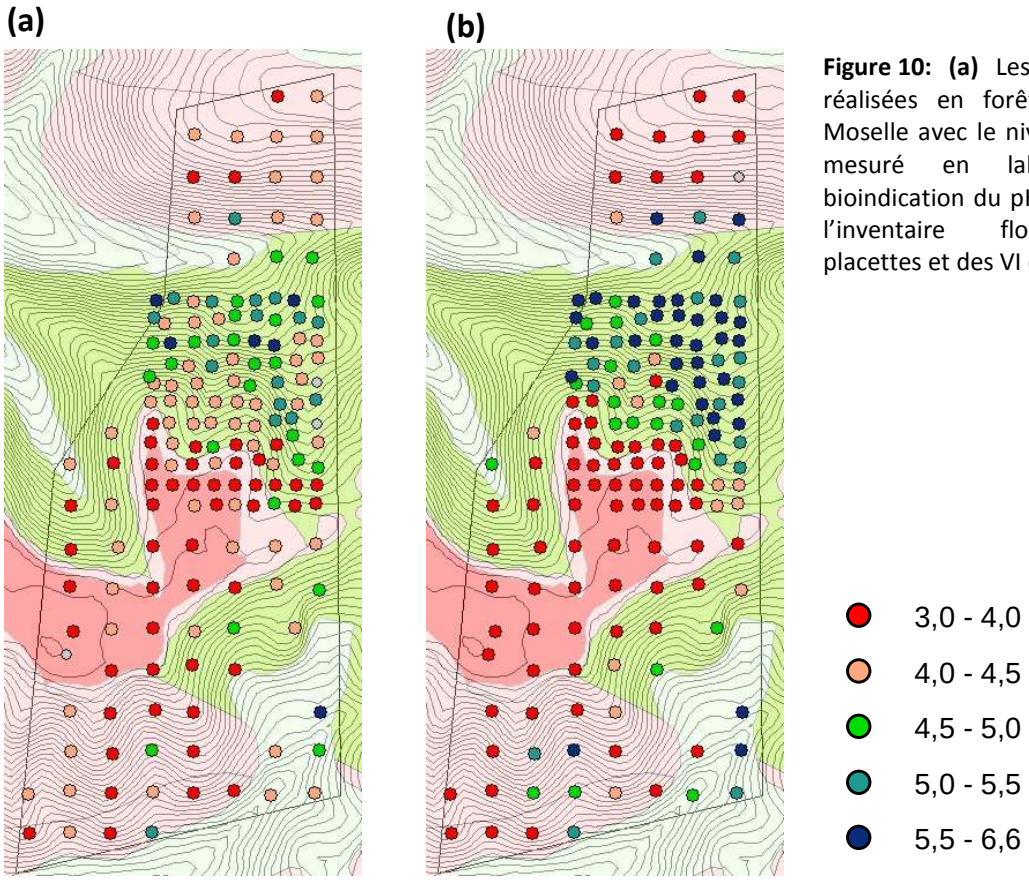


Figure 10: (a) Les 118 placettes réalisées en forêt de Rupt-sur-Moselle avec le niveau de pH eau mesuré en laboratoire. **(b)** bioindication du pH à partir de de l'inventaire floristique des placettes et des VI d'EcoPlant.

L'application de la nouvelle approche à l'échelle de la forêt, en utilisant comme variables d'entrées les variables de sol bioindiquées et climatiques issues des couvertures SIG ainsi que des modèles de distribution et de croissance d'essences est illustrée respectivement pour l'Erable sycomore (Fig. 11a) et le Hêtre (Fig.11b). Cette application met en évidence qu'il est possible d'appliquer à l'échelle de la forêt des modèles de distribution et de croissance calibrés à l'échelle nationale. Cela illustre que ces modèles reposent sur des variables explicatives qui peuvent varier très localement, et qu'ils sont assez sensibles et précis pour rendre compte de la variabilité locale de ces variables environnementales. Finalement, dans un contexte de changement climatique, les cartes prédictives de la distribution future des essences avec les incertitudes liées aux modèles utilisés (voir le chapitre précédent), fournissent une information utile sur l'évolution des habitats favorables pour une essence au sein de la forêt relativement au climat futur attendu. Cette évolution peut être contextualisé aux échelles nationales (Fig. 12a) et régionale (Fig. 12b).

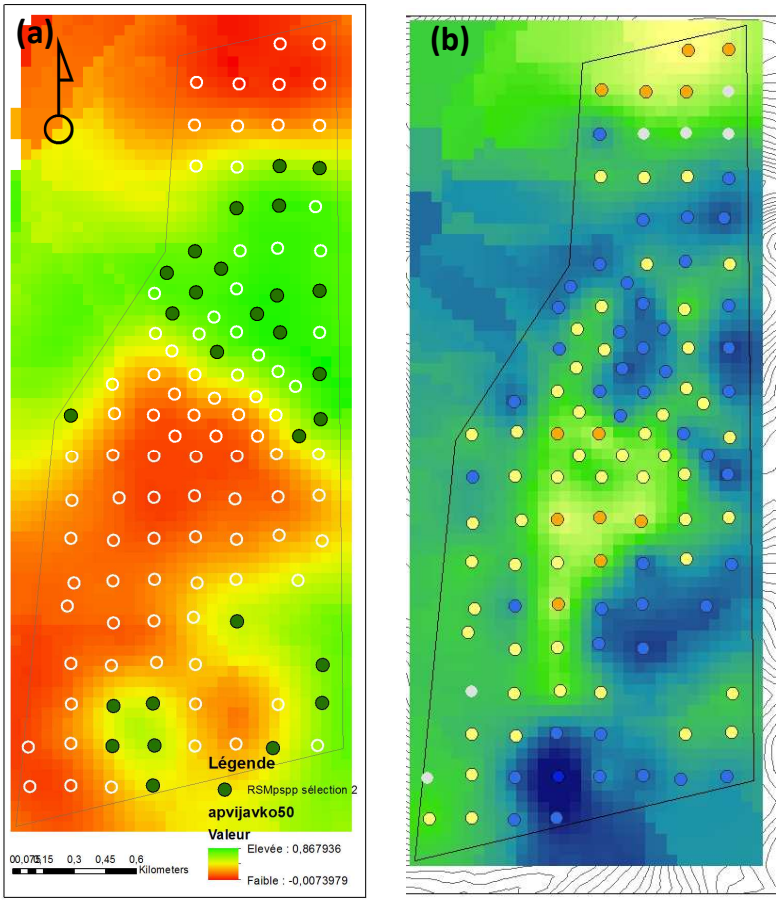


Figure 11: **(a)** Probabilité de présence de l'Erable sycomore à Rupt-sur-Moselle après krigeage des probabilités estimées pour chaque placette [rouge= faible probabilité de présence ; vert =forte probabilité de présence]. Les présences/absences observées sur les 118 placettes sont superposées et illustrent la pertinence locale du modèle prédictif défini à l'échelle nationale.
(b) Indices de fertilité estimés par placette puis interpolés par kriggeage (fond de carte).

Note : Modèle de distribution (a) Piedallu, et al. (2016) ; (b) croissance (Seynave, et al, 2005)

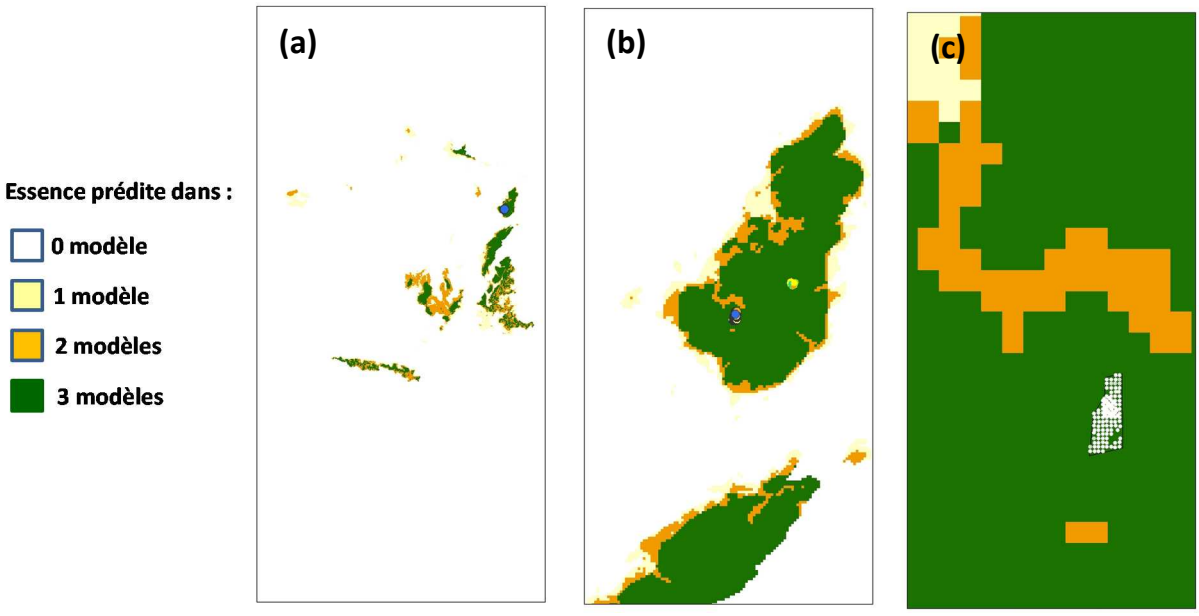


Figure 12. Carte des prédictions de présence du Hêtre dans un scénario climatique futur (2055) selon les trois modèles étudiés : LERFoB-Bio, Oracle (LERFoB), NBB (EEF) (voir partie précédente). **(a)** Position de Rupt-sur-Moselle à l'échelle nationale ; **(b)** Régionale ; et **(c)** locale.

Conclusions et perspectives

Ce projet d'Interface entre l'ONF et l'INRA a permis de développer une démarche innovante formalisée et cohérente qui relie formellement station et choix des essences, qui est intégrée de l'échelle du massif forestier à l'échelle nationale, qui permet d'intégrer l'impact du réchauffement climatique et qui est intégrée aux démarches scientifiques actuelles. **Cette démarche s'est avérée pertinente à l'échelle locale par son application dans plusieurs massifs forestiers dans des contextes écologiques différents (montagne-milieux acides à Rupt-Sur-Moselle et forêt Domaniale de Gérardmer, plaines calcaires à Villey-le-Sec - ces deux derniers cas n'ayant pas été illustrés dans ce rapport-).** En effet, la variabilité stationnelle, déterminée par la flore, est suffisamment fine pour permettre la prédiction des changements de distribution et de croissance (indices de fertilité) des essences naturelles attendues sur un massif forestier à partir de modèles calibrés à l'échelle de la France entière. Ces premiers résultats très prometteurs résultants d'une collaboration étroite entre équipes de recherche travaillant depuis des années sur les effets des changements climatique sur les forêts, devraient se poursuivre au sein de la future Unité (Ecologie Forestière du LERFOB – Phytoécologie de EEF) et par des collaborations avec la RDI de l'ONF pour des recherches plus appliquées qui permettraient le déploiement des résultats les plus robustes. Dans cette perspective le Projet de valorisation ForManClim présenté entre le LERFoB, la RDI de l'ONF et les Agences de l'ONF Versailles (Région Centre) et Argonne (Nord-Est) à l'Appel à Projet 2016 du Labex ARBRE (http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/?page_id=9609), permettra de tester à des échelles massif et sur des forêts en aménagement, l'applicabilité et la pertinence des nouvelles méthodes développées.

Forêt de Marly (Crédit photo ONF)

Réalisations et productions

5.1 Données acquises dans le cadre du projet Interface ONF-INRA

Dispositif avec des données flore chronométrées et variables écologiques associées

Dispositifs établis par le LERFOB et EEF et complétés dans le cadre du Projet Interface ONF-INRA. Ces placettes établies dans un maillage systématique (200-250 m) en forêts de :

- Rupt sur Moselle (n=68 ; Fig. 3 Partie 1)
- Xonrupt (Forêt Domaniale de Gérardmer ; n=54 ; Fig. 3 Partie 1)
- Forêt de Marly (n=8)
- 3 massif forestiers en Argonne (Aubréville, n=81 ; Cierges sous Montfaucon, n=178 ; Neuvilly, n=80)

Données mises à disposition respectivement sous forme de 4 fichiers format Excel (voir Table 3) et dont la structure et la définition des variables suit le format de la base de données EcoPlant. Pour la définition des variables consulter le dictionnaire de la base de données EcoPlant (Gégout, et al. 2005).

Cartographie des essences selon les différents modèles étudiés

- Cartographie à l'échelle nationale des zones de coïncidence/divergence pour le chacune des essences étudiées, pour la période 1990-2010 d'après trois types de modèles de distribution issus des productions des Laboratoires LERFOB et EEF (format GeoTiff, compatible avec ArcGis ; Table 3).
- Cartographie à l'échelle nationale des zones de coïncidence/divergence pour chacune des essences étudiées pour la période 2056 d'après trois types de modèles de distribution issus des Laboratoires LERFOB et EEF (format GeoTiff, compatible avec ArcGis, Table 3).
- Cartographie à l'échelle nationale combinant les zones de coïncidence/divergence pour chacune des essences étudiées pour le scénario climatique actuel et à 2056 d'après trois types de modèles de distribution issus des Laboratoires LERFOB et EEF (format GeoTiff, compatible avec ArcGis, Table 3).
  pjc021202

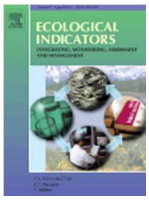
5.2 Projets réalisés et encadrement d'étudiants

Projet OBUP *Optimisation des méthodes de bioindication par les plantes de la qualité des sites forestiers: transfert vers la gestion forestière et la mise en place des dispositifs expérimentaux.*

Le projet OBUP a cherché à optimiser les protocoles permettant de bioindiquer les qualités nutritionnelles des sites forestiers. Il a été mis en évidence un temps optimum d'acquisition des données flore qui correspond le plus souvent au temps d'acquisition des 10-20 premières espèces rencontrées dans un relevé. Par ailleurs, l'effet du nombre et de la taille des placeaux unitaires, pour une surface d'environ un quart d'hectare sur l'estimation des caractéristiques nutritionnelles moyennes a également été étudié. OBUP a collaboré avec l'IGN afin de valider ces résultats pour différents contextes écologiques (plaine, montagne, sols acides, calcaires) en vue d'un transfert méthodologique pour l'aménagement forestier (ONF), l'inventaire des ressources forestières (IGN) et l'expérimentation (GIS Coopérative de Données sur la croissance des peuplements forestiers).

Akodad M. (2013). Détermination du pool d'espèces en vue de la prédiction des pH et C/N. Rapport de Master2 Mathématiques et applications. Université de Strasbourg, UFR Mathématique Informatique. 40 p. http://dumas.ccsd.cnrs.fr/docs/00/85/89/45/PDF/AKODAD_.pdf. Co-encadrement avec J.C. Pierrat.

5.3 Diffusion des résultats du projet d'interface au monde de la recherche



Pinto P.E., Dupouey J.L., Gégout, J-C., Hervé, J.-C., Legay, M. Optimizing bio-indication of forest soil characteristics using plant communities. Sous presse, *Ecological indicators*. [Annexe 1.1]

Pinto P.E., Dupouey J.L, Gégout J.C, Hervé, J.C., Legay M. Optimizing floristic survey for plant bio-indication of forest soil characteristics. Abstracts of the 58th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Sciences: Understanding broad-scale vegetation patterns. p298. Brno, Czech Republic, 19-24/07/2015. (Poster, summary and lightning talk) [Annexe 1.2 et Table 3]

Legay M., Bastien C., Bastien J.C., Bartet X., Davi H., Dhôte J.F., Ducousso A., Benito-Garzón M., Caquet T., Dreyfus P., Jambois A., Lefèvre F., Marçais B., Mengin-Lecreulx P., Micheneau C., Pinto P., Plomion C., Sardin T. (2015) Adaptation : vers un enrichissement du dialogue recherche-gestion. Innovation Agronomique 47, 121-130.

5.4 Diffusion des résultats du projet d'interface au monde de la gestion

Formations Continues

2014-2015 « Comprendre le rôle du climat sur la définition d'une station forestière » cours donnés dans la formation Continue nationale «Recueil des données stationnelles» de l'Office National des Forêts, Velaine (3,5 H/ an ; 15 stagiaires de l'ONF par session). 01/07/2014, 02/07/2015.

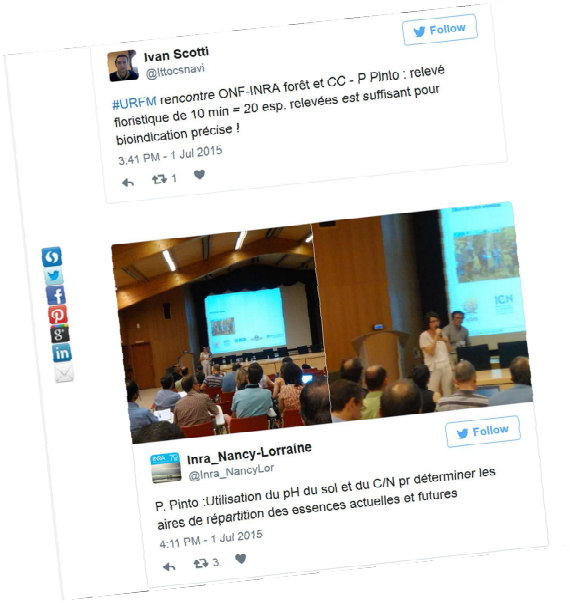
2014 « Adaptation des essences aux évolutions climatiques: Questions posées par les gestionnaires en forêt domaniale de Marly ».

Formation demandée par l'agence ONF de Versailles pour le service forêt (1 Responsable de service, 2 aménagistes, 2 animateurs sylvicoles, le Directeur d'agence, et 1 personne de chacune des 5 Unité Territoriales). 1 journée de cours en salle et sortie terrain. [Annexe 3 ; Table 3 pour les données]

Crédit photo : ONF - JL Témoin

Communications et séminaires professionnels

Pinto P. (2015) "Application à l'échelle locale de nouveaux outils d'aide à la decision". **Journées Brainstorming INRA/ONF** "Adaptation des forêts au changement climatique". 1-2/07/2015 Campus ONF Velaine-en-Haye, France. (Conférencier invité). (Table 3).



Pinto P. (2015) Séminaire Labex ARBRE « Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique » Restitution du Projet Interface ONF-INRA «Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant ». Nancy, France, 23/06/2015. Ce séminaire a réuni 40 participants : Chercheurs de l'INRA, de l'IGN, Enseignants chercheurs d'AgroParisTech, membres de la RDI et Gestionnaires de l'ONF, ainsi que des représentants de la forêt privée, d'ECOFOR et du réseau AFORCE.

Réalisation de trois présentations de 20 minutes suivies de 20' de discussion (*http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/?p=7900*) : (i) "Développement de nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle", discussion animée par Quentin Ponette (Prof. Univ. Louvain), (ii) "Les modèles de distribution comme

outils pour le choix des essences", discussion animée par Olivier Picard (resp. IDF), (iii) "Application à l'échelle locale des nouveaux outils d'aide à la décision forestière en contexte de changement climatique", discussion animée par Eric Lacombe (Prof. Sylviculture AgroParistech). **[Annexe 2 ; voir Table 3].**

Pinto, P.E. (2014) De la caractérisation stationnelle à l'estimation de la distribution et de la production pour le choix des essences : Apport des nouveaux outils d'aide à la décision en contexte de changement climatique. Café Réseau R&D Office National des Forêts. 12/12/2014, Nancy, France.

Pinto P.E., Gégout J-C, Piedallu C., Dupouey, J-L, Badeau V., Legay M. (2013). Modèles d'environnement et d'impact: adaptation et test à l'échelle du massif forestier. Réunion plénière Réseau R&D Office National des Forêts. 13-14/06/2013, AgroParisTech, Nancy. France.

Pinto P.E., Seynave, I.. (2013). OBUP, Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. Projet Valorisation de l'Appel à Projet LABEX ARBRE 2012. Présentation des résultats des projets retenus en 2012. Réunion scientifique annuelle d'ARBRE 21/10/2013. Champenoux. France.

Pinto P.E., Seynave, I., Gégout J-C, Piedallu C., Pierrat, J-C, Dupouey, J-L, Montied, P. (2012). OBUP, Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. Projet Valorisation de l'Appel à Projet LABEX ARBRE 2012. Journée de présentation des projets retenus 16/10/2012. Réunion annuelle 16/10/2012. Champenoux. France.

Pinto, P.E. 2014. OBUP Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. LabEx ARBRE – Newsletter. Printemps 2014. Edition N°2. http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/wp-content/uploads/2014/06/Labex-ARBRE-Newsletter-Printemps-2014-21.pdf

Seynave, I. Pousse, N. (2016) Regain d'intérêt pour les données sol en forêt ? Colloque « Les 1001 usages des données Sol ». Chambre Régionale d'Agriculture de Lorraine. 14/12/2016, Laxou, France.

5.5 Contenu du CD communiqué :

Table 3 : Description des fichiers communiqués

Dossier	Sous dossier/ « fichier »	Format	Contenu
Présentations	Seminaire LABEX de restitution / 1_session_23juin_2015 2_session_23juin_2015 3_session_23juin_2015	pdf	Pinto P. (2015) Séminaire Labex ARBRE « Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique » Restitution du Projet Interface ONF-INRA «Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant ». Nancy, France, 23/06/2015. Les 3 présentations du séminaire (Annexe 2.2, 2.3, 2.4).
	Pinto_Seynave_al_labex_OBUP_2012	ppt	Pinto P.E., Seynave, I., Gégout J-C, Piedallu C., Pierrat, J-C, Dupouey, J-L, Montied, P. (2012). OBUP, Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. Projet Valorisation de l'Appel à Projet LABEX ARBRE 2012. Journée de présentation des projets retenus 16/10/2012. Réunion annuelle 16/10/2012. Champenoux. France.
	Pinto_Seynave_labex_OBUP_2013	ppt	Pinto P.E., Seynave, I. (2013). OBUP, Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. Projet Valorisation de l'Appel à Projet LABEX ARBRE 2012. Présentation des résultats des projets retenus en 2012. Réunion scientifique annuelle d'ARBRE 21/10/2013. Champenoux. France.
	Pinto_brainstorming_ONF-INRA_2015	ppt	Pinto P. (2015) "Application à l'échelle locale de nouveaux outils d'aide à la decision". Journées Brainstorming INRA/ONF "Adaptation des forêts au changement climatique". 1-2/07/2015 Campus ONF Velaine-en-Haye, France. (Conférencier invité).
	Poster_IAVS_Pinto_Paulina_et_al	pdf	Pinto P.E., Dupouey J.L, Gégout J.C, Hervé, J.C., Legay M. Optimizing floristic survey for plant bio-indication of forest soil characteristics. Proceeding of the 58th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Sciences: Understanding broad-scale vegetation patterns. p298. Brno, Czech Republic, 19-24/07/2015. (Summary, Poster and lightning talk, Annexe 1.2)

Suite à la page suivante

Dossier	Sous dossier/ « fichier »	Format	Contenu
Données	« Argonne » (n=339)	xls	Données flore et description sol forêt d'Abréville Cierges-sous-Montfaucon et Neuvilly (Argonne)
	« Marly » (n=8)	xls	Données flore et analyses de sol, forêt de Marly, Versailles. (Interface)
	Rupt-sur-Moselle (n=53)	xls	Données flore chronométrés et analyses de sol (Interface)
	Xonrupt (n=68)	xls	Données flore chronométrés et analyses sol (Interface)
Cartes	« code essence_conv_ac » « code essence_conv_56 » « code essence_rc_ac56sum »	GeoTIFF	- Cartes de distribution potentielle avec les incertitudes liées aux différences de distribution prédites par les 3 modèles analysés pour le scénario climatique actuel « essence_conv_ac » et futur « essence_conv_56 ». Quatre types de pixel de 1 km^2 sont distingués : **[3]** espèce prédite présente pour les trois modèles; **[2]** espèces prédite présente pour deux des trois modèles et absent pour le troisième modèle; **[1]** espèce prédite présente pour un seul des trois modèles et absente pour les deux autres, **[0]** espèce prédite absente pour les trois modèles. - Cartes nationales de distribution incluant les incertitudes ou chaque pixel de 1km^2 représente : **[3]** la prédiction de présence de l'essence conjointement pour les trois modèles et pour les climats actuel et futur (*essence fortement conseillé*); **[2]** la prédiction de présence de l'essence, pour les climats actuel et futur, pour au moins un des trois modèles (essence *conseillé sous réserve des conditions locales*); **[0-1]** prédiction d'absence de l'essence dans le climat actuel et/ou futur par les 3 modèles, 1 à 3 modèles prédisent l'espèce présente dans le climat actuel ou le climat futur (*essence déconseillé)***.** Code essences : Fasy (Hêtre), Pisy (Pin silvestre), Quil (Chêne vert), Qupe (Chêne sessile), Qupu (Chêne pubescent), Quro (Chêne pédonculé)

Bibliographie

Adrianarisoa, K.S., Zeller, B., Dupouey, J-L., Dambrine, E. (2009) Comparision of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France. Forest Ecology and Management, 257, 2241-2253.

Allouche, O., Tsoar, A., Kadmon, R. (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). Journal of Applied Ecology, 43, 1223-1232.

Badeau, V. ; Dupouey, J.L. ; Cluzeau, C. ; Drapier, J. ; Le Bas, C. Climate change and the biogeography of French tree species: first results and perspectives. Loustau, D. (Editeur). Forests, Carbon Cycle and Climate Change. Versailles (FRA) : Editions Quae ; Update Sciences et Technologies. 2010 : 231-252.

Becker, M. & Le Goff, N. (1988) Diagnostic stationnel et potentiel de production. Revue Forestière Française, 40 n° spécial, 29-43.

Böhling, N., Greuter, W.W. and Raus, T. (2002) Indicator values for vascular plants in the Southern Aegean (Greece). Braun-Blanquetia, 32:1-109.

Bontemps, J.D., Herve, J.C., & Dhote, J.F. (2009) Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. *Forest Science*, 55, 549-564.

Bréda N. & Badeau V. (2008) Forest tree responses to extremes drought and some biotic events: towards a selection according to hazard tolerance? Geoscience, 340, 651-662.

Breda, N. ; Bosc, A. ; Badeau, V. Eléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. Brisson, N. ; Levrault, F. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Paris (FRA) : ADEME Editions ; 2010. 225-236.

Cajander, A.K. (1926) The theory of forest types. Acta Forestalica Fennica, 29, 1-108.

Cheaib A., Badeau V., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrêne E., François C., Gritti E., Legay M. , Pagé C., Thuiller W., Viovy N. and Leadley P. (2012) Model inter-comparison facilitates understanding and quantification of uncertainty in projecting climate change induced shifts in tree ranges. Ecology Letters 15, 533-544.

Coudun C., Gégout J.C., Piedallu C., Rameau J.C. (2006). Soil nutritional factors improve plant species distribution models: an illustration with *Acer campestre* L. in France. Journal of Biogeography, 33 : 1750-1763.

Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. Global Planet Change, 57, 16–26.

Diekmann, M. & Dupré, C. (1997) Acidification and eutrophication of deciduous forests in northwestern Germany demonstrated by indicator species analysis. Journal of Vegetation Science, 8, 855-864.

Duchaufour, P. (1948) Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française. Annales de l'école nationale des eaux et forêts, 11, 1-332.

Dupias, G. & Rey, P. (1985). Data for Phytoecological Area Zonation. Ministère de L'environnement Paris, France.

Ellenberg, H. (1974) Zeigerwerte der Gefäβpflanzen Mitteleuropas. Scripta Geobotanica, 9:1-97.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. and Paulièss, e.D. (1992) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica, 18:1-248.

Falkengren-Grerup, U. (1986) Soil acidification and vegetation changes in deciduous forest in southern Sweden. Oecologia, 70, 339-347.

Gégout J.C., Hervé J.C., Houllier F., Pierrat J.C. (2003) Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. Journal of Vegetation Science 14 (1): 55-62.

Gégout J.C., Coudun C., Bailly G., Jabiol B. (2005). EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science,* 16 (2) :257-260.

Gégout, J.-C. (2008) Validation de bioindicateurs floristiques pour la surveillance de l'état nutritionnel des sols forestiers français à partir des données de l'Inventaire Forestier National. Agroparis-tech-ENGREF— Inventaire Forestier National.

Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling, 135, 147-186.

Hawkes, J.C., Pyatt, D.G. & White, I.M.S. (1997) Using Ellenberg indicator values to assess soil quality in British forests from ground vegetation - a pilot study. Journal of Applied Ecology, 34, 375-387.

Hill, MO., Mountford, J.O., Roy, D.B. and Bunce, R.G.H. (1999) Technical Annex - Ellenberg's indicator values for British plants. Centre for Ecology and Hydrology, Institue of Terrestrial Ecology, Department of Environment, Transport and Regions.

Host, G.E. & Pregitzer, K.S. (1991) Ecological species groups for upland forest ecosystems of northwestern Lower Michigan. Forest Ecology & Management, 43, 87:102.

Hutchinson, G.E. (1957) Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 22:415-427.

Lahti, T. (1995) Understorey vegetation as an indicator of forest site potential in southern Finland. Acta Forestalia Fennica, 246, 68.

Lameire, S., Hermy, M., & Honnay, O. (2000) Two decades of change in the ground vegetation of a mixed deciduous forest in an agricultural landscape. Journal of Vegetation Science, 11, 695-704.

Landolt, E. (1977) Ökologische zeigerwerte zur Schweizer flora. Veroffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Zürich.

Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmler, W., Nobis, M., Rudmann-Maurer, K., Schweingruber, F.H., Theurillat, J.P., Urmi, E., Vust, M. &Wohlgemuth, T. (2010) Flora indicativa. Ecological Indicator Values and Biological Attributes of the Flora of Switzerland and the Alps. Bern Stuttgart Wien, Haupt. 376 p.

Lebon E. & Badeau V., 2010. Potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières. Brisson, N. ; Levrault, F. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Paris (FRA) : ADEME Editions ; 2010. 247-254.

Legay, M. Gestion des forêts et changements climatiques : Où en sommes-nous ? [Communication écrite]. Colloque Forêts et enjeux d'avenir ; http://www.colloqueforet.u-psud.fr/ ; 2010/09/24-25 ; Paris (FRA). 2010.

Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., de Ruffray P., Brisse H., (2008). A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 320, 1768-1771.

Manel, S., Williams, H.C. & Ormerod, S.J. (2001) Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology* 38: 921-931.

Mérian, P., Bontemps J.D. (2013) Modélisation des relations environnement-productivité et environnement-distribution des principales essences françaises. Tâche 4.2. Projet ANR-10-CEPL-0011. Oportunités et Risques pour les Agro-écosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatiquE, socio-économiques et politiques en France (et en Europe) (ORACLE). 26/11/2013, *Présentation interne*.

Piedallu C., Gégout J.C. (2007). Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Annals of Forest Science*, 64, 899-909.

Piedallu C., Perez V., Gégout J.C., Lebourgeois F., Bertrand R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française* 61 (6) : 567-593.

Piedallu C., Gégout J.-C.; Bruand A.; Seynave I. (2011). Mapping soil water holding capacity over large areas to predict the potential production of forest stands. *Geoderma*., 160 : 355-366.

Piedallu Ch., Gégout J.C., Lebourgeois F., Seynave I. (2016) Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. Journal of Vegetation Sciences. Doi: 10.1111/jvs.12370.

Pignatti, S., Menegoni, P. and Pietrosanti, S. (2005) Valori di bioindicazione delle piante vascolari della Flora d'Italia. Bioindicator values of vascular plants of the Flora of Italy. Braun-Blanquetia, 39:3-95.

Pinto P.E., Gégout J.C. (2005). Assessing the nutritional and climatic response of temperate forest tree species in the Vosges Mountains. *Annals of Forest Science*, 62 : 761-770.

Pinto P.E., Gégout J.C., Hervé J.C., Dhôte J.F. (2008). Respective importance of ecological conditions and stand composition on *Abies alba* Mill. dominant height growth. *Forest Ecology and Management*, 255, 619-629.

Pinto P.E., Seynave, I., Gégout J-C, Piedallu C., Pierrat, J-C, Dupouey, J-L, Montied, P. (2012). OBUP, Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. Projet Valorisation de l'Appel à Projet LABEX ARBRE 2012. Journée de présentation des projets retenus 16/10/2012. Réunion annuelle 16/10/2012. Champenoux. France.

Pinto, P.E. 2014. OBUP Optimisation des méthodes de Bioindication par les Plantes de la qualité des sites forestiers : transfert vers la gestion forestière et la mise en place de dispositifs expérimentaux. LabEx ARBRE – Newsletter. Printemps 2014. Edition N°2. http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/wp-content/uploads/2014/06/Labex-ARBRE-Newsletter-Printemps-2014-21.pdf

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dumé, G. (1989) Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 1 : plaines et collines.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dumé, G. (1993) Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 2 : montagnes Institut pour le Développement, Paris.

Riou-Nivert, 2008. Changement climatiques, préparer l'avénir. Forêt-Entreprise, vol.182, 14-27.

Seynave, I., Gegout, J.C., Herve, J.C., & Dhote, J.F. (2008) Is the spatial distribution of European beech (Fagus sylvatica L.) limited by its potential height growth? Journal of Biogeography, 35, 1851-1862.

Seynave I., Gégout J.C., Hervé J.C., Dhôte J.F., Drapier J., Bruno E., Dumé G. (2005*). Picea abies* site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7) :1669-1678.

Seynave, I., Gégout J.C., Hervé J.C., Dhôte J.F., Drapier, J., Bruno, E., Dumé, G. (2004) Etude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN. Revue Forestière Française, 56, 537-550.

Seynave, I., Gegout, J.C., Herve, J.C., & Dhote, J.F. (2008) Is the spatial distribution of European beech (Fagus sylvatica L.) limited by its potential height growth? Journal of Biogeography, 35, 1851-1862.

Strong, W.L., Pluth, D.J., La Roi, G.H., & Corns, I.G.W. (1991) Forest understory plants as predictors of logepole pine and white spruce site quality in west-central Alberta. Canadian Journal of Forest Research, 21, 1675-1683.

Thimonier, H., Dupouey, J.L. & Timbal (1992) Floristic change in herb-layer vegetation of deciduous forest in the Lorraine Plain under the influence of atmospheric deposition. *Forest Ecology and Management*, 55, 149-167.

Thimonier, A., Dupouey, J.L., Bost, F., & Becker, M. (1994) Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. New Phytologist, 126, 533-539.

Wang, G.G. (1995) White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients. Can. J. For. Res., 25, 29-38.

Wilson, S.M., Pyatt, D.G., Malcolm, D.C., & Connolly, T. (2001) The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests. Forest Ecology and Management, 40, 101-116.

Annexe 1

Diffusion des résultats au monde de la recherche

1.1 Pinto P.E., Dupouey J-L., Hervé J.Ch., Legay M., Wurpillot S., Montpied P., Gégout J.C. “Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species”, sous presse, *Journal Ecological Indicators*..... 47-58

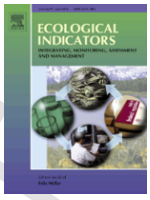
1.2 Pinto P., Dupouey J.L, Gégout J.C., Hervé JCh., Legay M., “Optimizing floristic survey for plant bioindication of forest characteristics”. Proceeding of the 58th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Sciences: Understanding broad-scale vegetation patterns. p298. Brno, Czech Republic, 19-24/07/2015. (Résumé, support lightning talk, Poster).....59-64

Ecological Indicators xxx (2016) xxx-xxx

Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Indicators

journal homepage: www.elsevier.com



Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species

Paulina E. Pinto [a, b, c, *], Jean-Luc Dupouey [a], Jean-Christophe Hervé [d], Myriam Legay [e], Stephanie Wurpillot [f], Pierre Montpied [a], Jean-Claude Gégout [b, c]

[a] INRA, UMR 1137 EEF, F-54280 Champenoux, France
[b] AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, F-54000 Nancy, France
[c] INRA, UMR 1092 LERFOB, F-54280 Champenoux, France
[d] Forest Inventory Laboratory, IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière), 11 Rue de l'Île-de-Corse, 54000 Nancy, France
[e] ONF RDI Office National des Forêts, Research and Development, 11 Rue de l'Île-de-Corse, 54000 Nancy, France
[f] IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière), 73 Avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé, France, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 November 2015
Received in revised form 19 May 2016
Accepted 25 May 2016
Available online xxx

Keywords:
Bioindication
Soil acidity
C:N ratio
Indicator value
EcoPlant database
Forest management

ABSTRACT

Soil moisture and nutritional characteristics are frequently assessed using plant species and community bioindication, e.g., the Ellenberg system of species indicator values. This method, based on complete inventories of plant species present in plots, is time-consuming, which could prevent its general use for forest or other natural land management. Our aim was to determine the impact of a reduction in the time spent to carry out a floristic inventory on the quality of soil characteristic assessment using plant bioindication. We compared the measurements of soil pH (pH), organic carbon to total nitrogen ratio (C:N) and base saturation (BS) in the 0–5 cm soil layer of 470 plots with the same variables estimated from floristic inventories of increasing duration, using plant indicator values (IV) from the EcoPlant database. The performance of predictions was evaluated by the square of the linear correlation coefficient between measured and predicted values (R^2) and the root mean square error (RMSE) of predictions.

The number rather than the percentage of total plot species used for the estimations was determinant for the prediction of soil pH quality. Performance of bioindication of pH, BS and C:N reached the maximum R^2 using the first 20–25 species recorded per plot, corresponding to a 14-min-long floristic inventory in comparison to a mean of 28 min spent to carry out a complete floristic inventory. A precision of prediction of 80% of the maximal precision was obtained after 4–5 min (6–12 inventoried species) for the three studied variables. These results are independent of the nutritional capability of the soils and were similar at the national and local scales. In order to estimate soil nutritional resources by plant bioindication, it is feasible to significantly reduce the time spent on floristic inventories and, thus, their cost. This is especially useful when the goal is to map the soil quality for decision-making in forest management.

© 2016 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

Forest management of temperate forests requires a detailed ecological characterization of forest sites. Bioindication of soil moisture and soil nutrition by the "presence" and "absence" of plant species at a site has long been used for this purpose (Duchaufour, 1948; Host and Pregitzer, 1991; Ponette et al., 2014; Wilson et al., 2001). Bioindication by plant species has also been used to predict the productivity of forest stands in Europe (Bergès et al., 2006; Nieppola, 1993; Proll et al., 2011; Seynave et al., 2005; Seynave et al., 2008) and in Northern America (Wang, 1995; Strong et al., 1991; Host and Pregitzer, 1991), or the probability of presence of individual species in European forests (Dupre and Diekmann, 1998; Coudun et al., 2006; Bertrand et al., 2012; Piedallu et al., 2016). In a global change context, plant species have been used to assess long-term changes in soil characteristics (Falkengren-Grerup, 1989; Ewald et al., 2013; Payne et al., 2013; Thimonier et al., 1994; Riofrio-Dillon et al., 2012; Verstraeten et al., 2013).

Using plants as bioindicators has several advantages in comparison to soil measurements conducted in the laboratory: (i) a lower cost and time; (ii) the possibility to predict several soil parameters from the same floristic survey; (iii) the fact that the floristic community represents the integrated expression of values of abiotic variables that can vary at high frequency in time and space (e.g., soil nitrogen) (Zonneveld, 1983); and (iv) in the absence of old direct soil measurements, bioindication becomes essential to evaluate long-term environmental changes when numerous old floristic inventories are available (e.g. Diekmann and Dupré, 1997; Falkengren-Grerup, 1989; Lameire et al., 2000; Thimonier et al., 1994). Among bioindication systems, the Ellenberg species indicator values (IV), based on the

* Corresponding author. Present address: AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, F-54000 Nancy, France.
Email addresses: paulina.pinto@agroparistech.fr, paulina.pinto.pro@gmail.com (P.E. Pinto); dupouey@nancy.inra.fr (J-L Dupouey); Jean-Christophe.Herve@ign.fr (J-C Hervé); myriam.legay@onf.fr (M. Legay); stephanie.wurpillot@ign.fr (S. Wurpillot); montpied@nancy.inra.fr (P. Montpied); jean-claude.gegout@agroparistech.fr (J-C Gégout)

http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.047
1470-160/© 2016 Published by Elsevier Ltd.

UNCORRECTED PROOF

ecological optimum of vascular plants, has been the most frequently used (Ellenberg et al., 1992). More recently, new sets of IV have been established for France based on soil measurements and formalized methods of estimation (see Gégout (2008) for pH). They have been effectively used to predict species distribution (Pinto and Gégout, 2005; Coudun et al., 2006; Piedallu et al., 2016) and tree species productivity (Seynave et al., 2005; Charru et al., 2014). In a climatic change context, the applicability at the local scale of formalized bioindication methods that link site environmental variables to tree-species distributions and productivity models became especially relevant to forest decision-makers in order to help them in the choice of more adapted tree species or provenances. However, bioindication using plants commonly relies on complete floristic surveys, inventorying the maximum possible number of species present in the studied site. This requires a major effort in terms of time and has limited applicability in forest management.

The purpose of this study was to assess the relationship between the time investment in plant surveys and the quality of bioindication of a site's nutritional characteristics, in order to make bioindication methods more accessible to forest managers. We hypothesized that bioindication performance increased with the number of species used for bioindication and the time spent in the field for flora inventory. Since the species with higher cover in the plot are recorded first and the proportion of misidentifications increases with the time spent since the start of the inventory (Archaux et al., 2006), we also hypothesized that bioindication performance decreased with the rank order in which species were surveyed in the field. We thus addressed the following questions: (i) To what extent does the number and the proportion of species per plot used for bioindication influence the quality of the assessment? (ii) What is the effect of increasing time inventories on bioindication quality? (iii) Is this effect the same for different predicted soil variables? (iv) To what extent does the rank order of species acquisition affect the quality of prediction? (v) Does the spatial scale at which the predictions are made (national v/s local) have any influence on the quality of the results? In order to analyze this scale effect, we compared the relationship between inventory time and quality of prediction at the national and local (forest) scales. The goal was to ensure the applicability of results to local management practices.

2. Materials and methods

2.1. Sampling sites and data collection

At the large scale, 304 plots were carried out by the French National Forest Inventory (NFI) over the entire French territory via a random selection of NFI plots carried out from May to September 2013, with plots located in mountains mainly inventoried during the summer period (see Robert et al. (2010) and for a presentation of the NFI method of survey). At the local scale, three forests were surveyed by the two research laboratories involved in the study using a systematic sampling grid of 250 m × 250 m to survey 58, 52 and 56 plots in the Villey-le-Sec, Rupt-sur-Moselle and Xonrupt forests, respectively (Fig. 1). The resulting forest network, located in north-eastern France, consists of a mature lowland forest (Villey-le-Sec) with broadleaved stands of *Fagus sylvatica* L., *Quercus petraea* Liebl. and *Carpinus betulus* L., located on the Lorraine Plateau, and mountain to subalpine forests (Rupt-sur-Moselle and Xonrupt) with mature broadleaved-coniferous stands composed mainly of *Fagus sylvatica*, *Abies alba*, *Picea abies* and *Acer pseudoplatanus,* located in the Vosges mountains. Geological substrates are calcareous limestone and marls covered by Tertiary and Quaternary acidic alluvia for Villey-le-Sec, whereas they are neutral to rich granitic rocks covered by poor sandstone in the Rupt-sur-Moselle forest, and poor granitic substrates adjacent to rich sedimentary substrates in the Xonrupt forest. These varied geological substrates lead to a broad variation of soil acidity and nutrient status in the sampled forests (Table 1).

In each of the 400-m^2 (local scale) or 700-m^2 (national scale) plots, vascular species in the understory layer and terricolous bryophytes were recorded. The understory layer comprised all species below 7 m in height at local scale. At national scale, it included all herbaceous and shrubby species, and tree species below 7.5 cm in diameter. The time at which species were sighted was recorded. The cover of each species in the plot was visually assessed using the Braun-Blanquet approach (Braun-Blanquet, 1932), after completion of the timed inventory. The total number of species recorded per plot was, on average, 32.9, 38.4, 26.3, 36.1 for the plots surveyed at the national level, Villey-le-Sec, Rupt-sur-Moselle and Xonrupt, respectively. The total inventory time per plot was, on average, 27.8′, 22.3′, 22.3′ and 26.9′ for the NFI dataset, Villey-le-sec, Xonrupt and Rupt-sur-Moselle, respectively.

In addition to the floristic inventory, one composite sample of the 0–5 cm soil layer (A-horizon) was obtained in each plot from five soil cores of 5 cm in depth, collected systematically within each plot. Soil analyses were conducted at the INRA-Arras laboratory and included soil pH-H_2O (1:5 in water, ISO 10390:1994), total nitrogen (N) and organic carbon (C) measured by dry combustion, which made it possible to calculate the C:N ratio, an indicator of nitrogen availability (Andrianarisoa et al., 2009). Protons were measured by titration and exchangeable Ca, Mg, K, and Al were extracted with cobaltihexamine at soil pH and measured by spectrometry. Base saturation (BS) was defined as: (Ca + Mg + K)/(Ca + Mg + K + Al + H).

2.2. Species indicator values

EcoPlant (Gégout et al., 2005), a phytoecological database for French forests that contains more than 3000 plots with complete floristic inventories and soil chemical analyses, was used to compute the indicator values (IV) of the most common forest species in France for acidity (3835 plots used), nitrogen (3547 plots) and mineral nutrition (2670 plots). Each species' probability of occurrence along each of the three environmental gradients was modeled using a logistic equation. The gradient value of higher probability of occurrence was used as the species IV (Ter Braak and Looman, 1986; Gégout et al., 2003). The efficiency of this IV system was compared to measurements (Gégout, 2006; Andrianarisoa et al., 2009) and was used to predict soil nutrients (Berges et al., 2006), as well as to develop and spatialize models of species distribution (Pinto and Gégout, 2005; Coudun et al., 2006; Bertrand et al., 2012; Piedallu et al., 2016) and growth (Seynave et al., 2005, 2008; Charru et al., 2014).

2.3. Estimation by indicator values (IV)

Using the EcoPlant indicator values (see Section 2.2 for description), the pH-H_2O, C:N ratio and BS variables were estimated for each plot of the studied datasets by calculating the mean IVs over all species present in the plot or over selected subsets of species (see Section 2.5 for calculation détails). Average was not weighted by species cover because it has been shown not significantly improve the bioindication performance (Hill and Carey, 1997; Schaffers and Sykora, 2000; Carpenter and Goodenough, 2014).

$$\hat{x}_{IVj} = \frac{1}{n_j} \times \sum_{\text{Species present in j}} v_i$$

UNCORRECTED PROOF

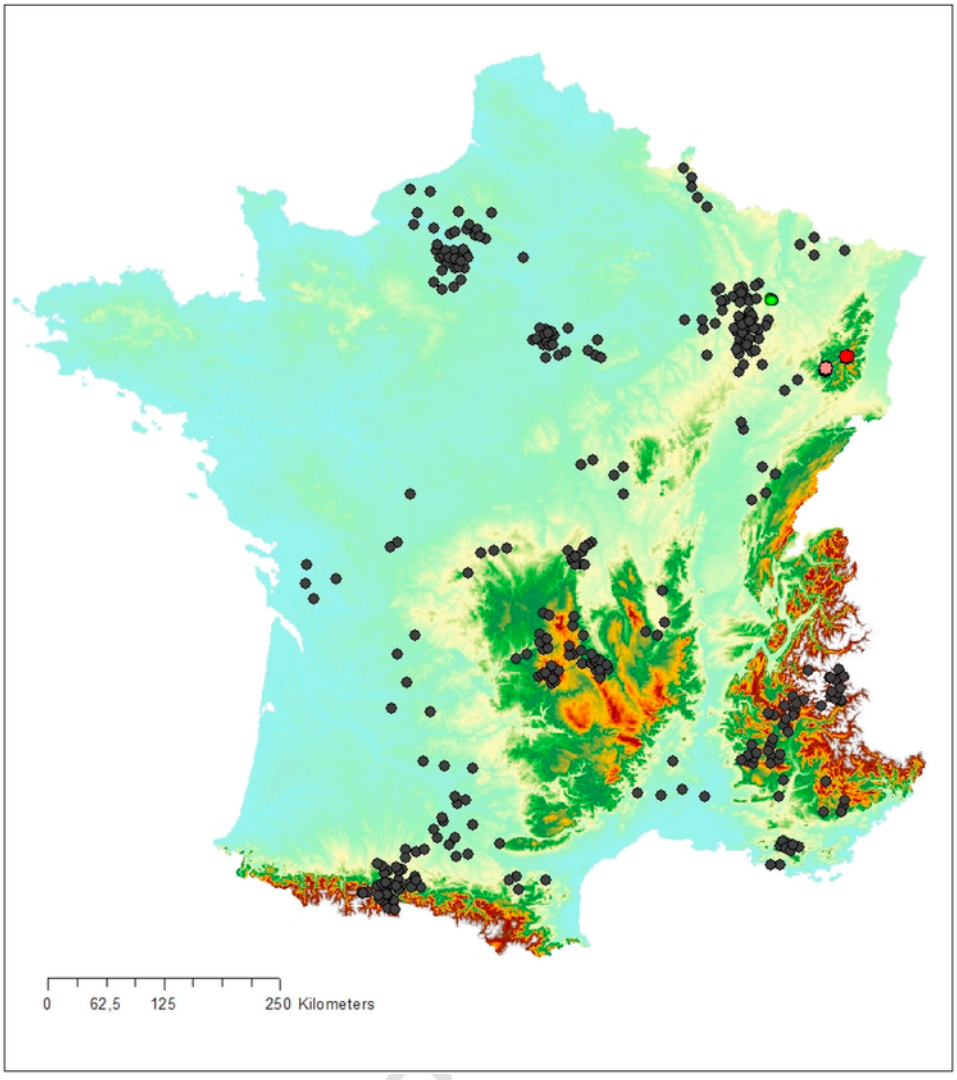


Fig. 1. Map of the 304 plots sampled over the entire French territory (black) and the location of the three sampled forests in northeastern France: Villey-le-Sec (green, n = 58), Rupt-sur-Moselle (red, n = 52) and Xonrupt (orange, n = 56). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.).

where v_i is the IV of species i and n_j is the number of all species present in the plot j or of the selected subsets of species.

2.4. Evaluation of predictions

Two complementary measurements were used to compare predicted values to measured values in order to evaluate the goodness of predictions. The first was the square of the linear correlation coefficient between measured and predicted values by a linear regression (R^2). R^2 is independent of any bias of predictions that can be corrected by the linear regression. It has the advantage that it allows the comparison between the goodness of predictions of different bioindicated variables. However, it is not adapted to compare the goodness of predictions between datasets that include very different ranges of values for the studied variable.

The second measurement of goodness of predictions was the root mean square error (RMSE) of predictions by bioindication:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{1/n \times \sum_{j=1}^{n} \left(\mathrm{xj} - \hat{\mathrm{x}}\mathrm{j}\right)^2}$$

where n is the number of plots, x_j is the measured value in the plot j, and $\hat{x}_j$ is the bioindicated value in plot j. The RMSE takes account of the bias of predictions with respect to measured values and the imprecision of predictions around this bias. It provides information about the error of predictions and allows the comparison between the goodness of predictions between datasets that include very different ranges of values for the studied variable. We therefore used the RMSE to compare the goodness of prediction between different soil acidity classes and between forests.

2.5. Effectiveness of partial floristic surveys

In order to study the effectiveness of partial floristic surveys, we analyzed the effects of the number and proportion of plot species se-

Table 1
Summary of site characteristics for the three sampled forests and the national dataset. Annual mean temperatures and precipitations are 9.6, 8.5, 6.6 °C and 803, 1919, 1955 mm for Villey-le-Sec, Rupt sur Moselle and Xonrupt, respectively.

Data set	Number of plots	Minimum	First quartil	Median	Third quartil	Maximum
France	304					
pH		3.7	4.8	5.9	7.3	8.5
BS (%)		9.0	62.9	98.7	99.8	100.0
C:N ratio		11.1	14.6	16.2	18.3	43.4
Elevation (m a.s.l)		16	193	372	822	2231
Temperature (°C)		3.9	8.9	9.8	10.6	14.7
Precipitation (mm)		496	753	900	1035	2129
Villey le Sec	58					
pH		4.4	5.4	6.1	6.8	8.0
BS (%)		40.0	96.1	99.0	99.4	99.9
C:N ratio		10.4	15.0	16.0	17.3	18.9
Elevation (m a.s.l)		219	273	283	293	309
Rupt sur Moselle	52					
pH		3.6	4.1	4.4	5.1	6.1
BS (%)		9.6	22.2	38.5	84.1	99.7
C:N ratio		11.9	14.8	16.7	19.1	23.5
Elevation (m a.s.l)		569	686	785	838	880
Xonrupt	56					
pH		3.5	3.9	4.0	4.2	4.7
BS (%)		8.9	15.3	22.2	35.3	76.7
C:N ratio		13.2	15.5	17.1	18.0	22.2
Elevation (m a.s.l)		789	896	1018	1100	1185

lected on the prediction quality of the pH-H_2O. For each plot in the national dataset (n = 304), bioindicated pH-H_2O was computed for an increasing number (1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30) or proportion (5, 10, 15, 20… 100%) of species present in the plot, including species according to their inventory order. This was done for four different levels of species richness (10–15; 15–20; 20–30; 30–40 species per plot). For each level of species number/proportion, predicted values were compared to measured values in order to evaluate the goodness of predictions by the square of the linear correlation coefficient (R^2).

Second, we graphically analyzed the relationship between the number of species surveyed and the time spent in the field from the beginning of the floristic survey (time-effort). We then studied the effect of time-effort on bioindication quality. For each plot in the national dataset, the bioindicated variables were computed for an increasing time-effort (*time* = 1, 2, 5, 7, 10, 15, 20, 25…50′), and the goodness of predictions was evaluated using the square of the linear correlation coefficient (R^2). In order to detect changes in the quality of predictions in siliceous and calcareous contexts, the dataset was then stratified according to four soil acidity levels (pH ≤ 4.5, 4.5 < pH ≤ 5.5, 5.5 < pH ≤ 7.0, pH > 7.0), and predictions were compared using the RMSE.

To better understand the time-effort effect on the quality of prediction, we analyzed bioindication performance of pH for an increasing number of species per plot (*nb* = 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40) using three methods of selection of the subset of species: (i) random selection (1000 repetitions); (ii) according to the order of appearance of species in the plots; and (iii) according to the decreasing order of appearance of species in the inventory. Thus, for a given number of species and for the three methods of selection, predicted values of pH were computed from flora and correlated with measured values. The quality of predictions was again evaluated by the coefficient of determination (R^2) between predicted and measured values.

In the same way, but using local surveys, bioindication performances of pH, C:N and BS were evaluated at the local scale by the RMSE using predictions from flora and measured values from soil analysis in the laboratory. All analyses were computed with R software, version 2.15.2 (R Core Team, 2012).

3. Results

3.1. Effect of number and proportion of species on bioindication performance of soil pH

The performance of bioindication as measured by the R^2 between measured and bioindicated pH at national scale increased for an increasing number/proportion of species used (Fig. 2). As a consequence, the higher R^2 were observed for sites with the higher floristic richness. The relationship between the quality of prediction and the number of species was little or not affected by the total species richness of the plot on average (Fig. 2a). On the contrary, the performance of prediction for a given percentage of species per plot used

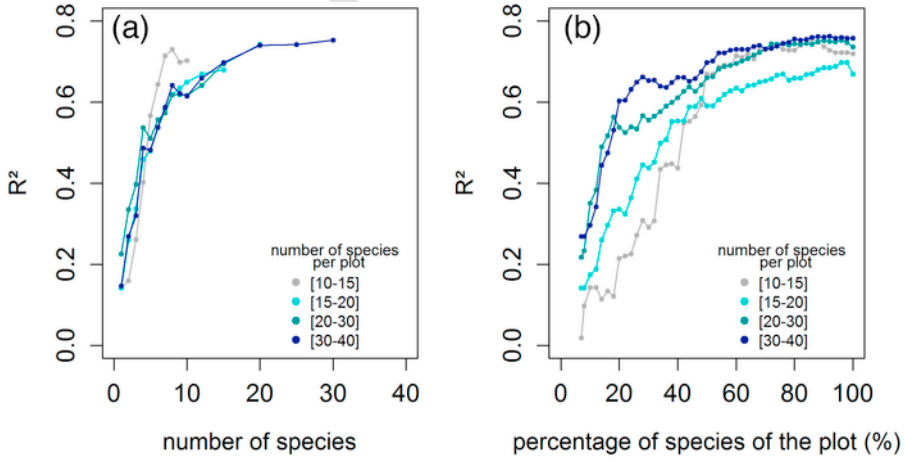


Fig. 2. Quality of bioindication measured by the square of the linear correlation coefficient between pH bioindicated from flora and pH measured from soil samples (0–5 cm layer) on 304 plots distributed over the entire territory of France, as a function of (a) the number of species per plot used for bioindication; and (b) the percentage of species used from each plot to predict the pH. Plots were stratified into four different levels of total floristic richness: 10–15, 15–20, 20–30, 30–40 species per plot.

CORRECTED PROOF

increased with the total species richness of the plot (Fig. 2b). These results highlight the fact that it is the number rather than the proportion of species taken into account in assessments that are of importance for the bioindication performance (Fig. 2a and b).

3.2. Time effect on prediction quality

Since the number of species per plot used in bioindication is determinant for the quality of predictions, we analyzed the relationship between the number of species and the time associated with the species during the field survey in order to study the effect of time-effort on prediction quality. Fig. 3a shows a high number of species surveyed at the beginning of the inventory, leading to an average of 20 species per plot recorded after 10 min, followed by a decrease in the acquisition speed.

A good quality of pH prediction was rapidly obtained after 10 min of inventory (Fig. 3b), with a maximum R^2 of 0.73 reached after 14 min and a precision better than 1 pH-unit (RMSE = 0.75). The quality of pH predictions using species IV increased very rapidly with time and then remained stable (Fig. 3b), probably because: (i) the number of species inventoried per minute decreased with time (Fig. 3a); (ii) the gain in R^2 decreased with the number of species used in bioindication after the first 4–5 species (Fig. 2a).

When we compared the evolution of bioindication performance as a function of time spent in the field between different site types, the best bioindication performance was reached earlier (10 min) in very acid to acid sites (pH <5.5) than in calcareous (pH >7) or neutral conditions (5.5 < pH < 7.0) where the best performance was reached in 15 and 30 min, respectively (Fig. 3c).

3.3. Effect of the order of species inventory on quality of predictions

We attempted to determine if the time effect was only related to the number of species used to evaluate bioindication performance or to the order of species recorded in the survey as well. To do this, we analyzed bioindication performance obtained for a given number of species for three different species selection samples in each plot: random selection, increasing and decreasing order of inventory.

Fig. 4a highlighted a significant effect of order of inventory on bioindication goodness from the fifth species, where higher performance was obtained with species taken in the order of their inventory in the field rather than with random selection. Moreover, the worst goodness of pH bioindication was observed when species were taken in the decreasing inventory order, highlighting the fact that the quality of information given by the last species surveyed in the field is less informative than that associated with the first species surveyed in the plot. To explain this, we explored the relationship between mean cover and order of species in the plot inventory, and highlighted a significant negative relationship between both variables (Fig. 4b). In consequence, the species first inventoried were those that occur locally with the greatest cover. These locally abundant species corresponded in our study to the most informative or pertinent species to predict soil fertility.

3.4. Generalization of results to nutritional variables (C:N and BS) and from the national to local spatial scale

In order to generalize the results to nutritional variables other than pH, we bioindicated the C:N ratio and base saturation (BS) of the A-horizon for the national dataset (n = 304) using an increasing number of species and time spent for the survey. Fig. 5a shows that the best bioindication goodness of pH (R^2 = 0.73; RMSE = 0.75) and BS

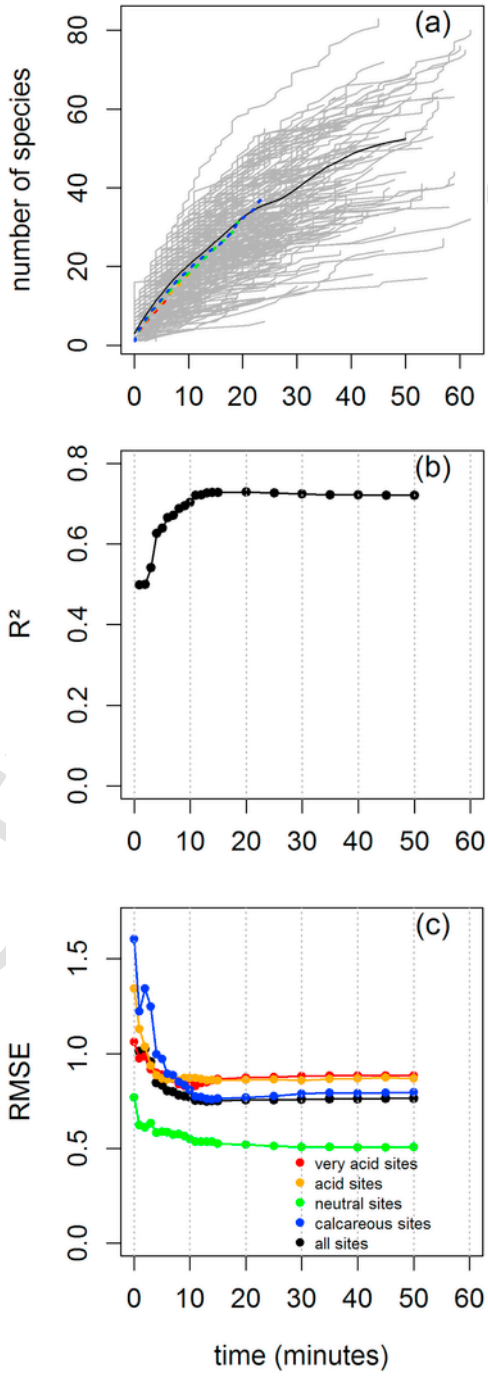


Fig. 3. (a) Trajectories of the number of species surveyed per plot as a function of time spent in the field. The gray lines show the evolution of the number of species surveyed on each plot according to time. The black line is the mean of the trajectories of the 304 studied plots. The red, orange, green and blue dotted lines: subsets of plots containing a minimum of 10, 15, 20, 25 species, respectively. (b) Evolution of the quality of soil pH bioindication (square of the linear correlation coefficient between bioindicated and measured pH) in relation to the time spent in the field (n = 304 plots). (c) Accuracy of pH predictions by bioindication (RMSE) for four levels of site acidity: very acid sites (pH ≤ 4.5); acid sites (4.5 < pH ≤ 5.5), neutral sites (5.5 < pH ≤ 7.0) and calcareous sites (pH > 7.0). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

(R^2 = 0.64; RMSE = 16.9) was reached with a smaller number of species (20 and 25 respectively) and less time of acquisition in the

UNCORRECTED

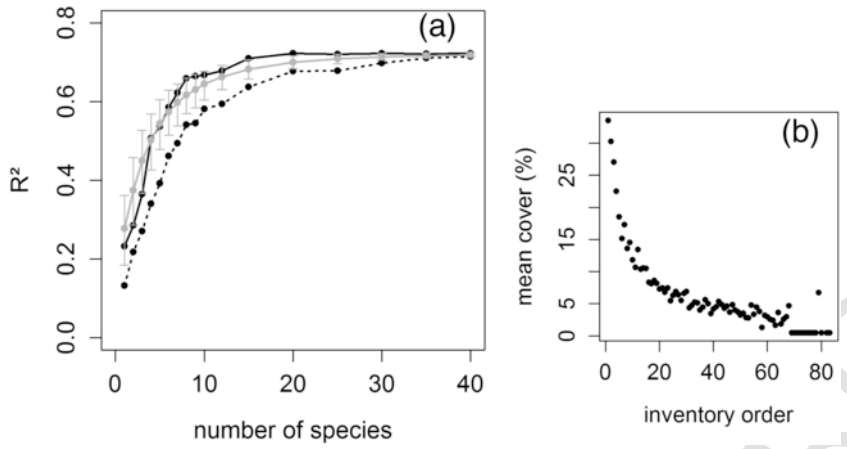


Fig. 4. Effect of the species inventory order in the plot on the quality of pH bioindication. (a) Goodness of fit (R^2) as a function of the number of species per plot included in predictions. The number of species was selected using: (i) random selection (gray continuous line representing the average of 1000 random selection with 95% confidence interval bars); (ii) the rank order of inventory in the field (black continuous line); (iii) the decreasing rank order of inventory (dotted black line) (n = 304 plots). (b) Species mean abundance (% of cover) as a function of its rank order in the plot inventory (n = 304 plots).

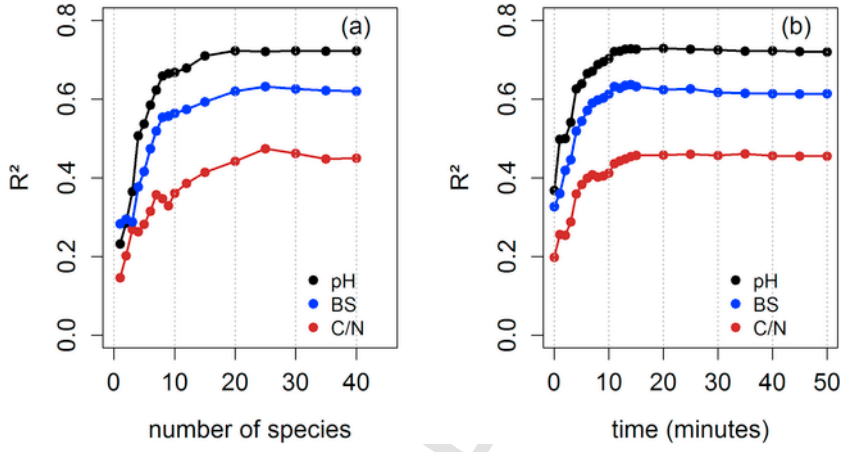


Fig. 5. Goodness of pH, C:N and BS bioindication evaluated by the square of the linear correlation coefficient between the measured and predicted values of pH, C:N and BS, respectively (n = 304, national dataset). Selection of plant species for bioindication was carried out as a function of (a) the number of species per plot included in predictions, and (b) the time spent per plot in the field for plant species inventory.

field (14 min) than the number and time necessary to reach the best C:N bioindication performance (R^2 = 0.47 and RMSE = 4.0), which were 25 species and 15–35 min, respectively. The number of species and the time spent for the floristic inventory to simultaneously optimize the efficiency of the prediction of the three nutritional variables are 25 species and 14 min, respectively. This number of species and time spent on floristic surveys makes it possible to reach a precision of prediction of 99.5% in average of the maximal precision obtained for each of the 3 variables. A precision of prediction of 80% of the maximal precision was obtained after 4–5 min (6–12 inventoried species) for the three studied variables.

We also studied the influence of the spatial scale (i.e., national vs. local) on bioindication goodness. We compared the national performances of pH, C:N ratio and BS bioindication with those observed with local data collected in the three forest datasets (Fig. 6). Forest curves of RMSE for measured and bioindicated values showed the same decreasing trend as the national curve with an increasing number of species used for bioindication. However, they showed a systematic shift towards higher or lower values of RMSE compared to national RMSE. Villey-le-sec forest shows better goodness of base saturation bioindication than national data or other studied forests. The strong difference observed can be explained by the dominant calcareous substratum present in this forest, which leads to measure and predicted BS values close to 100% (Table 1).

4. Discussion

Using plant species to assess soil nutritional variables have several advantages with respect to soil measurements in the laboratory (Diekmann, 2003). However, the approach is implicitly based on a traditional phytosociological methodology where a complete floristic inventory of plant species present at the study site is carried out. The time spent in the field and the botanical knowledge required to achieve a complete floristic survey have limited the applicability of bioindication at the local scale for forest or open land management. Forest or natural resources managers often require a network of various plots in order to assess and map the quality of sites in order to choose adapted species to be cultivated and to evaluate resource productivity. They thus need a relevant, formalized and low time-consuming method that can be used for a large number of plots. In our study, a large dataset with a timed floristic survey coupled with measured soil variables at the local and national scales allowed us to investigate the effectiveness of a partial floristic survey for the bioindication of soil variables. By comparing measured and bioindicated

IN REPORT PROOF

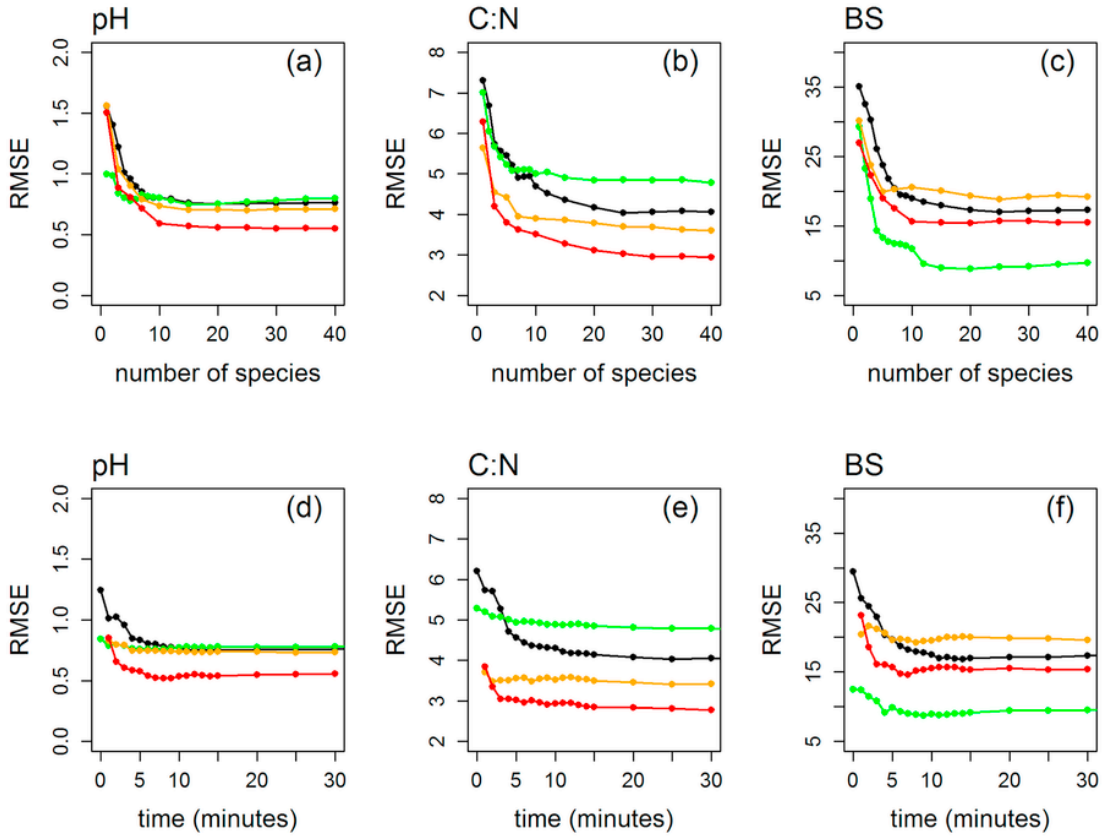


Fig. 6. Accuracy of pH, CN and BS predictions measured by the root mean square error (RMSE) of predictions as a function of the number of species used for bioindication (a,b,c) and the time of floristic inventory (d–f). Black line indicates the national dataset (n = 304) and color lines the three forest datasets: Rupt-sur-Moselle in orange (n = 52), Xonrupt forest in red (n = 56), Villey-le-Sec in green (n = 58). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

values of key variables of soil quality, we showed that it was possible to assess soil nutritional status with a partial plant species inventory and a short inventory time. Of course, this does not mean that complete floristic inventories should not be carried out for other purposes, such as mapping species presence or evaluate vascular plant species biodiversity.

4.1. Effect of the number of species and time effort on bioindication effectiveness

We observed from a national dataset covering a wide range of ecological conditions that the number of species inventoried at a site decreased after 10–20 min of sampling time. This result is in agreement with those of Archaux et al. (2006) that showed in two forests in Central France that the highest increase in the number of new species per plot occurs rapidly after the start of the survey and significantly decreases after 10 min. We obtained the same evolution of floristic data acquisition for forests in northeastern France and for the French national dataset that covers a wide range of ecological conditions (i.e., Mediterranean, lowland and mountain and forests in acid and calcareous contexts). In consequence, the good performance of bioindication obtained with approximately 20 species is reached after a floristic inventory of 10 min, independently of geographical scale, forest location or soil conditions. The rapid saturation of bioindication quality means that most species probably bring redundant information about soil characteristics, at least according to the information contained in the IV values we used.

Early works studied the effect of incompleteness floristic inventory on bioindication success, highlighting a weakly negative impact of the use of a proportion of plot species on bioindication effectiveness (Ewald, 2003). Our results are consistent with those of Ewald (2003), however we showed here that it is the number of species rather than the percentage of total number of plot species used for the estimation that determines the performance of the bioindication.

It is thus possible to define a given number of species, and consequently a homogeneous and predictable time lapse required for a soil assessment of a given quality, whereas a complete inventory has an unpredictable duration, which considerably varies with plot species richness.

4.2. Effect of the recording order of species on bioindication effectiveness

Bioindication goodness, using a given number of species, varied according to the order the species were recorded in the plot inventory, and was systematically higher for the species first inventoried as compared to the last ones. We also showed that the first species inventoried were those that occur with the higher cover in the plots. This result is consistent with the 'abundant-center' hypothesis (Brown, 1984), which postulates that abundance is highest in the center of a species' geographical range and declines towards the edges. The abundant-center hypothesis was extended to environmental gradients by Van Couwenberghe et al. (2013). By modeling the distribution of occurrence and abundance of species according to environmental variables including soil pH, these authors showed that the

UNCORRECTED PROOF

greatest species cover is more frequent at the optimal conditions and lower at less favorable conditions. Since the IV of a species is defined as the value of the variable that maximizes the presence probability of the species (Ter Braak and Barendregt, 1986; Gégout et al., 2003), and since these optima correspond to the greatest cover of species (Van Couwenberghe et al., 2013), we can hypothesize that the IV of the species with higher cover within a site are close to the real value of the environmental variable in the site. These species improve the bioindication goodness. Low abundant species in the plots include species that never occur with high cover and social species that can occur with high cover in their optimal ecological conditions. The IV of the first ones can be close to the real value of the environmental variable and thus improve the bioindication goodness, whereas the IV of the second ones are probably far from the real value of the environmental variable (Hubbell, 2001) and do not improve bioindication goodness (Ewald, 2003). Finally, an increase in the rate of misidentifications with the time spent since the beginning of the floristic inventory (Archaux et al., 2006) increases the risk of random IV introduction in the variable estimation when the inventory time increases. In consequence, the species firstly recorded during a floristic inventory may provide more precise information for bioindication.

4.3. Variations of bioindication performance among soil variables

The best bioindication performance (highest R^2) was obtained for pH and base saturation, which are closely related to calcium, magnesium and potassium nutrition and aluminium toxicity, whereas predictions of soil C:N ratio were farther from the laboratory measurements. The weak goodness in C:N ratio predictions using plant species can be attributed to the wide variability over time (Ellenberg, 1996; Lundell, 1987) and within plots of available nitrogen and the difficulty to find a relevant measured indicator of this variable (Andrianarisoa et al., 2009). It is also linked to the larger ecological amplitude of species for the C:N variable compared to their amplitude for pH and BS (Gégout, 2006). Furthermore, the higher performance of the assessment of soil acidity compared to C:N using EcoPlant's IV is consistent with the highest bioindication performance reached with Ellenberg's soil reaction IV compared to that of nitrogen at the regional (Szymura and Szymura, 2013) or large-spatial scales (Seidling and Fischer, 2008). Interestingly, a greater number of species and a higher cost in time were required to reach the highest R^2 of bioindication for the less easy-to-predict variable, C:N ratio, compared to the more predictable variables, BS and pH. These differences between performances for different variables suggests that our results should not be applicable to other, not yet tested, environmental variables, such as the estimation of soil moisture.

4.4. Applicability of results to local spatial scales

It has been pointed out that random variation in species composition might lower the bioindication quality in the case of short environmental gradients (Diekmann, 2003). Shifts in species realized niche between regions could also imply a change in bioindication quality at local scale (Wasof et al., 2013). Furthermore, several factors such as population dynamics, historical effects, sylviculture, forest composition and their interactions with soil nutritional variables could result in prediction bias at forest scale. It was shown that particular correlations between environmental factors such light and moisture at the local scale lead to a lower capacity of Ellenberg indicator values to predict the light level in some forests (Szymura et al., 2014). Thanks to a dataset combining the national and local scales, we could observe that the performance of bioindication at the local scale was close to that obtained at the national scale. The obtained results also showed that the difference in plot size between national (700 m^2) and local (400 m^2) datasets used in this study did not modify the goodness of predictions. This is in concordance with Otýpková (2009) who showed that mean IV for plots (using Ellenberg IV) revealed no differences among datasets with various plot sizes. The close evolution of the prediction goodness with the number of species or the inventory time between national and local scales also indicates that national results can be used at the forest scale for forest management purposes.

5. Conclusions and perspectives

When the objective is to estimate soil nutritional resources using plant species, and especially to map them, it is feasible to significantly reduce the time spent on floristic surveys and, therefore, their cost. This could make bioindication methods more easily accessible to foresters to assess site quality using plant species. In a climatic change context, the applicability at the local scale of formalized bioindication methods that link site quality to tree-species distribution and productivity models could be useful to forest decision-makers, to anticipate future evolutions for the present choice of tree species. These new applications at different scales (from the stand to the national level) reaffirm the utility of bioindication methods for forest management.

Acknowledgements

The authors wish to thank the National Forest Inventory teams who contributed to the field collection of data, as well as Patrick Bert, Sebastien Daviller and Fabien Spicher from the EEF and LERFOB Laboratories, for their much appreciated field work support. We also thank Gabriela Riofrio and Erwin Thirion, authors of the Villey-le-Sec dataset, and Jean Ladier, Noémie Pousse (ONF) and the three anonymous reviewers for their helpful comments on the manuscript. This study was supported by the French National Institute for Agricultural Research (Forest Grassland and Freshwater Ecology Department, EFPA) through the ONF-INRA Interface Grant, "*Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant*", and by the French National Research Agency (ANR) through the Laboratory of Excellence ARBRE (ANR-12-LABXARBRE-01).

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.05.047.

References

Andrianarisoa, K.S., Zeller, B., Dupouey, J.L., Dambrine, E., 2009. Comparing indicators of N status of 50 beech stands (Fagus sylvatica L.) in northeastern France. For. Ecol. Manage. 257, 2241–2253.

Archaux, F., Gosselin, F., Berges, L., Chevalier, R., 2006. Effects of sampling time, species richness and observer on the exhaustiveness of plant censuses. J. Veg. Sci. 17, 299–306.

Bergès, L., Gégout, J.C., Franc, A., 2006. Can understory vegetation accurately predict site index? A comparative study using floristic and abiotic indices in sessile oak (Quercus petraea Liebl.) stands in northern France. Ann. For. Sci. 63, 31–42.

Bertrand, R., Perez, V., Gegout, J.C., 2012. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of Quercus pubescens in France. Global Change Biol. 18, 2648–2660.

Braun-Blanquet, J., 1932. Plant Sociology, the Study of Plant Communities. Mc Graw Hill Book, New York.

Brown, J.H., 1984. On the relationship between abundance and distribution of species. Am. Nat. 124 (2), 255–279.

UNCORRECTED PROOF

Carpenter, W., Goodenough, A.E., 2014. How robust are community-based plant bioindicators? Empirical testing of the relationship between Ellenberg values and direct environmental measures in woodland communities. Community Ecol. 15, 1–11.

Charru, M., Seynave, I., Hervé, J.-C., Bontemps, J.-D., 2014. Spatial patterns of historical growth changes in Norway spruce across western European mountains and the key effect of climate warming. Trees 28, 205–221.

Coudun, C., Gégout, J.-C., Piedallu, C., Rameau, J.-C., 2006. Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with Acer campestre (L.) in France. J. Biogeogr. 33, 1750–1763.

Diekmann, M., Dupré, C., 1997. Acidification and eutrophication of deciduous forests in northwestern Germany demonstrated by indicator species analysis. J. Veg. Sci. 8, 855–864.

Diekmann, M., 2003. Species indicator values as an important tool in applied plant ecology—a review. Basic Appl. Ecol. 4 (6), 493–506.

Duchaufour, P., 1948. Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française. Annales de l'école nationale des eaux et forêts 11 (1), 1–332.

Dupre, C., Diekmann, M., 1998. Prediction of occurrence of vascular plants in deciduous forests of south Sweden by means of Ellenberg indicator values. Appl. Veg. Sci. 1 (1), 139–150.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Pauliflen, D., 1992. Zeigerwerte von pflanzen in mitteleuropa. Scr. Geobot. 18, 1–248.

Ellenberg, H., 1996. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Ulmer, Stuttgart.

Ewald, J., Hennekens, S., Conrad, S., Wohlgemuth, T., Jansen, F., Jenssen, M., Cornelis, J., Michiels, H.-G., Kayser, J., Chytry, M., Gégout, J.-C., Breuer, M., Abs, C., Walentowski, H., Starlinger, F., Godefroid, S., 2013. Spatial and temporal patterns of Ellenberg nutrient values in forests of Germany and adjacent regions—a survey based on phytosociological databases. Tuexenia 93–109.

Ewald, J., 2003. The sensitivity of Ellenberg indicator values to the completeness of vegetation relevés. Basic Appl. Ecol. 6 (4), 507–513.

Falkengren-Grerup, U., 1989. Soil acidification and its impact on ground vegetation. Ambio 18 (3), 179–183.

Gégout, J.C., Hervé, J.C., Houllier, F., Pierrat, J.C., 2003. Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. J. Veg. Sci. 14, 55–62.

Gégout, J.C., Coudun, C., Bailly, G., Jabiol, B., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. J. Veg. Sci. 16, 257–260.

Gégout, J.C., 2006. Distribution et caractère bioindicateur des espèces végétales forestières françaises vis-à-vis du sol et du climat. Mémoire du diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois. Nancy, AgroParisTech-ENGREF, 116.

Gégout, J.C., 2008. Validation de bioindicateurs floristiques pour la surveillance de l'état nutritionnel des sols forestiers français à partir des données de l'Inventaire Forestier National. Agroparis-tech-ENGREF—Inventaire Forestier National.

Hill, M.O., Carey, P.D., 1997. Prediction of yield in the Rothamsted Park Grass Experiment by Ellenberg indicator values. J. Veg. Sci. 8, 579–586.

Host, G.E., Pregitzer, K.S., 1991. Ecological species groups for upland forest ecosystems of northwestern Lower Michigan. For. Ecol. Manage. 43 (87), 102.

Hubbell, S.P., 2001. The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. Princeton University Press, Princeton.

Lameire, S., Hermy, M., Honnay, O., 2000. Two decades of change in the ground vegetation of a mixed deciduous forest in an agricultural landscape. J. Veg. Sci. 11, 695–704.

Lundell, Y., 1987. Nutrient variation in forest soil samples due to time of sampling and method of storage. Plant Soil 98 (3), 363–375.

Nieppola, J., 1993. Understorey plants as indicators of site productivity in Pinus sylvestris L. stands. Scand. J. For. Res. 8 (1), 49–65.

Payne, R.J., Caporn, S.J.M., Stevens, C.J., Carroll, J.A., Edmondson, J.L., Gowing, D.J., Dise, N.B., 2013. Inferring nitrogen deposition from plant community composition. Ecol. Indic. 26, 1–4.

Piedallu, C., Gégout, J.C., Lebourgeois, F., Seynave, I., 2016. Soil aeration, water deficit, nitrogen availability: acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. J. Veg. Sci. 27, 387–399.

Pinto, P.E., Gégout, J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. Ann. For. Sci. 62, 770.

Ponette, Q., Bispo, A., Brêthes, A., Dupouey, J.-L., Feix, I., Gégout, J.-C., Jabiol, B., Pousse, N., Ranger, J., 2014. Fertility indicators in temperate forest soils: issues, approaches and prospects. Rev. For. Fr. 66 (5), 501–515.

Proll, G., Dullinger, S., Dirnbock, T., Kaiser, C., Richter, A., 2011. Effects of nitrogen on tree recruitment in a temperate montane forest as analysed by measured variables and Ellenberg indicator values. Preslia 83, 111–127.

R Core Team, 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Riofrio-Dillon, G., Bertrand, R., Gégout, J.-C., 2012. Toward a recovery time: forest herbs insight related to anthropogenic acidification. Global Change Biol. 18, 3383–3394.

Robert, N., Vidal, C., Colin, A., Hervé, J.C., Hamza, N., Cluzeau, C., 2010. France. In: Tomppo, E., Gschwantner, T., Lawrence, M., McRoberts, R.E. (Eds.), National Forest Inventories—Pathways for Common Reporting. Springer Heidelberg, Dor-drecht, London, New York, pp. 207–221.

Schaffers, A.P., Sykora, K.V., 2000. Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements. J. Veg. Sci. 11, 225–244.

Seidling, W., Fischer, R., 2008. Deviances from expected Ellenberg indicator values for nitrogen are related to N throughfall deposition in forests. Ecol. Indic. 8, 639–646.

Seynave, I., Gégout, J.C., Hervé, J.C., Dhôte, J.F., Drapier, J., Bruno, E., Dume, G., 2005. Picea abies site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases. Can. J. For. Res. 35, 1678.

Seynave, I., Gégout, J.C., Hervé, J.C., Dhôte, J.F., 2008. Is the spatial distribution of European beech (Fagus sylvatica L.) limited by its potential height growth?. J. Biogeogr. 35, 1851–1862.

Strong, W.L., Pluth, D.J., Laroi, G.H., Corns, I.G.W., 1991. Forest understory plants as predictors of logepole pine and white spruce site quality in west-central Alberta. Can. J. For. Res. 21, 1675–1683.

Szymura, T.H., Szymura, M., 2013. Spatial variability more influential than soil pH and land relief on thermophilous vegetation in overgrown coppice oak forests. Acta Soc. Botanicorum Poloniae 82, 5–11.

Szymura, T.H., Szymura, M., Maciol, A., 2014. Bioindication with Ellenberg's indicator values: a comparison with measured parameters in Central European oak forests. Ecol. Indic. 46, 495–503.

Ter Braak, C.J.F., Barendregt, L.G., 1986. Weighted averaging of species indicator values: its efficiency in environmental calibration. Math. Biosci. 78, 57–72.

Ter Braak, C.J.F., Looman, C.W.N., 1986. Weighted averaging, logistic regression and the Gaussian response model. Vegetatio 65, 3–11.

Thimonier, A., Dupouey, J.L., Bost, F., Becker, M., 1994. Simultaneous eutrophication and acidification of a forest ecosystem in North-East France. New Phytol. 126, 533–539.

Van Couwenberghe, R., Collet, C., Pierrat, J.C., Verheyen, K., Gégout, J.C., 2013. Can species distribution models be used to describe plant abundance patterns?. Ecography 36, 665–674.

Verstraeten, G., Baeten, L., Van den Broeck, T., De Frenne, P., Demey, A., Tack, W., Muys, B., Verheyen, K., 2013. Temporal changes in forest plant communities at different site types. Appl. Veg. Sci. 16, 237–247.

Wang, G.G., 1995. White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients. Can. J. For.Res. 25, 29–38.

Wasof, S., Lenoir, J., Gallet-Moron, E., Jamoneau, A., Brunet, J., Cousins, S.A.O., De Frenne, P., Diekmann, M., Hermy, M., Kolb, A., Liira, J., Verheyen, K., Wulf, M., Decocq, G., 2013. Ecological niche shifts of understorey plants along a latitudinal gradient of temperate forests in north-western Europe. Global Ecol. Biogeogr. 22, 1130–1140.

Wilson, S.M., Pyatt, D.G., Malcolm, D.C., Connolly, T., 2001. The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests. For. Ecol. Manage. 140, 101–116.

Zonneveld, I.S., 1983. Principles of bio-indication. Environ. Monit. Assess. 3, 207–217.

UNCORRECTED PROOF

Supporting Online Material for

Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species

Paulina E. Pinto[1,3*], Jean-Luc Dupouey[1], Jean-Christophe Hervé[4], Myriam Legay[5], Stephanie Wurpillot[6], Pierre Montpied[1]; Jean-Claude Gégout[2,3]

***To whom correspondence should be addressed. E-mail:**
paulina.pinto@agroparistech.fr

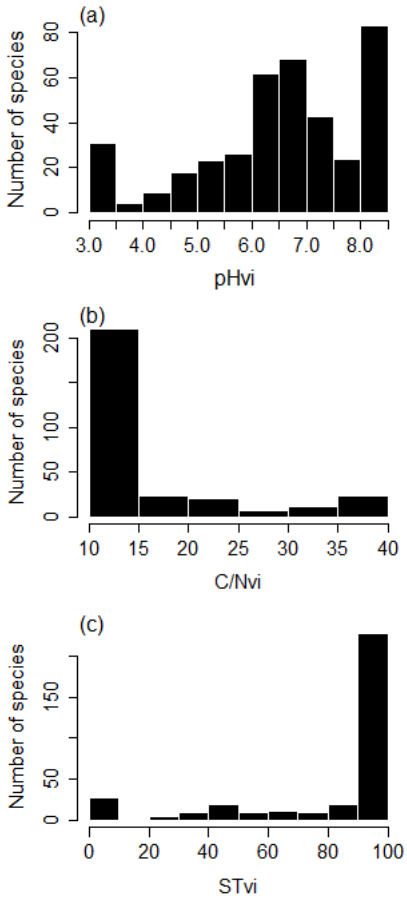
This pdf file includes:

Table 1: The 40 most frequent species in the national dataset (n=304). Their number of occurrence and mean abundance in the national data set is indicated, as well as their IVs for pH, CN ratio and BS. Absence of IV values means that species are large amplitude species for the variable.

Figure 1: Distribution of species' Indicator Values (IV) for: (a) pH, (b) CN ratio and (c) BS for species present in the national dataset (n=304).

Table 1: The 40 most frequent species in the national dataset (n=304). Their number of occurrence and mean abundance in the national data set is indicated, as well as their IVs for pH, CN ratio and BS. Absence of IV values means that species are large amplitude species for the variable.

Species	Frequency	Mean abundance	IV_{pH}	$IV_{C/N}$	IV_{BS}
Acer campestre	90	8.5	7.1	10	100
Acer pseudoplatanus	58		8.4	10	100
Anemone nemorosa	72	22.3	6.2	10	100
Arum maculatum	52	7.7	6.9	10	100
Atrichum undulatum	63	6.1	5.2	10.8	51
Brachypodium pinnatum	64	17.6	8.5	10	100
Brachypodium sylvaticum	99	13.9	6.9	10	100
Carex flacca	74	22.1	7.5	10	100
Carex sylvatica	84	11.4	6.4	10	100
Carpinus betulus	115		6	10	88
Castanea sativa	59		4.4	25.5	44
Cornus sanguinea	89	13.4	7.6	10	100
Corylus avellana	151	17.4	6.8	10	100
Crataegus monogyna	174	14.6	7	10	100
Dactylis glomerata	74	11.1	6.9	10	91
Deschampsia flexuosa	64	12.7	3	27.5	0
Dicranum scoparium	55	4.4	3	32	0
Dryopteris filix-mas	83	8.2	5.7	10	67
Euphorbia amygdaloides	53	9.4	6.6	10	100
Fagus sylvatica	152			19	
Fragaria vesca	89	13.1	6.6	10	100
Fraxinus excelsior	125		7.1	10	100
Galium aparine	54	10.6	6.7	10	96
Galium mollugo	58	2.3	8	10	100
Galium odoratum	59	15.7	6.4	10	93
Geranium robertianum	73	9.2	6.5	10	84
Geum urbanum	64	9.6	6.7	10	100
Hedera helix	163	30.6	6.5	10	100
Ilex aquifolium	67	12.8	4.3		
Ligustrum vulgare	78	23	7.3	10	100
Lonicera periclymenum	99	19.3	4.6	22.5	50
Lonicera xylosteum	78	8	7.4	10	100
Melica uniflora	52	14.2	6.2	10.8	86
Poa nemoralis	72	7.9	6	10	100
Polygonatum multiflorum	68	8.7	6.6	10	84
Polytrichum formosum	86	8.1	3	25.3	0
Prunus avium	110		6.3	10	86
Prunus spinosa	100	17.5	7	10	100
Pteridium aquilinum	67	24.1	3	32	24
Quercus petraea	90		3.9		26



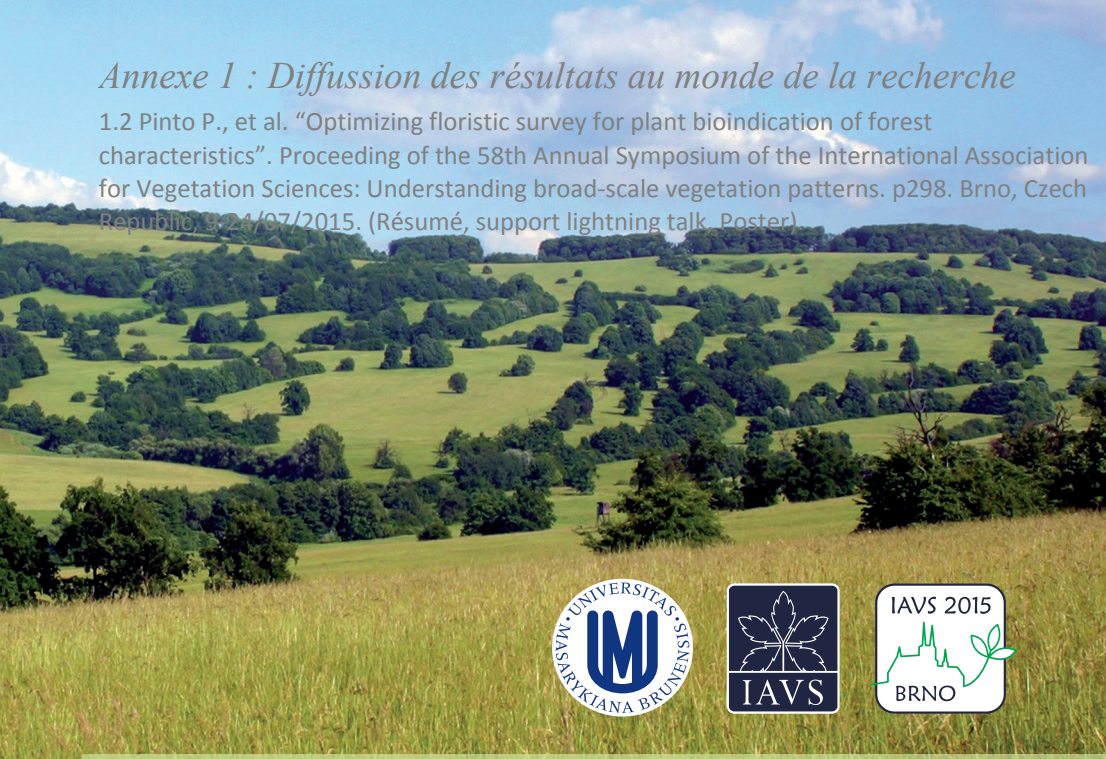
31

32 **Figure 1:** Distribution of species' Indicator Values (IV) for: (a) pH, (b) CN ratio and (c) BS

33
34

Annexe 1 : Diffusion des résultats au monde de la recherche

1.2 Pinto P., et al. "Optimizing floristic survey for plant bioindication of forest characteristics". Proceeding of the 58th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Sciences: Understanding broad-scale vegetation patterns. p298. Brno, Czech Republic, 19-24/07/2015. (Résumé, support lightning talk, Poster)



58th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science:

Understanding broad-scale vegetation patterns

19 – 24 July 2015, Brno, Czech Republic

Abstracts

www.iavs2015.cz

Poster with lightning talk G-10

Optimizing floristic survey for plant bio-indication of forest soil characteristics

Special session: Species and plant community responses along soil gradients

Paulina E. Pinto [1,2,*], Jean-Luc Dupouey [2], Jean-Claude Gégout [1], Jean-Christophe Hervé [3] & Myriam Legay [4]

[1]LERFOB, Laboratoire de Recherche Forêt Bois, AgroParisTech, Nancy, France; [2]EEF INRA-Lorraine University, Forest Ecology and Ecophysiology Unit, Champenoux, France; [3]Laboratory of Forest Inventory, IGN Institut National de l'information Géographique et Forestière, Nancy, France; [4]ONF R&D Office National des Forêts, Research and Developpement, Nancy, France

* Presenting author: paulina.pinto.pro@gmail.com

Questions: Is it possible to reduce the time spent in the field to carry out a floristic inventory when the goal is to estimate soil resources by bio-indication?

Location: Temperate French forests.

Methods: We worked both at a national and a local level to encompass the large variability of French forest ecosystems, and to ensure the applicability of results to various stand types and management practices. At the large scale, 329 plots were distributed over the entire French territory by a selection of National Forest Inventory plots. At the local scale, 166 plots were installed across three forests in northeastern France using a systematic sampling design. In each plot a timed floristic inventory was fulfilled and the pH (H_2O), C:N ratio and base saturation (BS) were measured in the laboratory from a sample of the A-soil layer. The same three soil parameters were predicted at the plot level from vegetation inventories using the pH, C:N ratio and BS species indicator values (IV) of the EcoPlant database. Using a resampling procedure, the plot bio-indicated values were computed for an increasing number or proportion of species, and an increasing time effort. Predicted values were compared with measured values and the performance of predictions was evaluated by: (i) the square of the linear correlation coefficient between measured and predicted values (R^2), and (ii) the root mean square error (RMSE) of predictions.

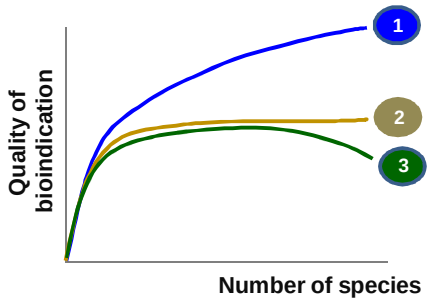
Results: The number rather than the proportion of species included in estimations was determinant for pH (H_2O) predictions' quality. Bio-indication of pH (H_2O) and BS was optimal using the first 20–25 species recorded per plot, corresponding to a 15–25 minutes long inventory. The C:N ratio showed a lower bio-indication performance with a greater number/time necessary to reach maximum goodness of prediction (25 species, 25–35', respectively). We evidenced that the order of species have a significant effect in the performance of the prediction, the first species being more informative than those recorded at the end of the plot inventory. Results were similar at the national and local levels.

Conclusions: When the objective is to estimate soil nutritional resources by plant bio-indication, it is feasible to significantly reduce the time spent on floristic inventory, and thus their cost. This is especially true when the goal is mapping of soil characteristics. Our results could help decision making in forest management, at both large and local levels, and national scale monitoring of soil changes.

G-10 Optimizing floristic survey for plant bioindication of soil forest characteristics

Dr. Paulina Pinto
INRA ï Champenoux, France

Are all species of a plot useful to bioindicate forest soil variables?



1. **All species are useful (they have the same role), so more species the more accurate the estimation**

2. **The abundant species, survey first, are enough to bioindicate, while the others donâ bring any useful information**

3. **The less abundant, surveyed last, are not in their ecological optimum, thus their perturb the estimation precision**

Interested?
Come and see me at stand G-10

Optimizing floristic survey for plant bioindication of soil forest characteristics

IAVS 2015 BRNO
58th Annual Symposium of the IAVS
19-24/07/2015

Pinto P.[12*], Dupouey J.L.[2], Gégout J.C.[1] , Hervé J.C.[3], Legay M.[4]

[1] LERFOB, Laboratoire de Recherche Forêt Bois, AgroParisTech, 12 rue Girardet, 54000 Nancy, France.
[2] EEF INRA-Lorraine University, Forest Ecology and Ecophysiology Unit, F-54280 Champenoux, France.
[3] Laboratory of Forest Inventory, IGN Institut national de l'information géographique et forestière, 11, rue de l'Île-de-Corse, 54000 Nancy, France.
[4] ONF R&D Office National des Forêts, Research and Developpement, 11, rue de l'Île-de-Corse, F-54000 Nancy, France.
* Email: paulina.pinto.pro@gmail.com

Introduction : Soil moisture and nutritional characteristics are frequently assessed using plant species and communities bioindication. This method, based on complete inventories of plant species present in plots, is time-consuming, which could prevent its general use for forest or other natural land management.

Questions: Is it possible to reduce the time spent in the field to carry out a floristic inventory when the goal is to estimate soil resources by bio-indication?

Methods: We worked in Temperate French forest ecosystems at both national and local scales. In each plot a timed floristic inventory was fulfilled and the pH-H2O, C:N ratio and base saturation (BS) were measured in the laboratory from a sample of the A-soil layer. The same three soil parameters were predicted at the plot level from vegetation inventories using the pH, C:N ratio and BS species indicator values (IV) of the EcoPlant database. Using a resampling procedure, the plot bio-indicated values were computed for an increasing number or proportion of species, and an increasing time effort. Predicted values were compared with measured values and the performance of predictions was evaluated by: (i) the root mean square error (RMSE) of predictions by bioindication, and (ii) the square of the linear correlation coefficient between measured from soil sampled and bioindicated values from flora (R2).

Data at national and local scales

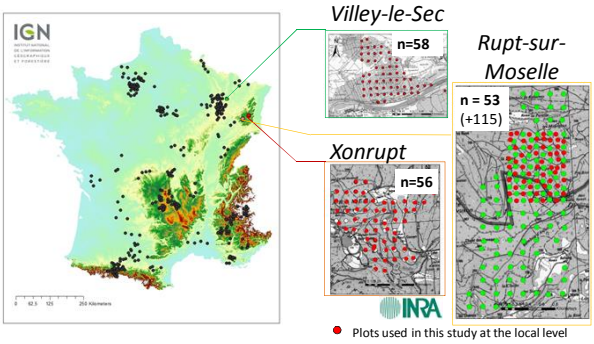
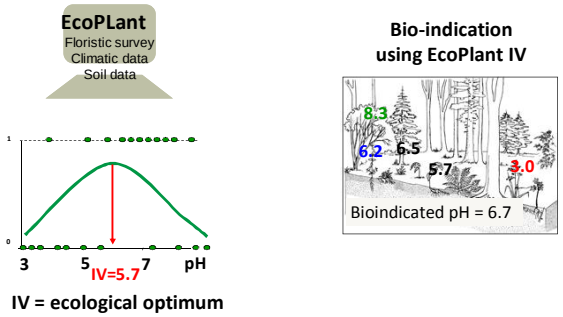


Fig. 1 Map of the 310 plots sampled over the entire French territory (black) by the National Forest Inventory and the location of the three sampled forests in northeastern France: Villey-le-Sec (n = 58), Rupt-sur-Moselle (red, n = 53) and Xonrupt (orange, n = 56).

Indicator values of French forest species and their use to diagnose forest soil variables



Results

Number, proportion, rank order of species in the inventory field

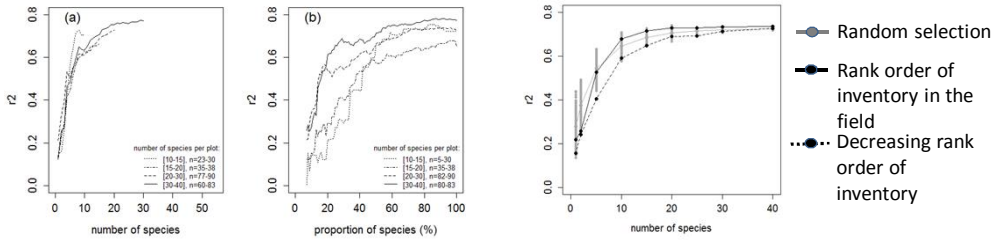


Fig. 2 Quality of bioindication measured by R2 between measured and bioindicated values of pH on the 310 plots (national scale), as a function of (a) the number of species per plot used for bioindication; and (b) the proportion of species in a plot used for bioindication.

Fig. 3 Goodness of pH bioindication (R2) as a function of the number of species per plot included in predictions. The number of species was selected using random, rank order and decreasing order of inventory.

National vs local scale

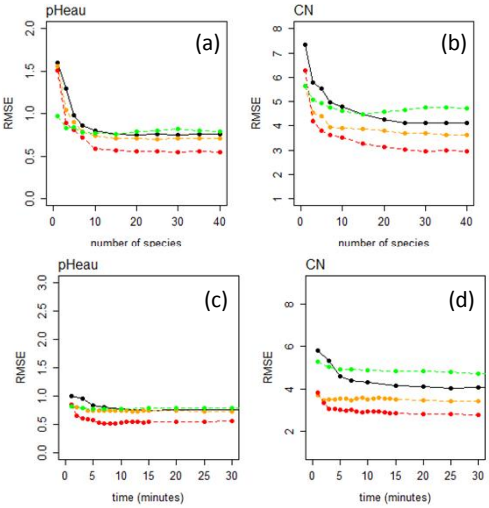


Fig. 5 Accuracy of predictions measured by the root mean square error (RMSE) of predictions as a function of the number of species used for bioindication (a,b) and time of plant inventory (c,d).

Time effect on prediction quality

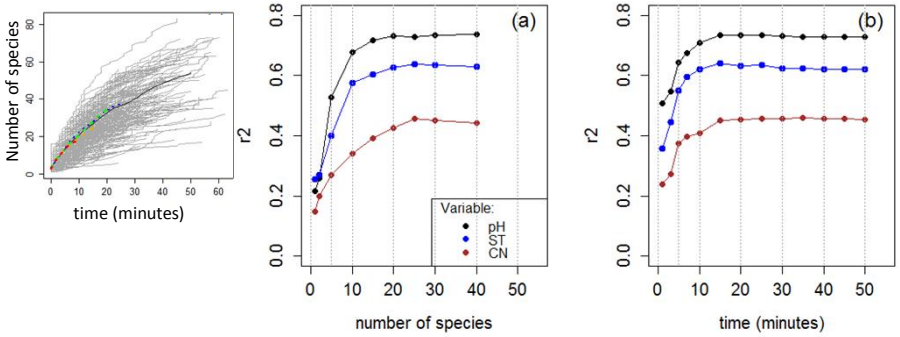


Fig. 4 Goodness of bioindication at national scale (R2 between the measured and predicted values of pH, C:N and BS), n = 310. Selection of plant species for bioindication was carried out as a function of (a) the number of species per plot included in predictions, and (b) the time spent in the field for plant species inventory

Conclusions: When the objective is to estimate soil nutritional resources by plant bio-indication, it is feasible to significantly reduce the time spent on floristic inventory, and thus its cost. This is especially true when the goal is mapping soil characteristics. Our results could help decision making in forest management.

Annexe 2

Séminaire pour diffusion des résultats au monde professionnel

Pinto P. (2015) Séminaire Labex ARBRE « Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique » Restitution du Projet Interface ONF-INRA «Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant ». Nancy, France, 23/06/2015.

2.1 Programme..... 67

Les trois présentations de ce séminaire :

2.2 Session 1 : « Développement de nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle » 69-80

2.3 Session 2 : « Les modèles de distribution comme outil pour le choix des essences » 81-100

2.4 Session 3 : « Nouveaux outils d'aide à la décision forestière contexte de changement climatique : Application à l'échelle locale » 101-116

Séminaire Labex ARBRE

Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique

Mardi 23 Juin 2015. AgroParisTech, campus Nancy, Amphi A

Séminaire de restitution du Projet Interface ONF-INRA «Station, distribution, croissance et choix des essences dans un contexte environnemental changeant »

13h30 *Café - Accueil des participants*

14h00-14h15 **Présentation**
Meriem Fournier, Directrice de Centre AgroParisTech, campus Nancy.

Session 1 Développement de nouveaux outils de caractérisation stationnelle
Animateur : Quentin Ponette, Professeur Université Catholique de Louvain.

14h15-14h55 Développement des nouveaux outils de caractérisation stationelle par bio-indication par les plantes. Paulina Pinto, Chargé de Mission Projet Interface ONF-INRA EEF/LERFOB, Nancy. (20 minutes d'exposé suivies de 20 minutes de discussion).

Session 2 Développement de nouveaux outils pour le choix des essences
Animateur : Olivier Picard Coordinateur RMT AFORCE

14h55-15h35 Modèles de distribution comme outils pour le choix des essences dans un contexte de changement climatique. Paulina Pinto, Chargé de Mission Projet Interface ONF-INRA EEF/LERFOB, Nancy. (20 minutes d'exposé suivies de 20 minutes de discussion).

Session 3 Application des nouveaux outils à l'échelle locale
Animateur : Eric Lacombe, Enseignant en Sylviculture, Equipe Sylviculture AgroParisTech

15h35-16h15 Application des nouveaux outils d'évaluation des potentialités forestières à l'échelle de l'aménagement forestier. Paulina Pinto, Chargé de Mission Projet Interface ONF-INRA EEF/LERFOB, Nancy. (20 minutes d'exposé suivies de 20 minutes de discussion).

16h15-16h30 **Conclusions**
Myriam Legay, Chef du Département RDI de l'ONF

Café final

Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique :

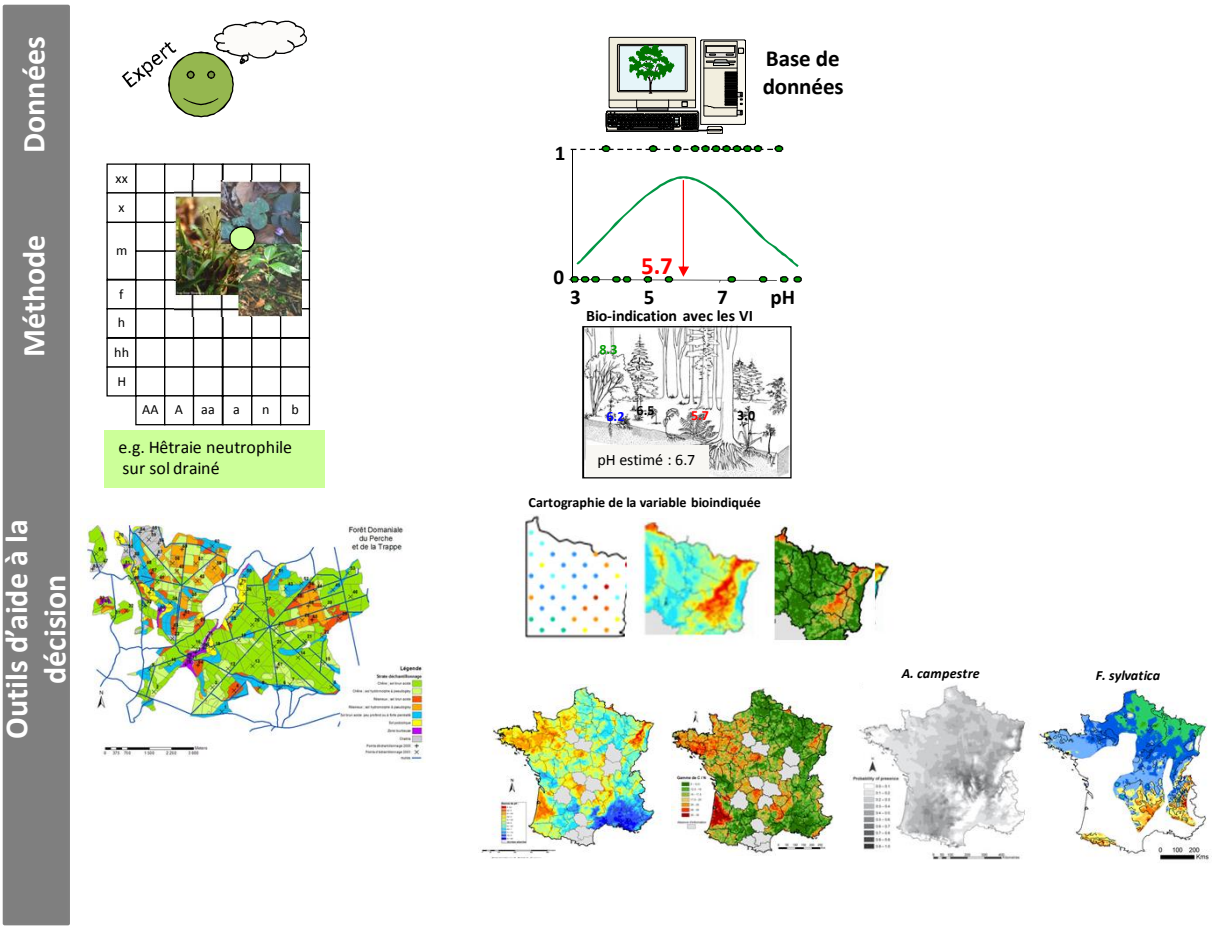
Session 1: Développement de nouveaux outils pour la caractérisation stationnelle.

Paulina Pinto
INRA (EEF – LERFOB)
Contact: paulina.pinto.pro@gmail.com

Animateur: Quentin Ponette, Professeur Université Catholique de Louvain

Autres participants : Dupouey, J-L, Gégout, J.C, Hervé J-Ch., Legay, M., Montpied, P., Seynave,I., Bher P., Daviller, S., Spicher F.

Nancy, 23 juin 2015



Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Objectifs

Optimiser la méthode de réalisation des relevés floristiques pour bio-indiquer les qualités nutritionnelles des sites afin qu'elle devienne utilisable en routine pour l'aménagement forestier

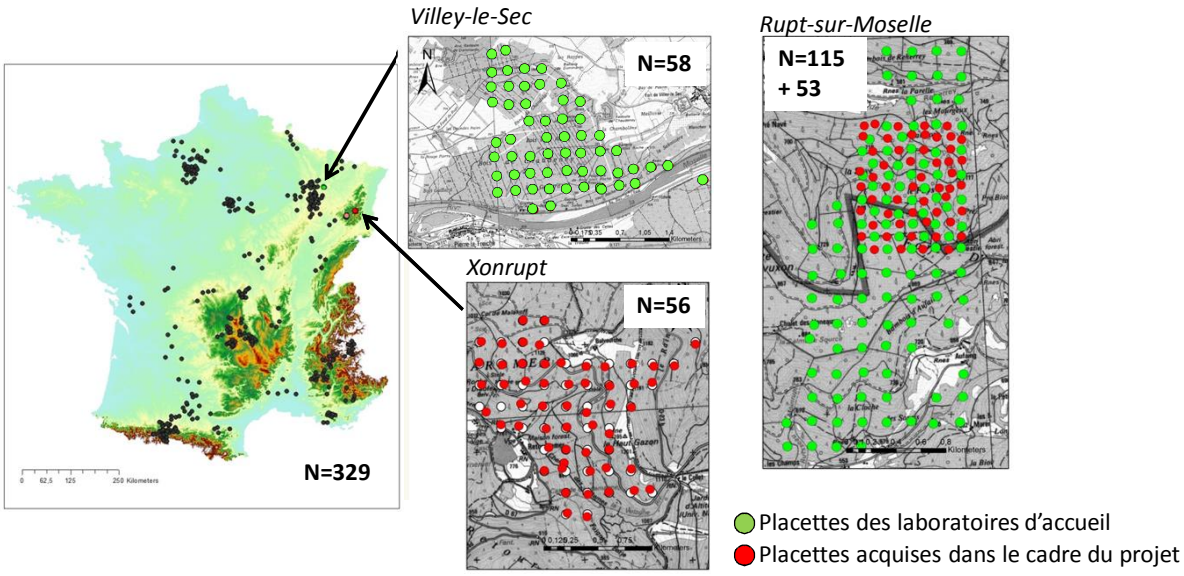
On a cherché à répondre aux questions suivantes:

- Comment la qualité de la bio-indication des caractéristiques du sol s'améliore avec le nombre d'espèces inventoriées sur chaque placette ?
- Est-il possible de réduire le temps passé sur le terrain à réaliser un relevé floristique dans l'objectif d'estimer par bio-indication l'acidité, la nutrition minérale et la nutrition azotée?

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Les données

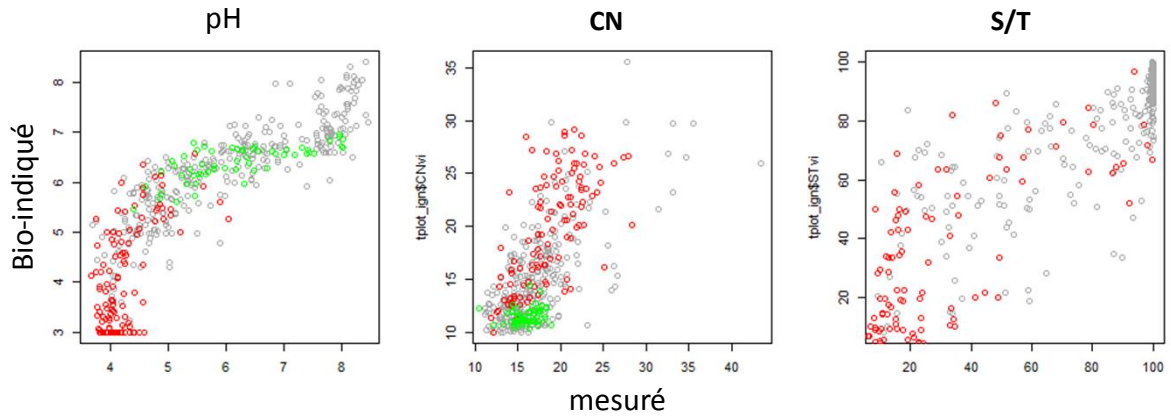
- Echelle nationale **(n=329 placettes)**. Acquisition de données flore-sol en collaboration IGN (2013).
- Echelle de la forêt : Villey-le-Sec, Xonrupt, Rupt-sur-Moselle
- Sélection par tirage aléatoire et par ordre d'apparition d'un nombre d'espèces croissant au sein d'un inventaire floristique. Prédictions avec les VI EcoPlant (moyenne des VI).



Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Les données

Distribution des placettes dans les gradients environnementaux

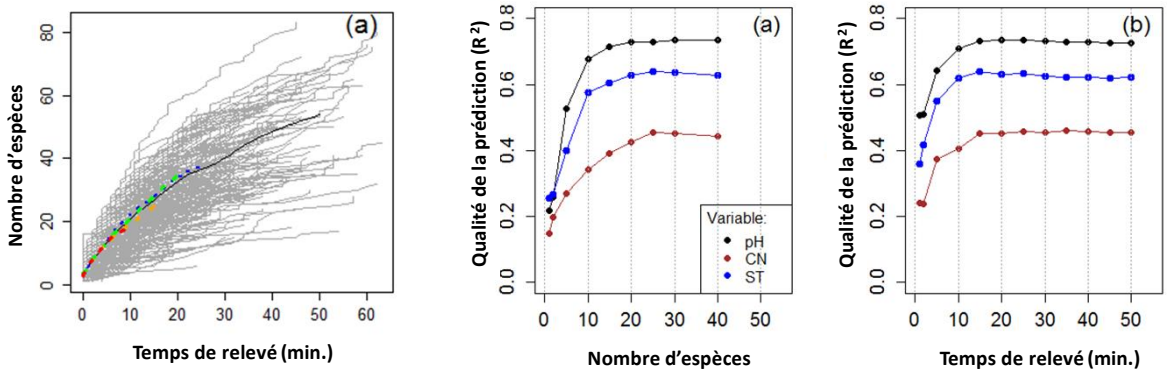


- **329 points distribuées sur l'ensemble du territoire (IGN, 2013)**
- **53 placettes en Forêt de Rupt-sur-Moselle**
- **58 placettes en Forêt de Villey-le-Sec**

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)
Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Résultats

Echelle nationale : performance de la bio-indication en fonction du nombre de espèces et du temps de relevé



(i) La vitesse d'acquisition d'espèces nouvelle décroit progressivement avec le temps,

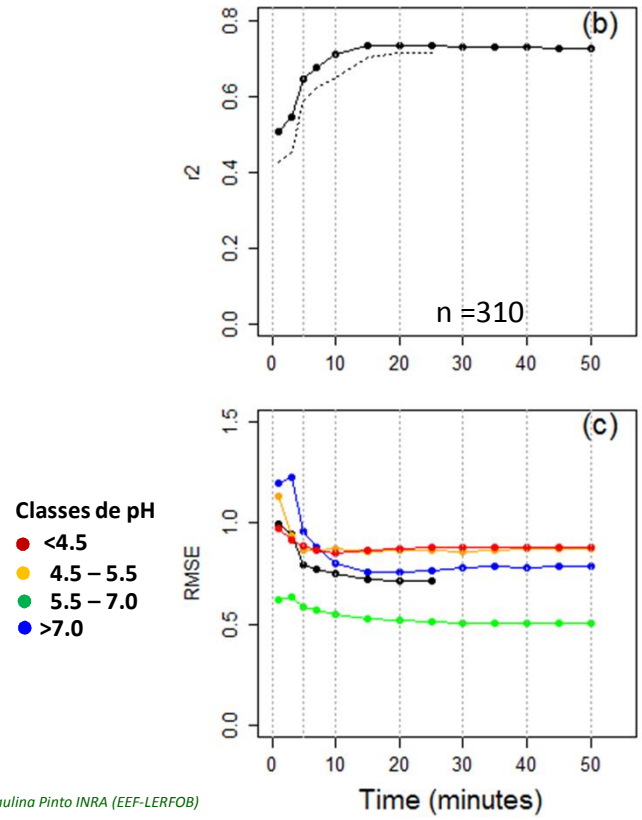
(ii) Un relevé partiel est suffisant pour réaliser une bonne bio-indication (10-25 espèces). L'estimation précise du C/N nécessite un plus grand nombre d'espèces

(iii) La qualité optimale d'estimation est obtenue à partir de 15'. Une qualité satisfaisante est obtenue à partir de 5'.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Les Résultats

Echelle nationale : performance de la bio-indication du pH en fonction de l'acidité du sol

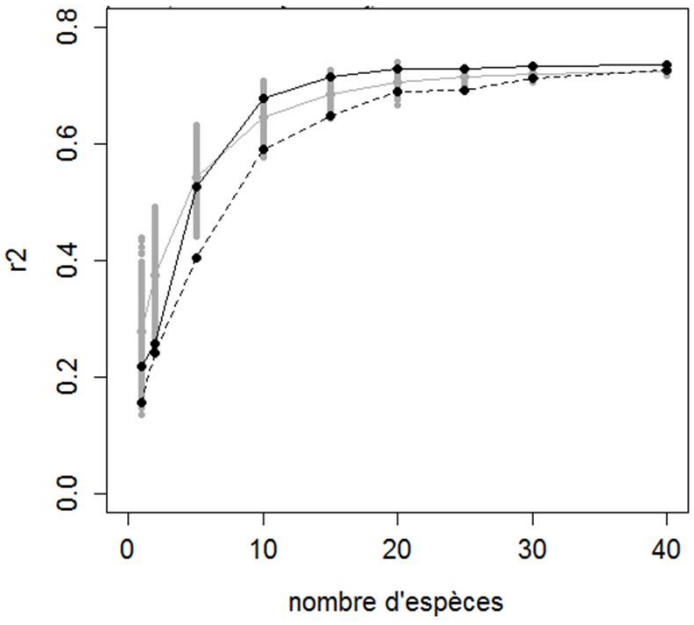


Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

L'amélioration de la qualité de prédiction en fonction du temps est peu dépendante du niveau trophique du substrat : un peu plus rapide dans les milieux acides (7 – 10' pour une prédiction optimale)

Les Résultats

Echelle nationale : effet de l'ordre d'acquisition des espèces sur la qualité du pH bio-indiqué



Ordre d'acquisition
Ordre aléatoire
Ordre inverse de l'acquisition (dernières spp. trouvées prises en compte en premier)

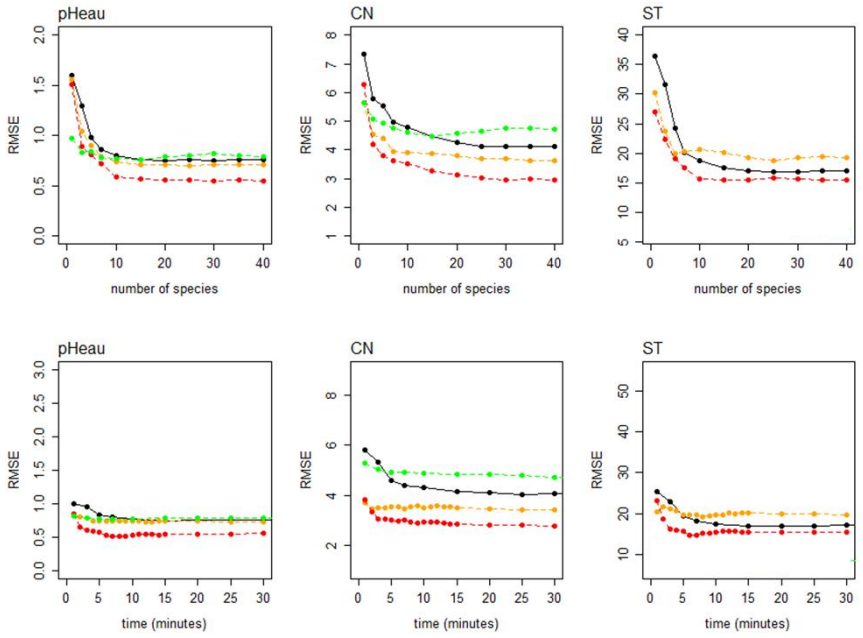
Å **Les premières espèces trouvées apportent plus d'information pour la bio-indication que les dernières espèces trouvées sur la placettes.**

Å **Les premières espèces trouvées sont les espèces les plus abondantes.**

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Les Résultats

Echelle locale : évaluation de la performance de la bio-indication en fonction du niveau trophique



Forêts:
- **Rupt-sur-Moselle**
- **Xonrupt**
- **Villey-le-sec**
- **France (IGN)**

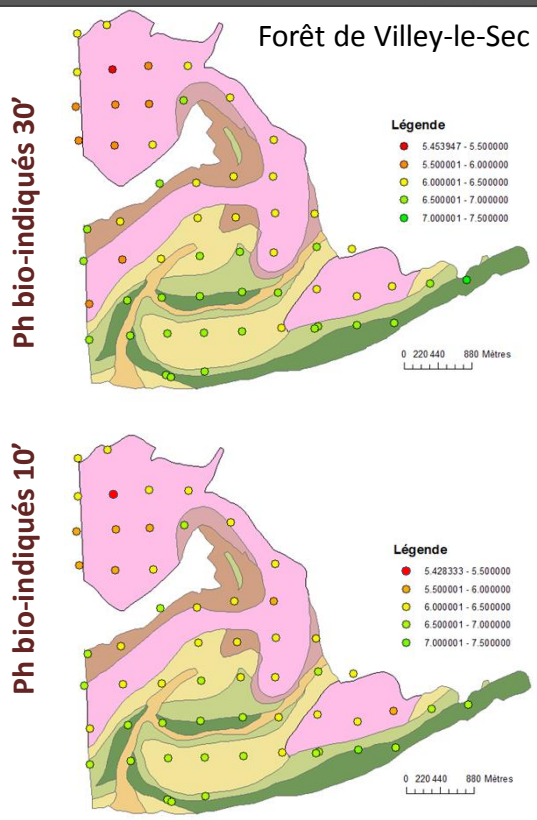
Le temps nécessaire pour une qualité optimale d'estimation est semblable aux échelles locale et nationale.

A l'échelle locale on peut observer :
- **Des durées plus longues pour optimiser l'estimation : C/N à Rupt ;**
- **Une dégradation de la qualité d'estimation après 15-20' : pH, C/N : Villey ; S/T : Rupt**

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Les Résultats

Echelle locale : spatialisation de l'acidité et durée de réalisation du relevé floristique



Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Un temps limité de relevé floristique conduit à respecter la distribution spatiale des niveaux d'acidité des stations

Conclusions

- Il est possible de diminuer de façon significative le temps passé sur le terrain et le coût associé aux relevés floristiques pour bio-indiquer les caractéristiques nutritionnelles du sol
- Ceci doit permettre de rendre accessible les nouvelles méthodes de bio-indication par les plantes aux gestionnaires forestiers pour l'estimation de la qualité des sites.
- Nos résultats peuvent contribuer à une caractérisation formalisée, plus fine qu'auparavant et avec une méthodologie identique des échelles locale à nationale des propriétés et de la qualité des sols forestiers
- Cette approche présente l'avantage de pouvoir être intégrée dans l'élaboration des modèles de distribution et de croissance des essences et de permettre le monitoring à long terme des changements de propriétés des sols.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Crédit photo: M. Legay (ONF)

Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique :

Modèles de distribution comme outils pour le choix des essences

Partie II

Paulina Pinto
INRA (EEF – LERFOB)
Contact: paulina.pinto.pro@gmail.com

Animateur: Olivier Picard, Coordinateur RMT AFORCE

Modèles utilisés : Badeau V., Piedallu, Ch., Bontemps, J.D, Mérian P.

Nancy, 23 juin 2015

Introduction

- La connaissance des variables qui contrôlent la présence des essences et qui déterminent l'aire de répartition des essences et leur évolution future a été identifiée comme un **outil prévisionnel indispensable pour le choix des essences** (Riou-Nivert, 2008).

- Les **modèles** corrélatifs, basés sur **la niche réalisée des essences**, se sont avérés très performants pour décrire leur **aire de répartition** (Cheaib, et. al, 2010). Avantages par rapport aux modèles basés sur des processus : (i) disponibilité des modèles pour un nombre important d'essences (ii) disponibilité des variables d'entrée des modèles.

- L'utilisation par le gestionnaire forestier de méthodes récentes pour la prédiction de présence future des essences se heurte à la **multiplicité des modèles**.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Objectifs

Utiliser les modèles de distribution des principales essences françaises pour fournir au gestionnaire de terrain et décideurs forestiers des éléments pour le choix des essences en contexte de réchauffement climatique.

→ Comparaison des principaux modèles corrélatifs disponibles (élaborés dans les laboratoires EEF et LERFoB) avec approfondissement sur : **la qualité** des modèles, **les différences d'aires futures** prédites conduisant à des incertitudes sur les préconisation à fournir, et la **compréhension des causes conduisant aux différences** de prédictions.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

(i) Quelle est la qualité de prédiction des modèles dans un climat présent à une résolution d'intérêt local (placette de 700 m2) et à une résolution d'intérêt régional (pixel de 64 km2) ?.

Dans quelle mesure, la qualité des modèles de distribution dépend de l'aire de référence choisie : France entière versus aire de distribution de l'essence étudiée *(élimination de vastes zones potentielles faciles à prédire d'absence de l'essence) ?*

(i) Les tendances d'évolution de la distribution des essences aux échelles nationale et régionale - régression, stabilité, expansion- sont-elles cohérentes entre les modèles ?

(ii) Quelles sont les différences de niche qui permettent d'expliquer les différences observées entre modèles ?

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Quels modèles ?

Données de calibration & variables explicatives

Table 1: Description des modèles de distribution utilisés

	Variables calibration	QDIV (N-NBN)	ORACLE	LERFOB-bio
Climat	*1. variables explicatives* **climatiques**	Déficit hydrique été [illegible]09-11, P03, P07, Humidit[illegible]1, Humidité spécif[illegible] 05, NGG06-08, GD[illegible], [illegible]D01-03, ETP06-08, ETP07, E[illegible]P10, Tmax absolues (30 ans), A[illegible]de thermique	P12-02, P06-08, VPD06-08 (Déficit de pression de vapeur), T12-02, T06-08	Tmean13 Déficit hydrique ét
	periode concerné	1971-2000	1971-2000	1961-1990
	source	SAFRAN	SAFRAN	LERFOB
	résolution spatialle	8 x 8 km	8 x 8 km	1 x 1 km
	résolution temporelle	horaires	horaires	mensuelles
	méthode d'agrégation	moyennes mensuelles et saisonnieres	moyennes mensuelles et saisonnie[illegible]	moyennes mensuelles et saisonnieres
Eau du sol	**sol**	pH	PH, CN, [illegible]fondeur du sol	pH, C/N, TW, PW
	source	Infosol	LERFOB	bioindiqués à partir de flore
Nutrition	résolution	8 x 8 km	1 x 1 Km	placette 700 m2
	méthode d'agrégation	max à 8 x 8 km	non	non
	2. variables Y (P/A)			
	source	IGN	IGN	IGN
	periode	ancienne méthode [..-2004], Loiret [2005-2009]	[illegible]	2005-2011
	unité statistique de base	pixel 64 km2 (plac. 700 m2)	placette 700 m2	placette 700 m2
	n plot	8989	33470	46768
	si IGN indiquer le strate	arbres	flore (semis + arbres recensables)	flore (semis + arbres recensables)
	3. Méthode modélisation	Regression logistique	GAM	GAM
	4. Résolution de représentation	**8 x 8 km**	**8 x 8 km**	**1 x 1 km**
		Badeau, et al 2010	***Bontemps J.D & Mérian P.***	***Piedallu, et al., 2016***

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Quelles essences ?

Fagus sylvatica

Q. robur

Q. petraea

Pinus sylvestris

Q. pubescens

Q. ilex

Quelles données et méthodes de validation

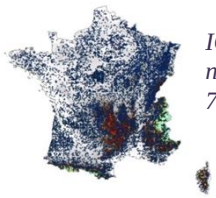
Comparaison des modèles à l'échelle nationale

- **Constitution d'un jeu de données indépendant avec les données IGN 2012- 2013 *(N=13,098)* avec calcul des variables de milieu des modèles et PA des essences.**
- **Constitution d'une grille 8*8 avec recalcul des paramètres de milieux et la présence des essences à cette résolution (à partir des données IGN 2012-13) *(N = 6,054).***
- **Calcul, pour les 3 modèles, d'un seuil de probabilité permettant de prédire les présences/absences optimisé pour le jeu de données IGN 2012-13.**
- **Calcul des probabilités de présence, puis prédiction des PA des essence pour tous les modèles aux échelles placette et maille 8*8 kms**
- **Evaluation de la qualité des modèles par comparaison des présences/absences observées et prédites : AUC [0-100] et TSS : [-1 (mauvais modèle) à 1 (modèle parfait)]**

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Performance des modèles de distribution :

Question 1 : (i) Quelle est la qualité de prédiction des trois types de modèles pour prédire la présence/absence des essences à une résolution d'intérêt local ?



IGN 2012-2013;
n = 13,098
700 m2

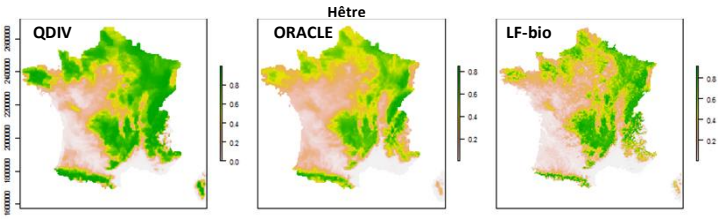


Table 2: Performance, sensitivité, specificité et seuil appliqué pour les 3 types de modèles et 6 essences selon la TSS.

Bonnes présences | Bonnes absences

Essence	Modèle	Threshold	AUC	Sensitivity	Specificity	TSS
Hêtre	N-NBM	0.59	0.83	0.89	0.63	0.52
	ORACLE	0.34	0.83	0.88	0.66	0.54
	LERFOB-bio	0.46	0.85	0.82	0.74	0.56
Chêne pedenculé	N-NBM	0.79	0.73	0.89	0.50	0.39
	ORACLE	0.39	0.78	0.81	0.63	0.44
	LERFOB-bio	0.42	0.80	0.86	0.59	0.45
Chêne sessile	N-NBM	0.65	0.73	0.83	0.54	0.37
	ORACLE	0.30	0.76	0.81	0.62	0.43
	LERFOB-bio	0.27	0.79	0.85	0.60	0.45
Quercus pubescens	N-NBM	0.33	0.91	0.85	0.83	0.68
	ORACLE	0.23	0.90	0.78	0.86	0.64
	LERFOB-bio	0.18	0.93	0.87	0.86	0.73
Chêne vert	N-NBM	0.12	0.98	0.93	0.95	0.88
	LERFOB-bio	0.12	0.98	0.95	0.93	0.88
Pin sylvestre	N-NBM	0.58	0.70	0.49	0.79	0.28
	ORACLE	0.19	0.80	0.68	0.78	0.46
	LERFOB-bio	0.21	0.82	0.75	0.74	0.49

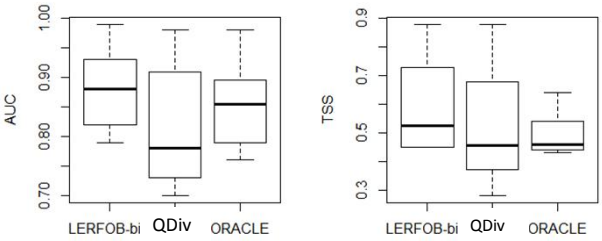
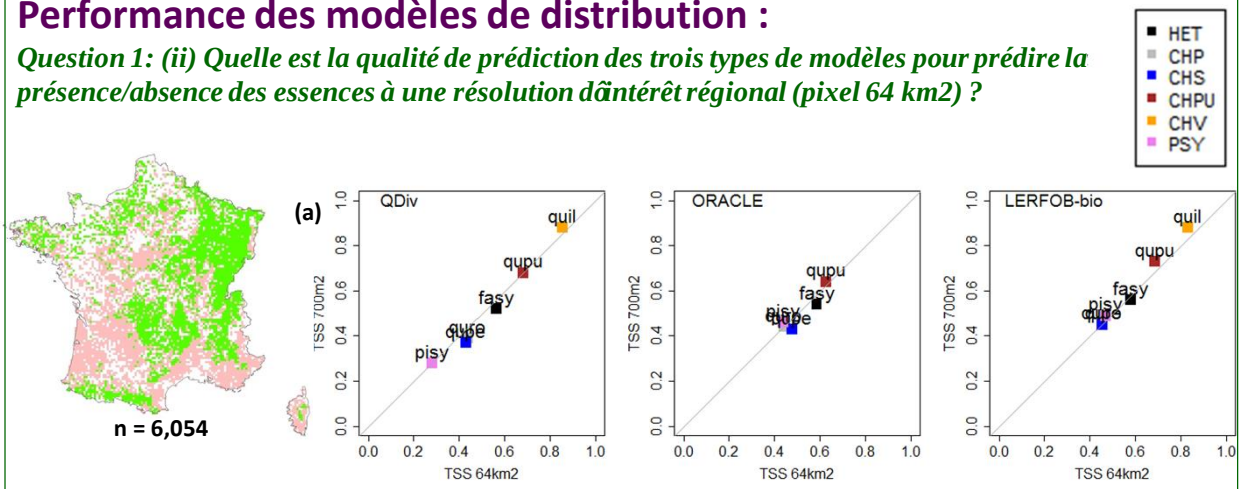


Figure 1. Distribution des AUC obtenues pour les 6 essences étudiés (voir Table 2) d'après confrontation des prédictions aux présences/absences observés (n= 13,098) pour les trois types de modèles analysés.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Performance des modèles de distribution :

Question 1: (ii) Quelle est la qualité de prédiction des trois types de modèles pour prédire la présence/absence des essences à une résolution d'intérêt régional (pixel 64 km2) ?



Question 1: (iii) Et au sein de l'aire de répartition des essences ?

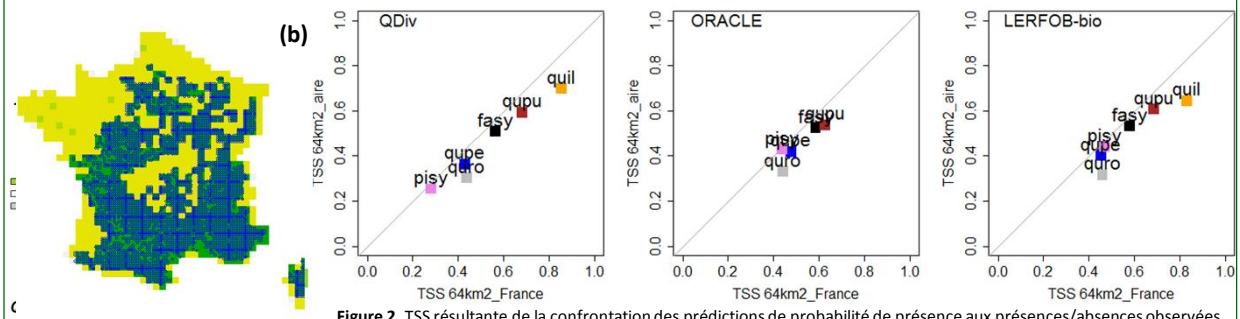
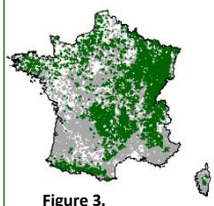


Figure 2. TSS résultante de la confrontation des prédictions de probabilité de présence aux présences/absences observées (n= 6,054) pour les six essences étudiées et les trois modèles analysés. Ceci pour (a) un jeux de validation à l'échelle nationale , et (b) de l'aire de répartition de chaque essence étudiée.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

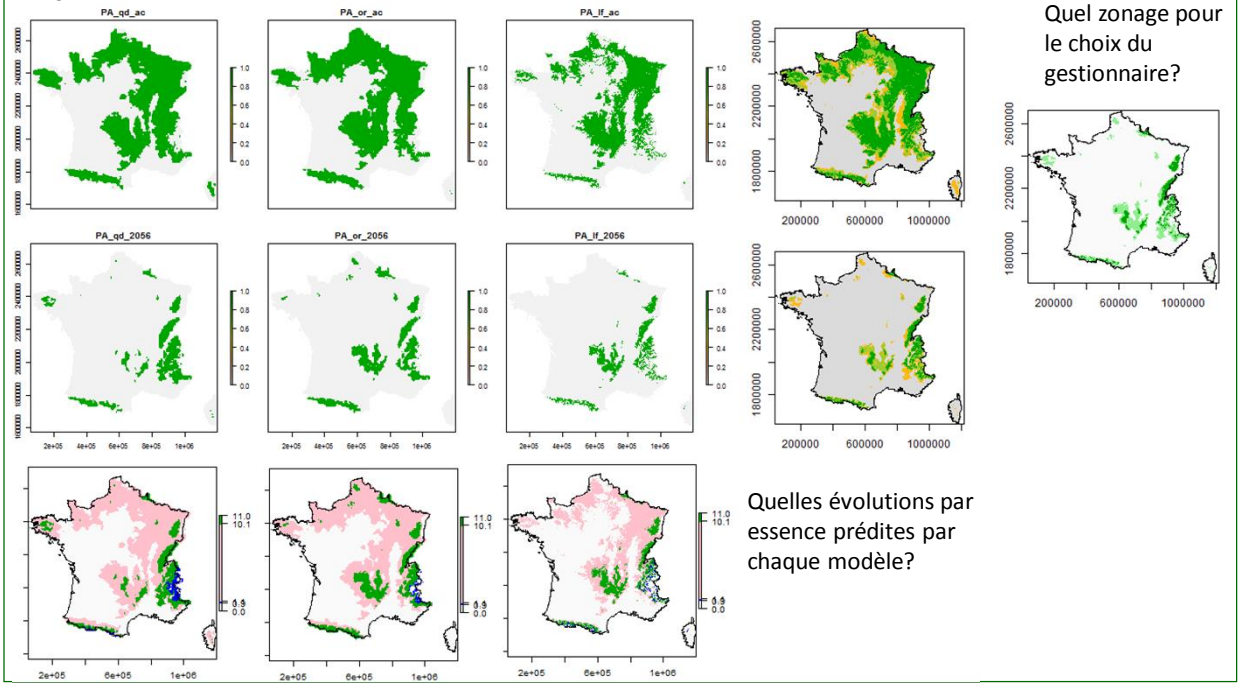


Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau national

Fagus sylvatica

Où convergent/**divergent** au présent et au futur les prédictions fournies par les modèles?

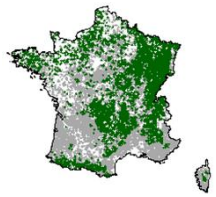
Quel zonage pour le choix du gestionnaire?



Quelles évolutions par essence prédites par chaque modèle?

Figure 3.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)



Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau des régions bio-climatiques
Fagus sylvatica

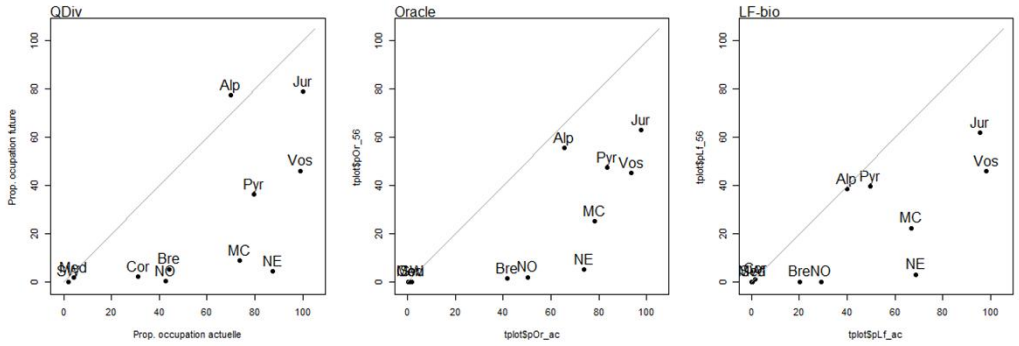


Figure 4.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

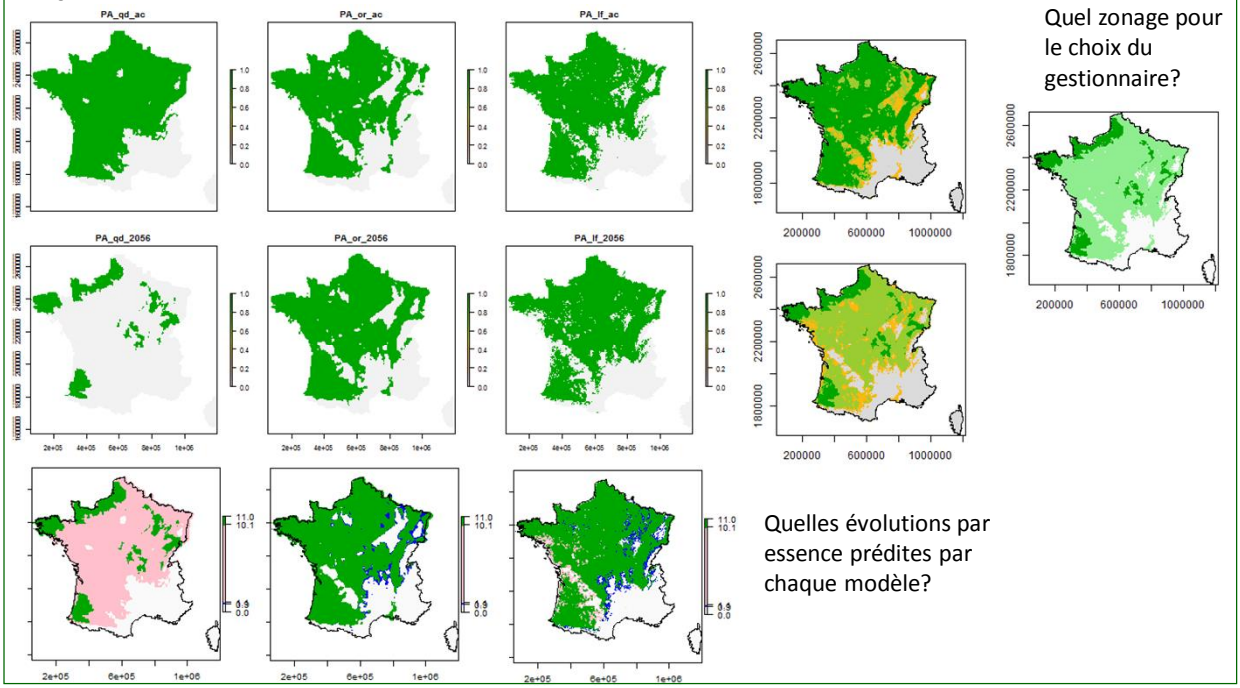
Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau nationale

Quercus robur

Où convergent/**divergent** au présent et au futur les prédictions fournies par les modèles?

Quel zonage pour le choix du gestionnaire?

Figure 5.



Quelles évolutions par essence prédites par chaque modèle?

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau régional

Quercus robur

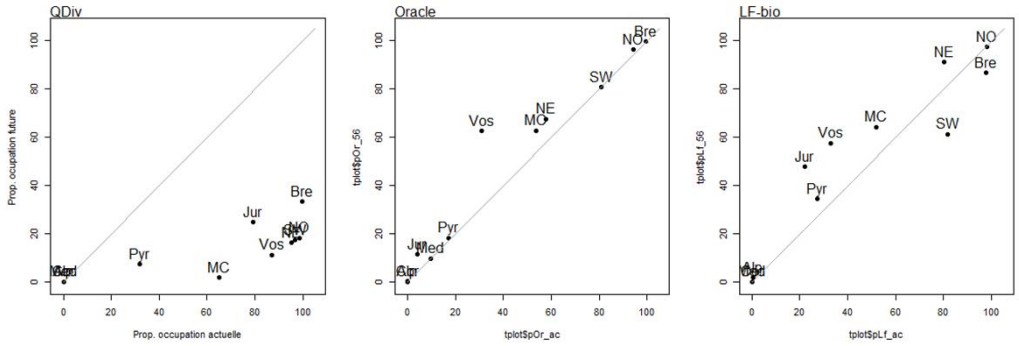


Figure 6.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

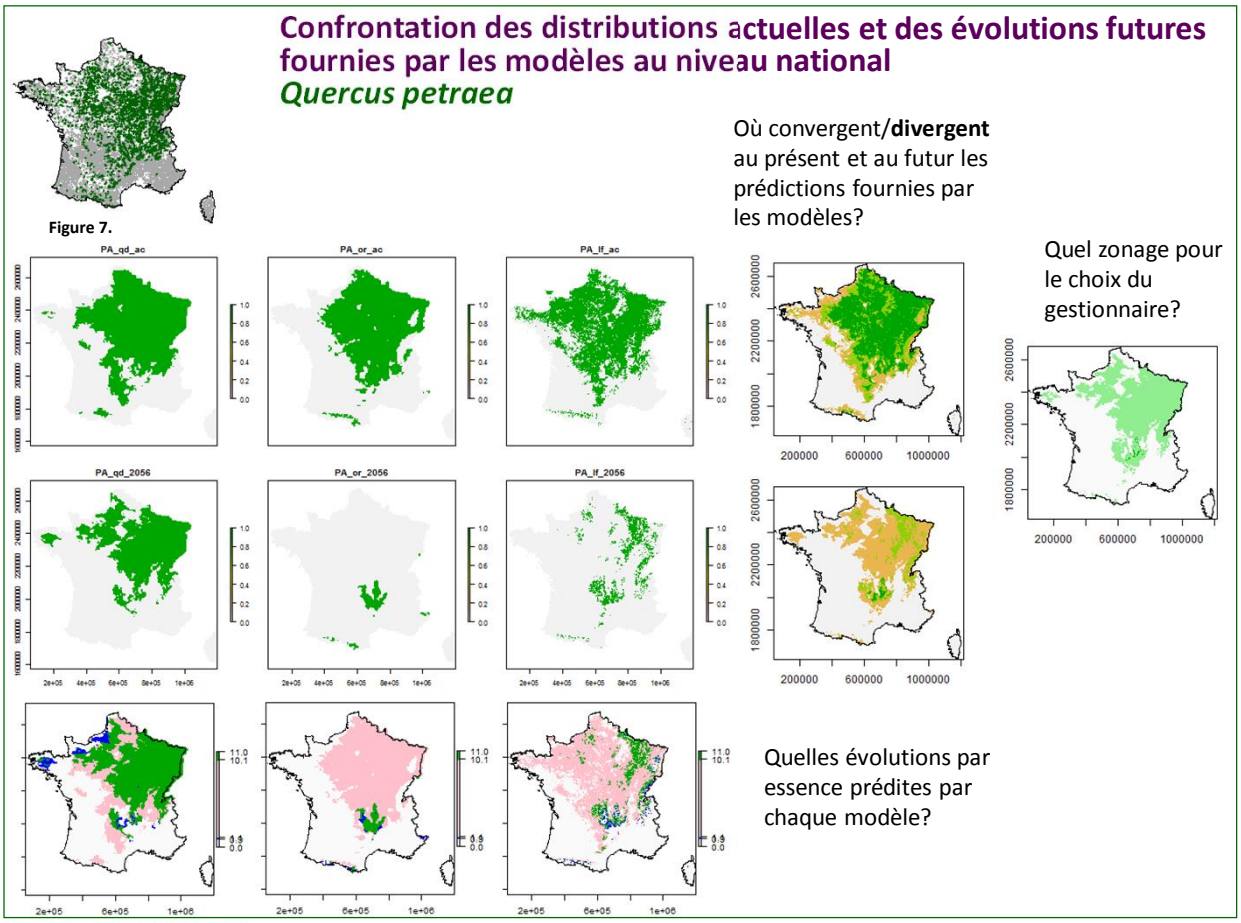

Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau national
Quercus petraea
Où convergent/**divergent** au présent et au futur les prédictions fournies par les modèles?
Quel zonage pour le choix du gestionnaire?
Quelles évolutions par essence prédites par chaque modèle?
PA_qd_ac
PA_or_ac
PA_lf_ac
PA_qd_2056
PA_or_2056
PA_lf_2056
Pauline Pinto INRA (CEF-LERFOB)

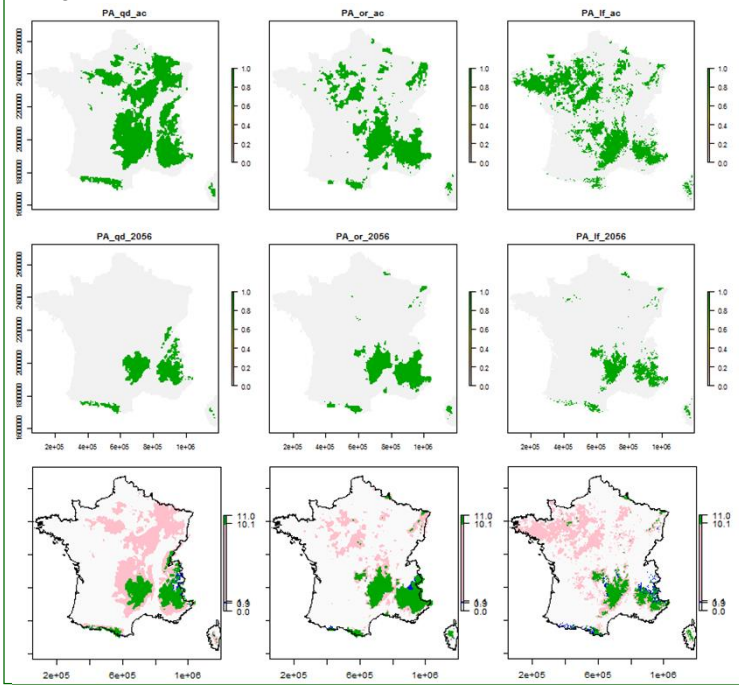
Figure 7.

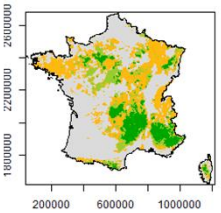
Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau national

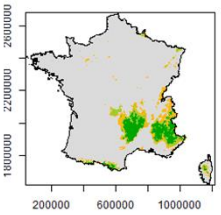
Pinus sylvestris

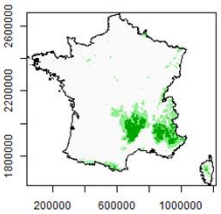
Où convergent/**divergent** au présent et au futur les prédictions fournies par les modèles?

Quel zonage pour le choix du gestionnaire?





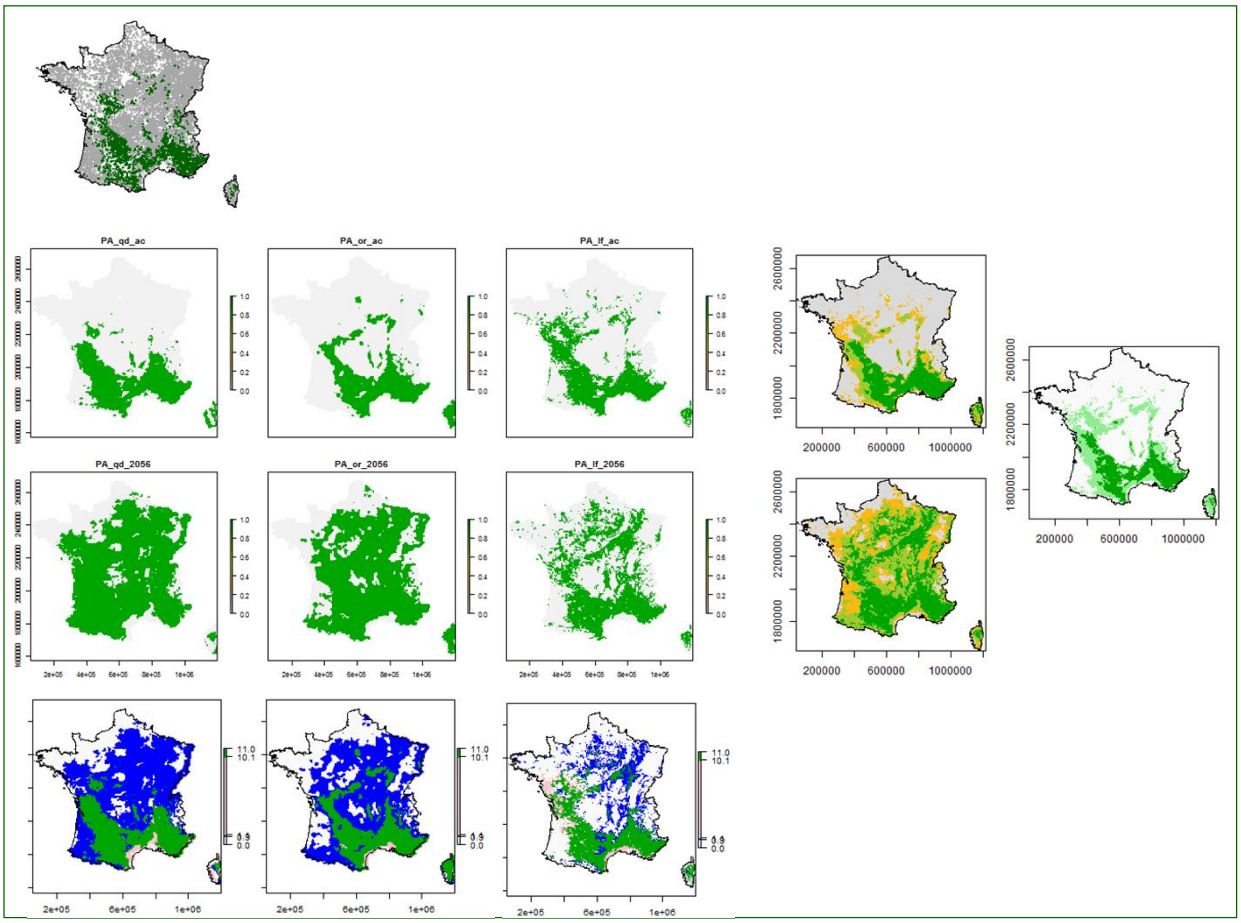




Quelles évolutions par essence prédites par chaque modèle?

Figure 8.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)


PA_qd_ac
PA_or_ac
PA_lf_ac
PA_qd_2056
PA_or_2056
PA_lf_2056
200000
600000
1000000
1800000
2200000
2600000

Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau national

Table 3. Confrontation des distributions actuelles et des évolutions futures fournies par les modèles au niveau national

Species	Convergence climat actuel	évolution QDIV	LF-bio	Oracle	Convergence 2056, A1B
Fagus sylvatica	1	↓	↓	↓	1
Quercus pubescent	1	↑	↑	↑	1
Quercus robur	1	↓	→	→	0
Quercus petraea	1	↓	↓	↓	0
Quercus ilex	1	↑	↑	↑	0
Pinus sylvestris	0	↓	↓	↓	1

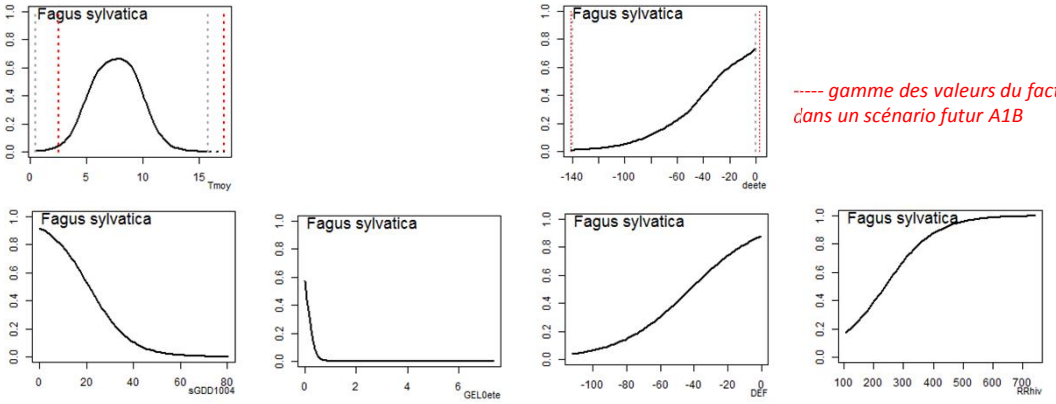
Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

TEMPERATURES (°c) **DH été (mm)** **PRECIPITATIONS (mm)**

Fagus sylvatica

LERFOB-bio

QDIV



----- *gamme des valeurs du facteur étudié dans un scénario futur A1B*

Figure 10. Courbe de réponse du Hêtre vis-à-vis des variables liées aux variables thermiques et hydriques participants aux modèles de distribution LERFOB-bio et QDIV (N-NBN)

Pour le Hêtre, la réponse aux facteurs climatiques conduit à des évolutions d'aires cohérentes entre modèles

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

	TEMPERATURES (°c)	DH été (mm)	Humidité atm.

Quercus robur

LERFOB-bio

QDIV

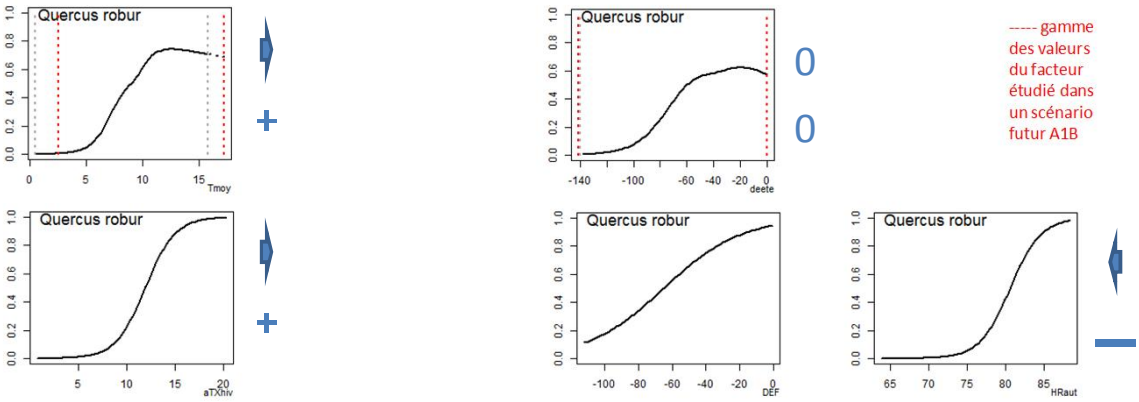


Figure 11. Courbe de réponse du Chêne pedonculé vis-à-vis des variables liées aux variables thermiques et hydriques participants aux modèles de distribution LERFOB-bio et QDIV (N-NBN)

Avec le réchauffement climatique prévu :
LERFoB : augmentation de la température : effet globalement favorable
QDIV : diminution de l'humidité relative : effet défavorable
sur l'aire de répartition du chêne pédonculé

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Conclusions - I

- **Qualité des modèles :**
  - Les modèles sont tous de bonne qualité globale (AUC 0.72-0.92; 0,43-0.94)
  - Les modèles qui intègrent des variables sol précises sont un peut plus performants à l'échelle de la France.
  - Le ranking des essences en fonction de la qualité des prédictions est la même pour les trois types de modèles :
    - Meilleure prédiction des essences dont l'aire de répartition à l'échelle de la France est plus réduite, essences localisées : Chêne pubescent, Chêne vert.
    - Moins bonne performance pour les essences disséminées soit par des effets de plantation (Pin sylvestre) ou parce que elles ont été favorisées ou défavorisées par la gestion (Chênes sessile, Ch. pédonculé).
    - Les modèles climatiques restent performants quand ils sont appliqués à l'échelle de l'aire de répartition des espèces.

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Conclusions - II

- **Cohérence des projection spatiales future et causes de divergence :**
  - Trois situations différentes ont été identifiées :
    - Cohérence des projection futures pour des essences en expansion ou en régression (Chêne pubescent et Hêtre).
    - Divergence des projections futures lorsque les poids respectifs des variables thermiques et de bilan hydrique diffèrent dans les modèles. Un poids fort du BH dans QDIV conduit à une rétraction de l'aire du C. pédonculé
    - Possibilité de faible cohérence pour la prédiction de l'aire actuelle et de forte cohérence future (Pin sylvestre)

Paulina Pinto INRA (EEF-LERFOB)

Conclusions III

Approches utilisées

- Attention : On travaille avec la niche réalisée ce qui implique que nos résultats tiennent compte des interactions biotiques (e.g. : compétition), de l'action du forestier et qu'ils n'intègrent pas l'évolution du CO2 dans les projections futures. Le forestier peut agir sur la compétition pour favoriser une essence objectif.

- D'autres modèles, à base écophysiologique ou phénologique, permettraient d'explorer la niche fondamentale et les capacités de persistance des essences.

- Essences introduites : il faudrait récupérer des données de répartition des essences (et les données écologiques associées) ou des modèles calibrés dans l'aire d'origine de ces essences et les appliquer en France.

Nouveaux outils d'aide à la décision forestière dans un contexte de changement climatique :

Application à l'échelle locale

Partie III

Paulina Pinto
INRA (EEF – LERFOB)
Contact: paulina.pinto.pro@gmail.com

Animateur: Eric Lacombe Enseignant en Sylviculture AgroParisTech

Autres participants : Badeau V., Piedallu, Ch., Pinto, P., Seynave, I., Pérez V., Lacombe E.

Nancy, 23 juin 2015

Introduction

- Dans un contexte de changement climatique, **le gestionnaire** doit tenir compte des changements à long terme quand il est confronté aux choix des essences lors de l'aménagement. Cette prise en compte vise à éviter la vulnérabilité potentielle des peuplements face au réchauffement.
- Aujourd'hui, les outils disponibles (catalogues + guides) ne tiennent pas compte des évolutions environnementales à long terme.
- Ceci conduit à développer des outils et méthodes renouvelées qui intègrent le climat dans la définition des caractéristiques stationnelles et des potentialités des essences.

Objectifs

Evaluer l'application, à l'échelle locale, des nouveaux outils de caractérisation des stations forestières et des potentialités des essences dans un contexte de changement climatique

Å *Objectifs spécifiques :*

(i) Peut-on appliquer à l'échelle du massif forestier les nouveaux outils de description du milieu basés sur la bio-indication et établis à l'échelle nationale ?

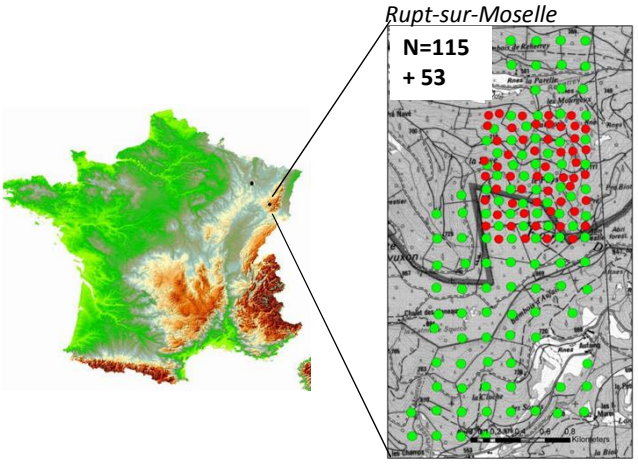
(ii) Peut-on appliquer les modèles de distributions d'espèces et de potentialités de croissance pour le choix des essences à l'échelle d'un massif forestier ?

(iii) Peut on intégrer de façon formalisée l'impact attendu du réchauffement dans ces nouvelles approches ?

Massif forestier modèle et données disponibles

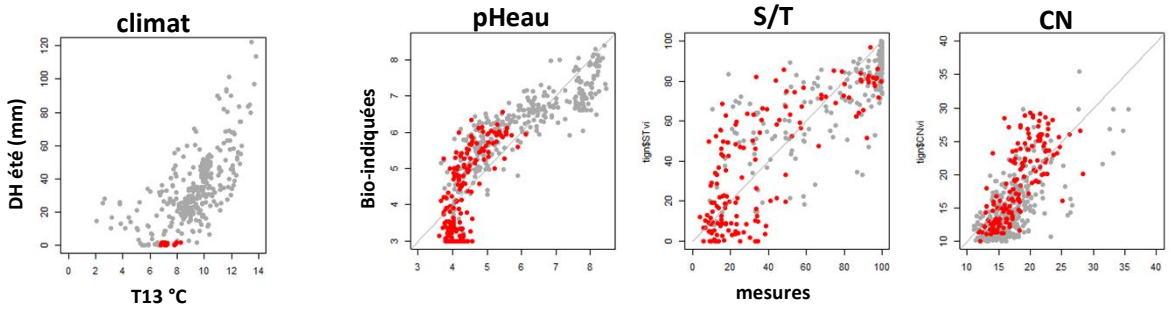
Forêt de Rupt-sur-Moselle (88), contexte siliceux (grès, granites riches, granites acides), altitudes : 550 ï 880 m. Forêt domaniale, communale (2 communes) et privée.

168 placettes réalisées sur un réseau de 100 à 200m : inventaires floristiques et dendrologiques complets, description des conditions écologiques et du sol, analyses de sol réalisées en laboratoire.



I. Caractérisation stationnelle :

- ***Quel est le poids du climat et du sol dans la variabilité écologique à l'échelle de la forêt ?***
- ***N'y a-t-il pas de biais d'estimation à l'échelle du massif liés à l'histoire (sensu lato) de la forêt ?***
- ***La proximité spatiale de stations à richesses minérales très différentes ne biaise-t-elle pas la bioindication (par mélanges de flores) ?***



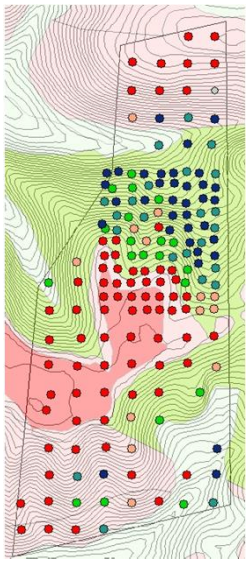
- **329 points distribuées sur l'ensemble du territoire (IGN, 2013)**
- **168 placettes en Forêt de Rupt-sur-Moselle**

(i) Illustration de la forte variabilité du sol par rapport au climat à l'échelle de la forêt
(ii) Lien entre variables mesurées et bio-indiquées inclus dans la relation nationale : pas de biais apparent sur ce lien à l'échelle de la forêt.
(iii) A gamme de facteurs mesurés fixés, la gamme de valeurs bio-indiquées est aussi importante à l'échelle de la forêt qu'à l'échelle française : pas d'homogénéisation des flores liée à la proximité spatiale de stations très différentes écologiquement.

I. Caractérisation stationnelle :

La localisation des stations est elle la même lorsqu'elle est définie par les mesures et par la bio-indication ?

acidité

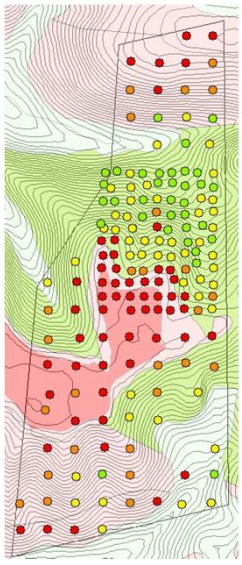


pH

- 3,0 - 4,0
- 4,0 - 4,5
- 4,5 - 5,0
- 5,0 - 5,5
- 5,5 - 6,6

R2 pH mes-pHVI = 0,50

nutrition azotée



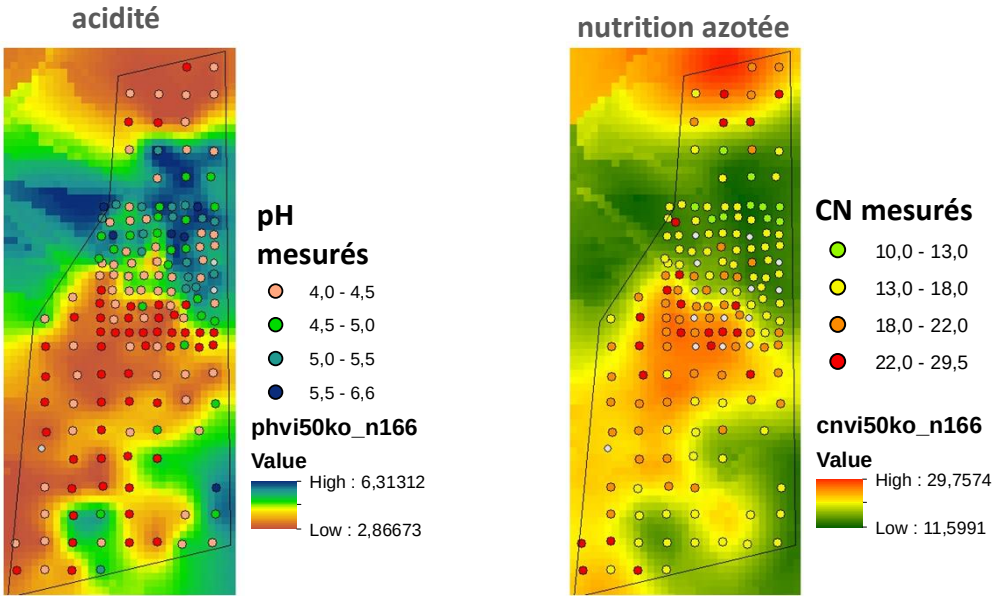
C/N

- na
- 10,0 - 13,0
- 13,0 - 18,0
- 18,0 - 22,0
- 22,0 - 29,5

R2 C/N mes-C/NVI = 0,54

I. Caractérisation stationnelle

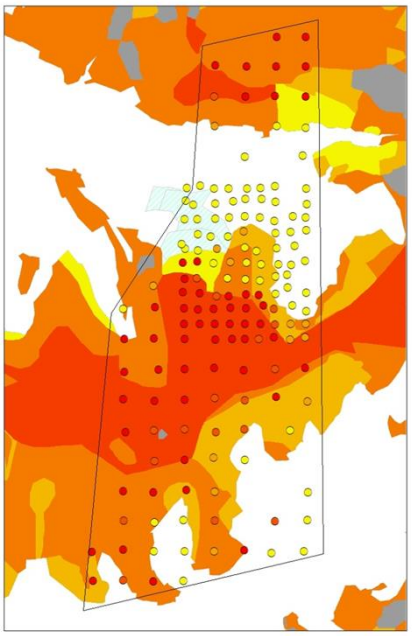
La localisation des stations est elle la même lorsqu'elle est définie par les mesures et par la bio-indication ?



(i) Très forte cohérence spatiale entre zones de richesses minérales distinctes délimitées par les mesures ou les valeurs bio-indiquées
(ii) Localement, forte corrélation entre pH et C/N

I. Caractérisation stationnelle

Y a-t-il cohérence entre cartographie traditionnelle et nouvelle approche factorielle ?
Peut on convertir les cartes de stations traditionnelles en cartes de facteurs ? 1er essai



ND
3 à 3,5
3,5 à 4,0
4,0 à 4,5
> 4,5

Directives d'orientation locale d'aménagement

- Sapinière à molinie et sphaignes
- Sapinière à myrtille
- Sapinière acidiphile
- Sapinière à canche et luzule
- Sapinière à fétuque
- Sapinière neutrophile

Catalogue de station

- Hêtraie - sapinière sur sol très acide
- Hêtraie - sapinière sur sol acide
- Hêtraie - sapinière sur sol peu acide
- Hêtraie - sapinière sur sol riche

Conclusions:

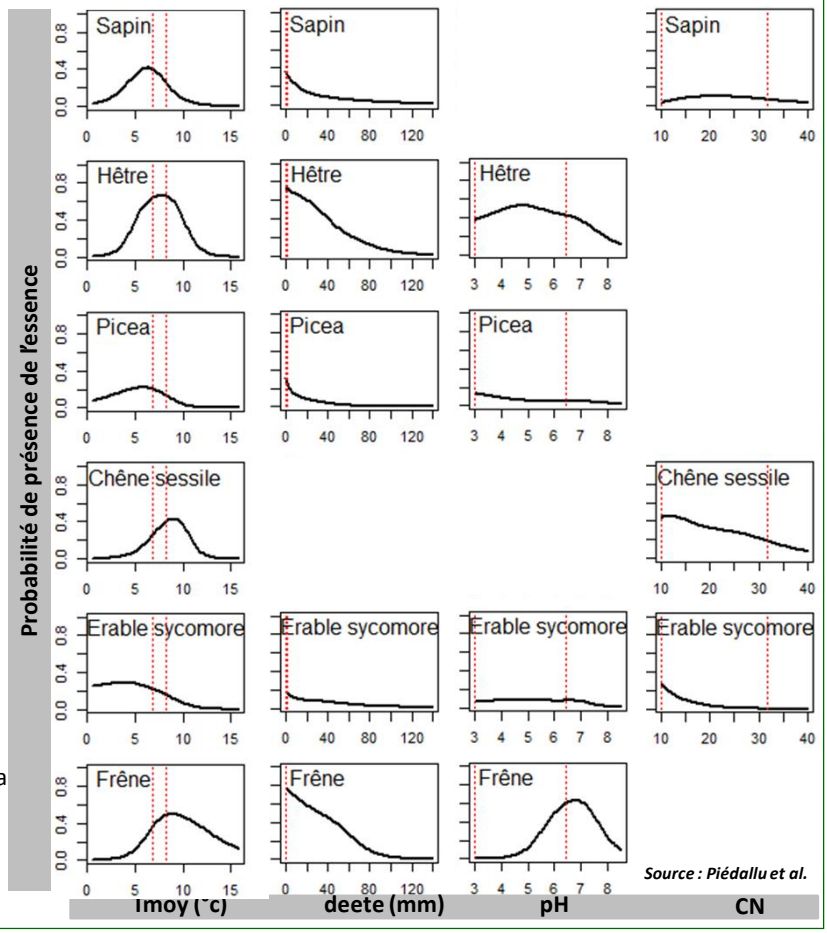
- Nombreuses stations issues de plusieurs typologies
- Cohérence entre les indications qualitatives fournies par les typologie et les valeurs des variables trophiques bio-indiquées,
- Perspectives : il semble possible d'attribuer des valeurs de pH et C/N aux types de stations pour permettre une utilisation renouvelée des cartographies de stations

II. Evaluation des potentialités forestières

- Quelles essences possibles ?
- Comment varient les potentialités au sein de la forêt ?
- Quels facteurs responsables des variations de potentialités ?
- Quel risque lié au CC ?

- *Essences possibles* : probas élevées présentes dans la forêt
- *Variations de potentialités* : variabilité des probas au sein de la forêt
- Analyse par facteurs -> surtout sol
- Risque cc : position forêt/courbe proba

----- gamme des valeurs du facteur étudié présente dans la forêt de Rupt-sur-Moselle

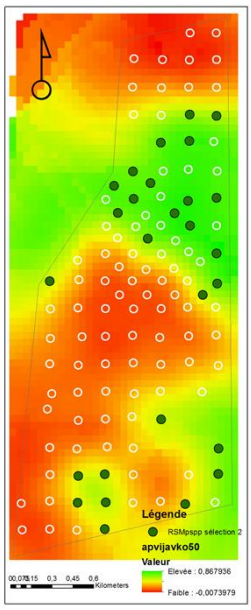


Source : Piédallu et al.

II. Evaluation des potentialités forestières

Les zones potentiellement favorables aux essences prédites par les modèles de distribution sont elles pertinentes ? Ex : Erable sycomore

Site	classes proba.	placettes réalisées	placettes avec Erable	frequence observé
peu favorable	0.0-0.3	58	0	0.00
moyennement favorable	0.3-0.6	15	5	0.33
très favorable	>0.6	41	22	0.54



Modèle de distribution de l'Erable sycomore en forêt de Rupt

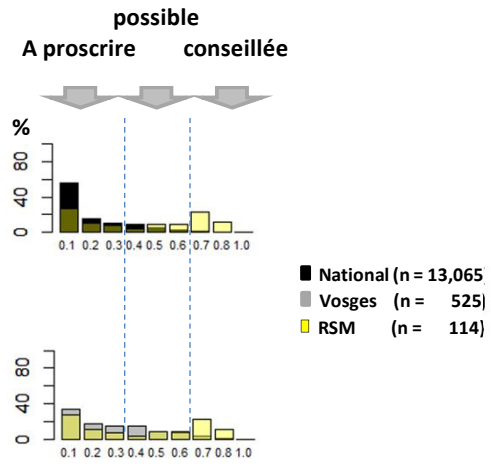
- **Pr = 0**
- **Pr=0.3**
- **Pr=0.6**

- **Erable présent**
- **Erable absent**

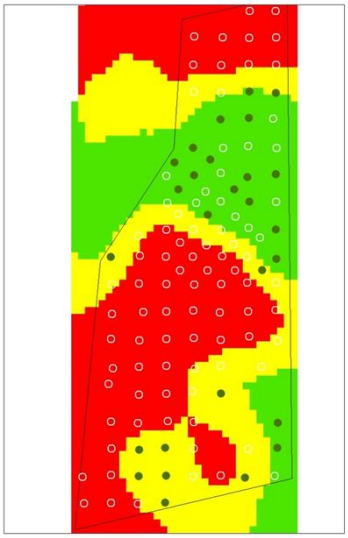
II. Evaluation des potentialités forestières

Choix des essences : aide des modèles de distribution pour formaliser les classes des guides « essences conseillée, possible, à proscrire » ?

Proposition : comparaison des potentialités des stations de la forêt/ région, pays



Distribution des probabilités de présences aux échelles nationales, régionales, locales → caractère favorable de la forêt pour l'essence étudiée / région ou France



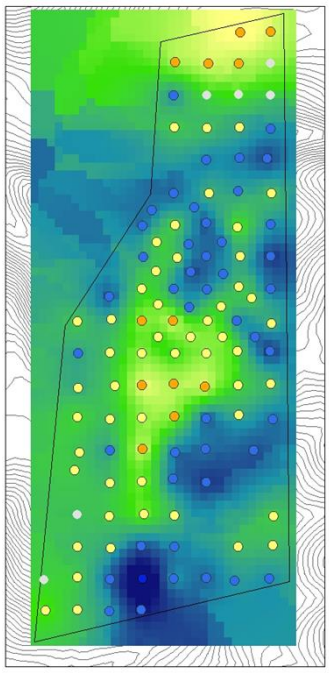
Définition de zones pour le choix des essences.
E.g. Erable syco

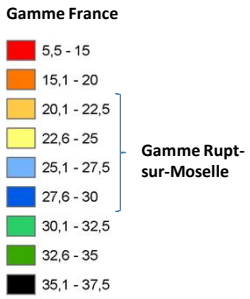
- à proscrire
- Possible
- conseillée

- Erable présent
- Erable absent

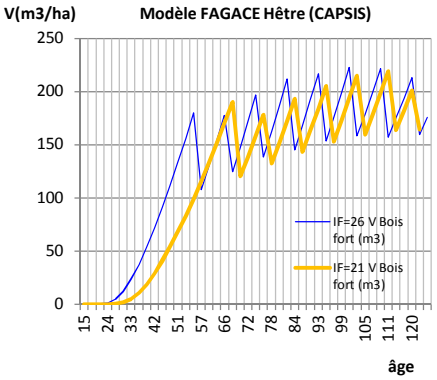
II. Evaluation des potentialités forestières

Les modèles de productivité établis à l'échelle nationale sont ils assez fins pour être utilisés pour le choix des essences à l'échelle locale ? E.g. Hêtre





Modèle SI : Seynave, et al., 2008. J. Biogeography



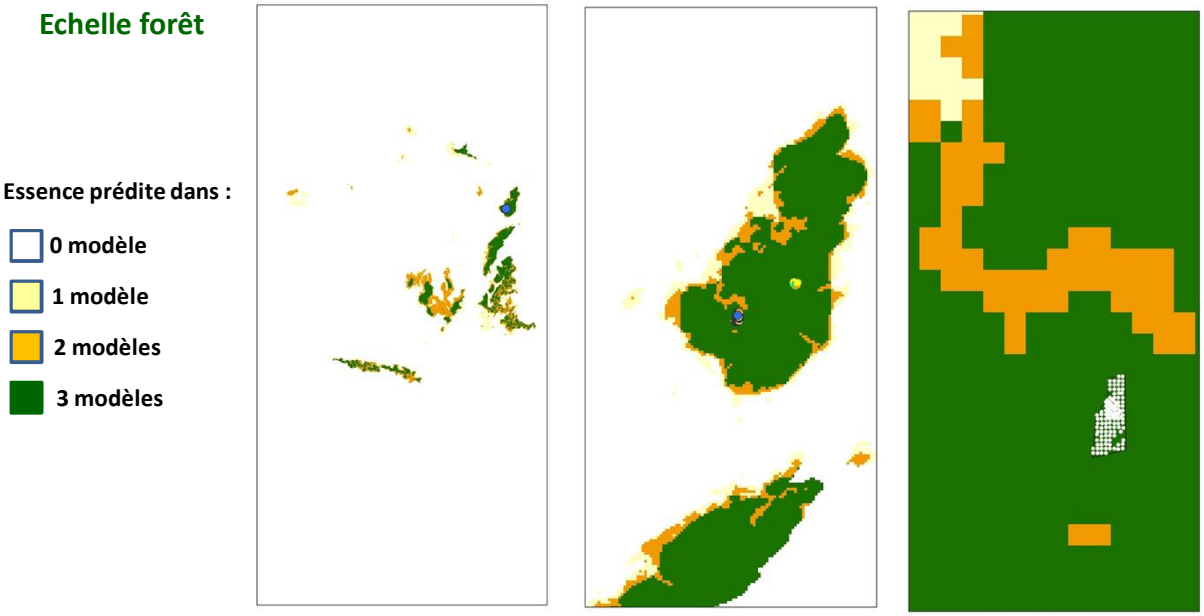
(i) Les modèles de productivité semblent pouvoir être utilisés à l'échelle locale.

(ii) Ils permettent de simuler des itinéraires sylvicoles et des prévisions de croissance adaptées aux stations

III. Quelles essences choisir pour demain?

Comment prendre en compte l'impact attendu du CC aux échelles de la forêt et de la station ? E.g. : Hêtre

Echelle forêt



III. Quelles essences choisir pour demain?

Comment prendre en compte l'impact attendu du CC aux échelles de la forêt et de la station ?

Echelle station

cosasp	pHeau	alt(m)	Rel	Quercus petraea	Carpinus betulus	Fraxinus excelsior	Acer pseudoplatanus	Fagus sylvatica	Abies alba	Picea abies	
-0.9	4.2	642	RSM 003	0.73	0.14	0.01	0.09	0.90	0.65	0.67	Fs-Aa-Qp
0.7	4.9	606	RSM 076_1	0.08	0.10	0.78	0.78	0.77	0.60	0.70	
1.0	5.6	684	RSM 077	0.18	0.35	0.84	0.69	0.77	0.55	0.63	Fs-Aa-Ap-(Fe)
0.9	4.1	685	RSM 073	0.28	0.01	0.00	0.10	0.86	0.80	0.85	
1.0	3.8	765	RSM 059	0.22	0.00	0.00	0.06	0.85	0.80	0.86	Aa-Fs-Pa

2046-2065

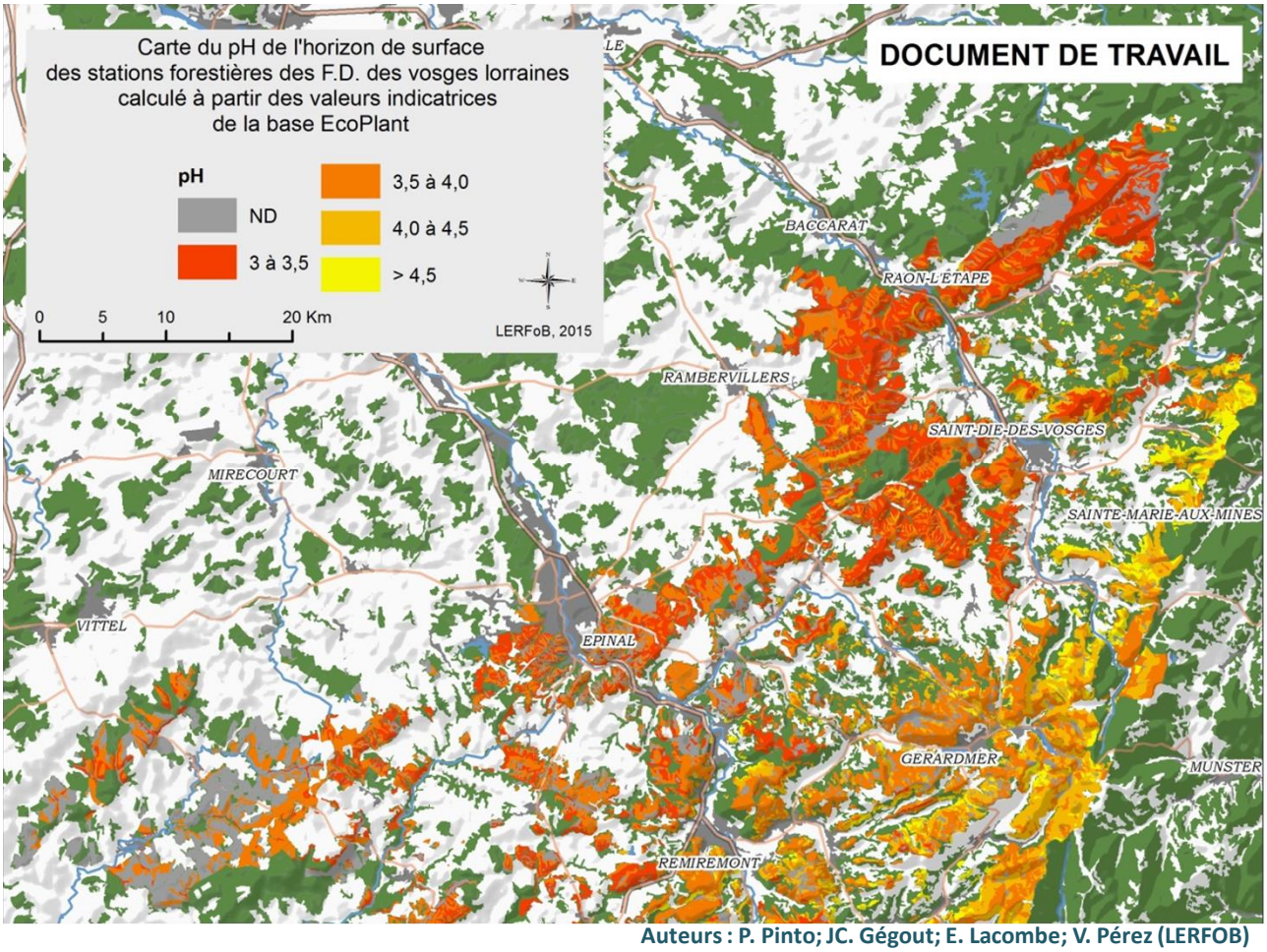
Rel	Quercus petraea	Carpinus betulus	Fraxinus excelsior	Acer pseudoplatanus	Fagus sylvatica	Abies alba	Picea abies	
RSM 003	0.64	0.14	0.01	0.03	0.70	0.27	0.27	Fs-Qp
RSM 076_1	0.17	0.46	0.86	0.63	0.76	0.32	0.48	
RSM 077	0.18	0.52	0.83	0.43	0.58	0.20	0.28	Ap-Fs (Fe)
RSM 073	0.46	0.06	0.01	0.05	0.85	0.55	0.69	
RSM 059	0.39	0.03	0.01	0.03	0.84	0.55	0.71	Fs-Pa (Aa)

Conclusions

- **Démarche innovante formalisée et cohérente :**
  - reliant station et choix des essences
  - Intégrée de l'échelle du massif forestier à l'échelle nationale
  - Intégrant l'impact du réchauffement climatique
  - Intégrée aux démarches scientifiques actuelles

- **Pertinence à l'échelle locale:** La variabilité stationnelle, déterminée par la flore, est suffisamment fine pour prédire des changements de distribution et d'indices de fertilité des essences naturelles attendues sur un massif forestier à partir de modèles calibrés à l'échelle de la France entière.

- **Quoi faire maintenant ?**
  - Mettre en place la méthode en partenariat avec les gestionnaires sur des massifs tests – Contacts pris avec pour des massifs d'Ile de France et d'Argonne
  - Lancer un programme de conversion des cartes de stations en cartes de facteurs pouvant être intégrées dans la nouvelle démarche



Auteurs : P. Pinto; JC. Gégout; E. Lacombe; V. Pérez (LERFOB)

Annexe 3

Exemple de formations réalisées pour lôONF

« Adaptation des essences aux évolutions climatiques: Questions posées par les gestionnaires en forêt domaniale de Marly ». Formation demandée par l'agence ONF de Versailles pour le service forêt (1 Responsable de service, 2 aménagistes, 2 animateurs sylvicoles, le Directeur d'agence, et 1 personne de chacune des 5 Unité Territoriales). 1 journée de cours en salle et sortie terrain.

3.1 Rapport d'évaluation de la formation (Milène Gentils, Responsable du service forêt de l'Agence interdépartementale ONF de Versailles) 119-120

3.2 Programme de la formation 121

3.3 Synthèse de la sortie terrain en Forêt de Marly 123-124

3.4 Description sur fosses pédologiques en Forêts Domaniales de Marly et Saint Germain (Auteur : Noémie Pousse, RDI-ONF) 125-133

3.5 Fiche de terrain utilisé pour l'inventaire de la flore (avec VI EcoPlant) 135

ONF
Ile-de-France - Nord-Ouest

Agence Interdépartementale de Versailles

SERVICE FORET

Milène Gentils
3 rue de groussay
78120-RAMBOUILLET
Tél. : 01 34.83.61.19
Fax : 01.34.83.16.13
Mél. :milene.gentils@onf.fr

Adaptation des essences aux évolutions climatiques : Questions posées par les gestionnaires en forêt domaniale de Marly

Rappel du contexte :

En Ile de France Marly est une forêt représentative des problèmes de vieillissement , des difficultés sylvicoles et sociales pour conduire les régénérations. Elle a été très touchée par la tempête de 1999 et depuis la progression de l'érable sylcomore, mais aussi du frêne, est préoccupante.
-De nombreuses parcelles vieillies et pauvres en réserves sont gardées en attente pour limiter le groupe de régénération. Les essences pionnières, érable sycomore principalement, s'y développent, représentant presque 100% du sous étage et atteignant parfois déjà un diamètre commercialisable.
-Dans les parcelles où est engagée une mise en régénération de chêne, la lutte contre l'érable est très coûteuse en dégagements.
-Enfin, la nécessité de limiter les coupes rases et définitives, très contestées par le public en Ile de de France, conduit dans le cadre d'un projet « forêts périurbaines » à définir les critères de faisabilité du traitement irrégulier. Les contextes de dynamique naturelle très défavorable au chêne ou aux autres essences en station sont identifiés comme une impasse pour ce traitement. La dynamqiue de l'érable à Marly rentre dans ce champ.
La principale question de l'aménagiste et du sylviculteur, à Marly comme sur d'autres forêts de l'agence de Versailles (Saint Germain, Meudon notamment) est donc centrée sur la place qu'on peut laisser, aujourd'hui et demain, à l'érable sycomore. La progression du Frêne, assez présent et de dynamique comparable, devrait être rallentie assez rapidement par la chalarose selon le DSF.

Bilan de la formation, points éclaircis, questions en suspens :

Les stagiaires étaient issus de toutes les UT- agents ou RUT- du service forêt- animateurs sylvicoles et aménagistes- et de la direction forêts Ile de France Nord Ouest -aménagistes et chargé de sylviculture. Une ingénieur et un technicien de l'Agence des Espaces Verts (organisme responsable des forêts régionales d'Ile de France) ont été invités car plusieurs aménagements sont en cours d'élaboration par l'ONF sur leurs forêts avec deux positons assez fermes de leur part : généraliser le traitement irrégulier, diversifier les essences avec tendance à leur trouver toutes le même intérêt puisque leur priorité est l'écologie, la biodiversité.

Le retour est positif de la part de tous les participants, malgré une grande disparité de niveaux d'études, y compris ceux qui avaient été désignés pour suivre la formation. Les échanges avec le « monde » de la recherche ont été appréciés, cette prise de recul a

été très enrichissante. Plusieurs ont souligné la clarté du fil conducteur qui leur a permis de ne pas décrocher, la présentation a été définie comme claire, pas trop compliquée, voire passionnante.
Cependant ils repartent sans outil pour transposer cette formation dans la gestion ou dans les aménagements. Devant la complexité des paramètres des agents expriment que ce n'est pas leur rôle de choisir les essences. Ce qui a paru comme la conclusion de la formation les a déstabilisés : seul le chêne pédonculé a un avenir sur Marly ! Et c'est ce message « percutant » qui circule maintenant dans les UT, ou plus généralement l'idée que toutes les essences sont incertaines, pas plus l'érable que les autres qu'on croyait durables comme le chêne sessile ou le pin sylvestre. D'où un risque de relativisme et de laisser aller dans la sylviculture : pourquoi se battre contre l'érable, tout se vaut…

Il est donc nécessaire de revenir vers les stagiaires pour « relativiser » les résultats présentés, en reprenant les bases de la méthode, ses limites, et en croisant avec d'autres modèles. Une différenciation entre les différents stades de développement de l'érable serait intéressante : il est très présent aujourd'hui au stade gaulis perchis mais un érable adulte a sans doute des exigences différentes et on trouve rarement dans nos forêts des érables de plus de 25-30 cm de diamètre.

Des essences bien présentes en Ile de France et à Marly n'ont pas été traitées comme le châtaignier ou le Robinier.

Apparaît nettement la nécessité d'une remise à niveau générale sur l'autécologie et la botanique si on s'engage dans des diagnostics par bio indication (alors qu'on avait envisagé une formation de toutes les UT sur les catalogues de stations, à entrée principalement pédologique dans l'agence).

La question déterminante des moyens, à calibrer de façon réaliste en amont pour que ce travail de recherche soit utilisable par les gestionnaires, est fort justement posée dans le projet.
Il faut cependant bien faire la différence de mailles et d'échelles recherchées car en première approche on pourrait considérer que la carte des essences d'aujourd'hui et demain se fait intégralement par modélisations depuis le bureau des chercheurs.
La facilité d'un relevé floristique avec une bonne évaluation dès 10 espèces est séduisante. Cependant elle donne beaucoup de poids aux facteurs nutritionnels et sans doute moins au principal facteur limitant supposé dans le cadre des évolutions climatiques qu'est le bilan hydrique- estimé au niveau pédologie par la réserve utile qu'on a du mal à mesurer correctement à la tarière.

La poursuite de la collaboration avec l'agence ONF de Versailles serait profitable, à préciser dans un volume de temps à y consacrer contraint, et avec des profils à bien définir (l'agent lambda n'a pas le même niveau en botanique et en pédologie que le technicien animateur sylvicole et c'est ce public-là qui serait en fonctionnement courant mis à contribution).
On aurait éventuellement une candidate stagiaire en master à Agro Paris Tech Nancy cette année.

Rambouillet , 10 décembre 2014

Milène Gentils,
Responsable du service forêt de l'Agence interdépartementale ONF de Versailles

Programme de la formation

Titre : **Adaptation des essences aux stations actuelles et aux évolutions climatiques: nouveaux outils pour le choix des essences**

Intervenant : Paulina Pinto, PhD (INRA Laboratoires LERFOB-EEF, Chargé de Mission Projet interface ONF-INRA "Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant").

Objectif : Présentation des nouveaux outils de description de l'autoécologie des essences et de la caractérisation des stations forestières dans un contexte de changement climatique.

(i) Montrer une approche analytique intégrant le climat et le sol pour la caractérisation stationelle et la définition de l'autoécologie des essences.

(ii) Comparer l'utilisation des nouveaux outils avec la méthode traditionnelle pour le choix des essences.

(iii) Appliquer les nouveaux outils au terrain et aux essences d'Ile de France.

Mots-Clés : autoécologie des essences, nutrition, climat, modèles de distribution, modèles de croissance, changement climatique.

Positionnement : formation pour les gestionnaires de l'ONF ayant des connaissances en écologie forestière, sylviculture, dendrométrie et croissance et production forestière.

Programme :

- **Introduction :** Principaux facteurs écologiques déterminant l'écologie des essences forestières de l'échelle nationale à la région.
    - illustration à l'échelle nationale
    - illustration à l'échelle de la région naturelle
- **Typologie forestière: comment ces facteurs sont-ils pris en compte dans les outils actuels d'aide à la décision?**
    - Exemple en plaine (e.g. Catalogue des types de stations forestières de L'Yveline et de l'Essonne)
- **Comment tenir compte des facteurs sol & climat dans le choix des essences en contexte climatique changeant ? : Introduction des nouvelles approches**
    - Contexte: Le changement climatique
    - Acquisition à l'échelle de la station de facteurs plutôt que de descripteurs
    - Spatialisation des facteurs à large et fine échelle
    - Modélisation de la niche et de la productivité
    - Spatialisation à large échelle de la distribution et de la productivité (Hêtre, Chêne, Erable ...).
    - Spatialisation à fine échelle de la distribution et de la productivité
    - Prévision de l'effet des changements environnementaux
- **Choix des essences et confrontation des méthodes classiques et nouvelles méthodes (Quelles essences choisir sur chaque site en forêt de Marly?)**

Méthode : Cours et analyse de cas en salle couplé à une visite de terrain en Forêt de Marly.
Timing : 8:30 - 12:00 Cours en salle (avec 1 pause café)
13:30 - 17:00 Visite forêt de Marly

Synthèse de la sortie terrain en forêt de Marly

Tournée de terrain - Formation ONF du 17/11/2014

Identification des placettes - Forêt de Marly-le-roi

Placette	1	2	4	3	5	6	7	8
X Lambert 2	579805	576851	577914	580051	577952	580385	582393	583049
X Lambert 2	2430956	2431099	2428533	2429266	2429224	2427475	2426793	2441057
IdEcoPlant(Carte 1)	MAR01	MAR02	MAR04	MAR03	MAR05	MAR06	MAR07	STGER01

Présence des essences (1 = présent)

Pin sylvestre (Ps)	0	0	0	0	0	0	0	1
Hêtre (Fs)	0	0	1	1	1	0	0	0
Chêne pédonculé (Qr)	0	0	1	1	0	0	0	1
Chêne sessile (Qp)	1	1	0	1	1	0	0	0
Charme (Cb)	0	1	1	1	1	1	0	1
Erable sycomore (Ac)	0	1	1	1	1	1	1	1
Frêne (Fe)	0	0	0	0	0	0	0	0

Conditions climatiques (modèles climatiques)

Température moy ann. (1961-90)	10.1	9.9	10.1	10.2	10.0	10.0	10.1	10.7
Déficit hydrique été (mm)	45	39	42	41	42	44	44	47

Analyses de sol en laboratoire

pHeau	4.3	4.6	7.8	4.3	5.6	6.6	4.3	8.2
ST	35	69	100	53	97	100	77	100
CN	20.3	14.8	13.2	18.9	15.5	15	17.7	14.9
Réserve en eau maximale (RUM, mm)	108	291	172	170	194	260	227	90
Profondeur.prospectable	73	200	160	160	160	190	190	70
Texture (Hor. A)	LS	LM	AL	LS	SL	LAS	SL	S
Texture (Hor. S - 40cm))	SL	LM	AL	LS	SL	LAS	SL	S
Présence de tache d'oxydo-red (fosse)	1	1	0	1	1	0	1	0

Bioindication par la flore (moyenne des valeurs indicatrices d'EcoPlant (vi), Gégout, et al., 2006)

pH_vi	4.2	5.9	6.6	5.1	6.3	6.6	5.2	6.4
ST_vi	33	75	96	54	85	89	58	81
CN_vi	22	12	10	17	11	11	16	14
Engorgement temporaire (x100)	4	4	1	5	1	1	2	2
TmoyA	10.3	9.7	10.1	10.1	9.7	10.1	9.3	10.5

Probabilité actuelle de présence des essences (modèles de distribution LERFoB-Piedallu et al., 2014, non pub.)

Pin sylvestre (Ps)_actuel	0.41	0.05	0.06	0.16	0.06	0.07	0.10	0.11
Hêtre (Fs)_actuel	0.38	0.22	0.23	0.25	0.19	0.13	0.30	0.12
Chêne pédonculé (Qr)_actuel	0.42	0.68	0.57	0.68	0.62	0.49	0.66	0.65
Chêne sessile (Qp)_actuel	0.54	0.21	0.25	0.23	0.18	0.10	0.31	0.17
Charme (Cb)_actuel	0.21	0.75	0.67	0.33	0.57	0.32	0.50	0.31
Erable sycomore (Ac)_actuel	0.01	0.20	0.22	0.05	0.19	0.19	0.08	0.07
Frêne (Fe)_actuel	0.01	0.50	0.64	0.14	0.64	0.67	0.16	0.58

Probabilité future de présence des essences (2046-65, scénario A1B, modèles distrib. LERFoB-Piedallu et al., 2014, non pub.)

Pin sylvestre (Ps)_futur	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01
Hêtre (Fs)_futur	0.05	0.06	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.01
Chêne pédonculé (Qr)_futur	0.67	0.72	0.77	0.70	0.75	0.73	0.73	0.71
Chêne sessile (Qp)_futur	0.12	0.16	0.06	0.09	0.10	0.09	0.09	0.02
Charme (Cb)_futur	0.3	0.43	0.33	0.29	0.39	0.28	0.31	0.24
Erable sycomore (Ac)_futur	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Frêne (Fe)_futur	0.02	0.08	0.22	0.03	0.13	0.09	0.10	0.21

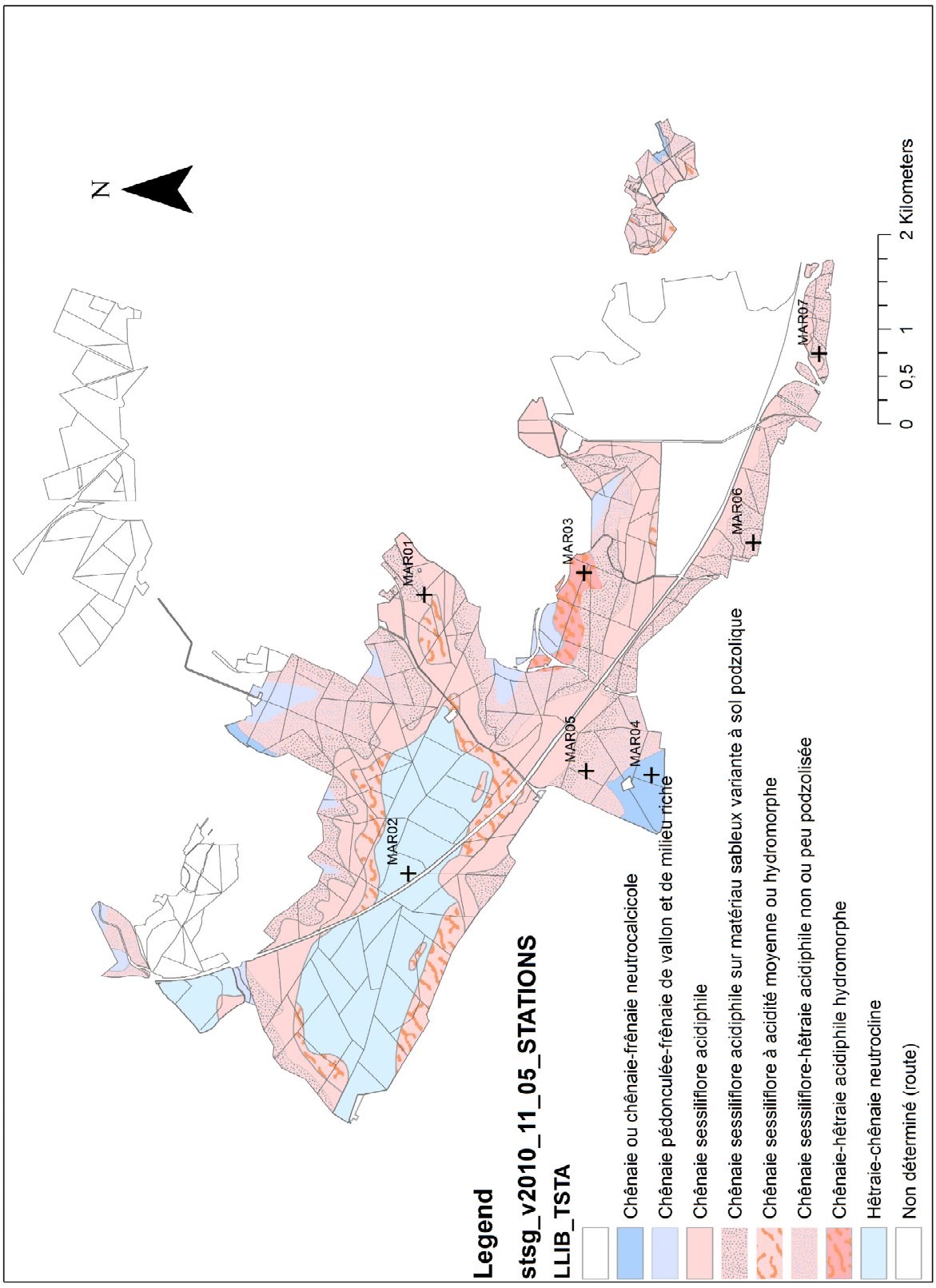
Indices de fertilité actuels (modèles LERFoB - Hêtre : Seynave et al., 2008)

Profondeur calcul IFertilité (9 décim.)	7.3	9	9	9	9	9	9	7
RU pour la profondeur Ind. fertilité	73	122	127	100	89	122	90	43
Indice de fertilité Hêtre	28.1	30.5	29.3	29.3	29.6	29.0	30.0	28.2

Dr.Paulina Pinto, interface ONF-INRA. Formation ONF, 17/11/2014

Station d'après catalogue	**5**	**10**	**3**
	Chenaie sessiliflore sur sable acidocline	sablière et	chênaie charmaie de plateau sur calcaire
Pin sylvestre (Ps)	0		
Hêtre (Fs)		0	0
Chêne pédonculé (Qr)		0	
Chêne sessile (Qp)	1	1	1
Charme (Cb)	-1	0	0
Erable sycomore (Ac)	-1	0	
Frêne (Fe)	-1	-1	-1
Chategnier	0	1	

Carte 1. Placettes demostration. Forêt de Marly.



Descriptions sur fosses pédologiques en Forêts Domaniales de Marly et de Saint-Germain
05 et 06/08/2014

auteur : N.Pousse (RDI-ONF)

Table des matières

FD Marly, parcelle n°91, fosse n°01 144
FD Marly, parcelle n° 24, fosse n°02 145
FD Marly, parcelle n°120, fosse n°03 146
FD Marly, parcelle n°1, fosse n°04 147
FD Marly, parcelle n° 5, fosse n°05 148
FD Marly, parcelle n°150, fosse n°06 149
FD Marly, parcelle n°162, fosse n°07 150
FD Saint Germain, parcelle n°36, fosse n°1 151

FD Marly, parcelle n°91, fosse n°01

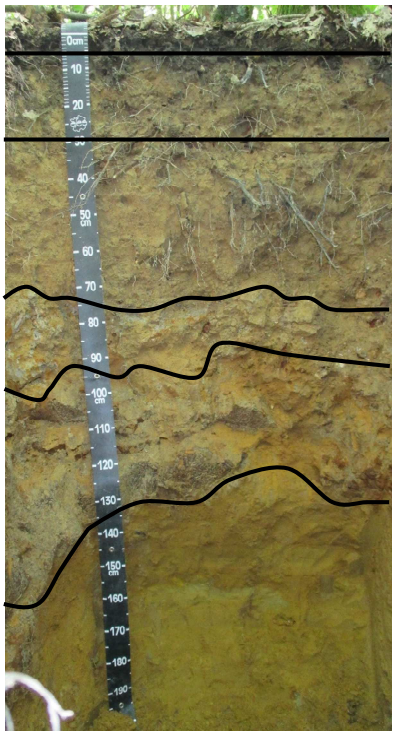
X_L2e : 579860.85, Y_L2e : 2430960.06
Géologie (BRGM, 1/50000) : Meulières de Montmorency (Stampien supérieur ou Chattien)
Substrat observé dans la fosse : Roches sédimentaires cohérentes siliceuses (grès)
Description le 05/08/2014

Antécédent climatique : ensoleillé (05/08) et pluies fortes (03/08)
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : milieu de versant (4% pente)
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : léger engorgement temporaire (nappe temporaire) au-dessus d'un niveau à très forte charge en éléments grossiers

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Brunisol dystrique rédoxique**
Humus : OLn (20mm épaisseur) et OLv (10mm épaisseur) continu, OF (5mm épaisseur) très discontinu, OH (1mm épaisseur) très discontinu de structure particulaire, transition OH/A : graduelle => **Oligomull à Eumoder** (variabilité spatiale)
La réserve utile est faible à moyenne : **108 mm** sur 70 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007)), la principale contrainte à l'enracinement est la très forte charge en éléments grossiers à partir de 70cm.



N.Pousse

Horizon A : texture SL; frais; couleur : 10 YR 3/2 (100%); structure particulaire; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de graviers (0.2-2cm) de grès et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon S1 : texture SL; frais; couleur : 10 YR 6/6 (100%); structure particulaire; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de graviers (0.2-2cm) et cailloux (2-7.5cm) de grès et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) par dm² et 1 à 3 racines moyennes (2 à 5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon S2 : texture SL; frais; couleur : 10 YR 6/5 (100%); structure particulaire; horizon peu compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de graviers (0.2-2cm), 1% de cailloux (2-7.5cm) et 3% de pierres (7.5-20cm) de grès et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) par dm² et 3 à 10 racines moyennes (2 à 5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Cg : texture SL; humide; couleurs : 5 YR 7/1 (décoloration, 50%) et 5 YR 5/8 (réoxydation, 50%); structure particulaire; horizon très compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 5% de cailloux (2-7.5cm) et 20% de blocs (>20cm) de grès et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 0 à <1 racine fine (<2mm) par dm² à pénétration localisée

Horizon Dsi : couleur : 5 YR 4/8 (grès, 100%); horizon très compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 99% de blocs (>20cm) de grès de forme irrégulière à disposition horizontale; 0 à <1 racine fine (<2mm) par dm² à pénétration localisée

Horizon IIMsi : texture SL; humide; couleurs : 10 YR 6/8 (100%); structure particulaire; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; pas d'éléments grossiers; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

FD Marly, parcelle n° 24, fosse n°02

X_L2e : 576925.63, Y_L2e : 2431119.28
Géologie (BRGM, 1/50000) : Meulières de Montmorency (Stampien supérieur ou Chattien)
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire meuble siliceuse (limon)
Description le 05/08/2014

Antécédent climatique : ensoleillé (05/08) et pluies fortes (03/08)
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : léger engorgement temporaire (nappe temporaire)

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Luvisol Typique rédoxique issu de limon**
Humus : OLn (10mm épaisseur) et OLv (5mm épaisseur) continu, OF (2mm épaisseur) discontinu, transition O/A : 2-5mm => **Oligomull**
La réserve utile est très importante : **291 mm** sur 200 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est l'apparition d'une nappe temporaire à partir de 50cm de profondeur ainsi que la rupture texturale à partir de 70cm. Ce sol présente également une forte sensibilité au tassement (limon à engorgement temporaire).

N.Pousse

Horizon A : texture Lm; frais; couleur : 7.5 YR 4/3 (100%); structure arrondie (1-2mm) très nette; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 0% d'éléments grossiers; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon E : texture Lm; frais, couleur : 7.5 YR 5/6 (100%); structure polyédrique sub-anguleuse (15-20mm) peu nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 0% d'éléments grossiers; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² et 1 à 3 racines moyennes (2 à 5mm) à pénétration homogène et <1 racine très grosse (>20mm) par dm² à pénétration déviée

Horizon Eg : texture LA; frais, couleur : 7.5 YR 5/6 (matrice, 98%); 7.5 YR 2.5/1 (concrétions ferro-manganiques, 1%) et 7.5 YR 4/6 (réoxydation, 1%); structure polyédrique sub-anguleuse (30mm) peu nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% d'éléments grossiers (meulières, 2-7.5cm); 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon BTg : texture AL; sec; couleur : 7.5 YR 5/6 (matrice, 97%); 7.5 YR 2.5/1 (concrétions ferro-manganiques, 1%), 7.5 YR 4/6 (réoxydation, 1%) et 10 YR 6/6 (décoloration, 1%); structure polyédrique sub-anguleuse (40mm) nette; horizon très compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 0% d'éléments grossiers, 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Msi : texture Lm, frais, couleur : 10 YR 6/6 (matrice, 100%), structure polyédrique sub-anguleuse (10-15mm) peu nette, horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid, 0% d'éléments grossiers, 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

FD Marly, parcelle n°120, fosse n°03

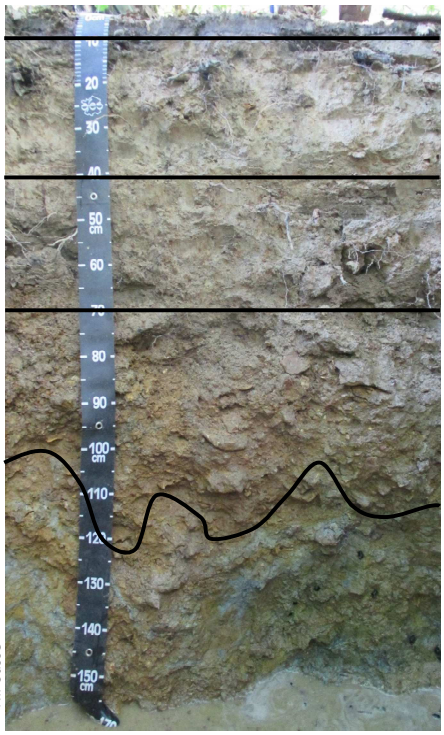
X_L2e : 578003.48, Y_L2e : 2429225.18
Géologie (BRGM, 1/50000) : Sables et grès de Fontainebleau. Stampien s.s.
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire meuble siliceuse
Description le 05/08/2014

Antécédent climatique : ensoleillé (05/08) et pluies fortes (03/08)
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : milieu de versant (environ 10% de pente, exposition 10gr)
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : 70cm
-régime hydrique : engorgement temporaire (nappe temporaire perchée) et engorgement permanent en profondeur

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Rédoxisol à horizon réductique de profondeur (RP 2008)**
Humus : OLn (10mm épaisseur), OLv (5mm épaisseur) et OF (5mm épaisseur) continus, OH (2mm épaisseur, structure granulaire) discontinu, transition OH/A : graduelle => **Eumoder**
La réserve utile est importante : **170 mm** sur 160 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est la très forte charge en éléments grossiers à disposition horizontale à partir de 70cm ainsi que l'apparition d'une nappe temporaire à partir de 6cm puis d'une nappe permanente à partir de 110cm de profondeur. Ce sol présente également une forte sensibilité au tassement (limon à engorgement temporaire).



N.Pousse

Horizon A : texture Lm; frais; couleur : 7.5 YR 3/1 (100%); structure massive; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon g1 : texture Lm; sec; couleurs : 7.5 YR 7/1 (décoloration, 80%), 7.5 YR 6/8 (réoxydation, 15%) et 7.5 YR 4/1 (matière organique, 5%); structure massive à sous-structure polyédrique subanguleuse (2-10mm) peu nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 2% de cailloux (2-7.5cm) de silex et meulière de forme irrégulière et à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) et 3 à 10 racines grosses (5 à 20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon g2 : texture Lm; frais; couleurs : 7.5 YR 6/2 (décoloration, 75%) et 7.5 YR 5/8 (réoxydation, 25%); structure polyédrique subanguleuse (50mm) peu nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 2% de cailloux (2-7.5cm) de silex et meulière de forme irrégulière et à disposition quelconque; 3 à 10 racines fines (<2mm) et 1 à 3 racines moyennes (2 à 5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Cg : texture LA; frais; couleur : 7.5 YR 5/6 (100%); structure polyédrique subanguleuse (2mm) peu nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 50% de graviers (0.2-2cm) et 20% de cailloux (2-7.5cm) de silex et meulière de forme irrégulière et à disposition horizontale; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Go : texture Alo; saturé; couleurs : 7.5 YR 6/8 (réoxydation, 50%) et GLEY1 6/5G (réduction, 50%); structure massive; horizon peu compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 40% de graviers (0.2-2cm) et 10% de cailloux (2-7.5cm) de silex et meulière de forme irrégulière et à disposition horizontale; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration localisée

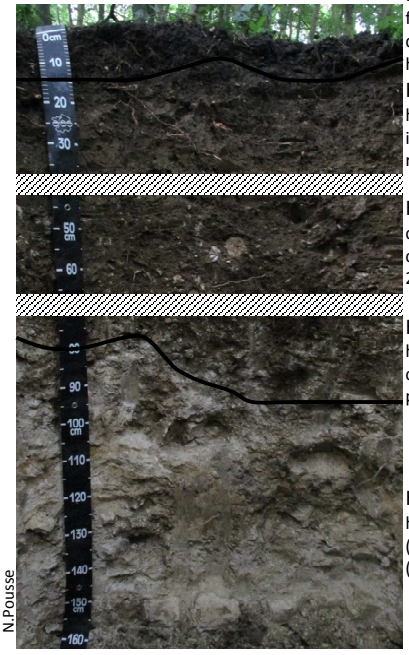
FD Marly, parcelle n°1, fosse n°04

X_L2e : 577972.67, Y_L2e : 2428558.81
Géologie (BRGM, 1/50000) : Calcaire de Saint-Ouen. Bartonien inférieur (Marinésien)
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire cohérente carbonatée
Description le 06/08/2014

Antécédent climatique : pluies faibles
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : profil drainé
présence de fossés de drainage anciens à 25m environ de la fosse

Nom du sol (RP 2008) : **Calcosol argilo-graveleux**
Humus : OLn (3mm épaisseur) peu discontinu => **Eumull carbonaté**
La réserve utile est importante : **172 mm** sur 160 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est la forte charge en éléments grossiers à disposition horizontale à partir de 85cm.



N.Pousse

Horizon Aca : texture LA; frais; couleur : 10 YR 2/1 (100%); structure grumeleuse très nette; horizon peu compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (faible intensité); 1% de graviers (0.2-2cm) calcaires de forme irrégulière et à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) et 1 à 3 racines moyennes (2 – 5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Sca1 : texture Alo; frais; couleur : 10 YR 4/4 (100%); structure polyédrique subanguleuse (5mm) très nette; horizon compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (faible intensité); 2% de graviers (0.2-2cm) calcaires de forme irrégulière et à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm), 3 à 10 racines moyennes (2 – 5mm) et 1 à 3 grosses racines (5 – 20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Sca2 : texture Alo; frais; couleur : 10 YR 4/4 (100%); structure polyédrique subanguleuse (2-3mm) nette; horizon compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 10% de graviers (0.2-2cm) et 1 % de cailloux (2-7.5cm) calcaires de forme irrégulière et à disposition quelconque; 3 à 10 racines fines (<2mm) et 0 ou <1 grosses racines (5 – 20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Sca3 : texture Alo; frais; couleur : 10 YR 5/4 (100%); structure polyédrique subanguleuse (1-2mm) très nette; horizon très compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 30% de graviers (0.2-2cm) et 5 % de cailloux (2-7.5cm) calcaires de forme irrégulière et à disposition quelconque; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Cca : texture Alo; frais; couleur : 7.5 YR 5/8 (100%); structure polyédrique subanguleuse (1-2mm) très nette; horizon très compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 25% de graviers (0.2-2cm), 5 % de cailloux (2-7.5cm) et 30% de pierres (7.5-20cm) calcaires de forme irrégulière et à disposition horizontale; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

FD Marly, parcelle n° 5, fosse n°05

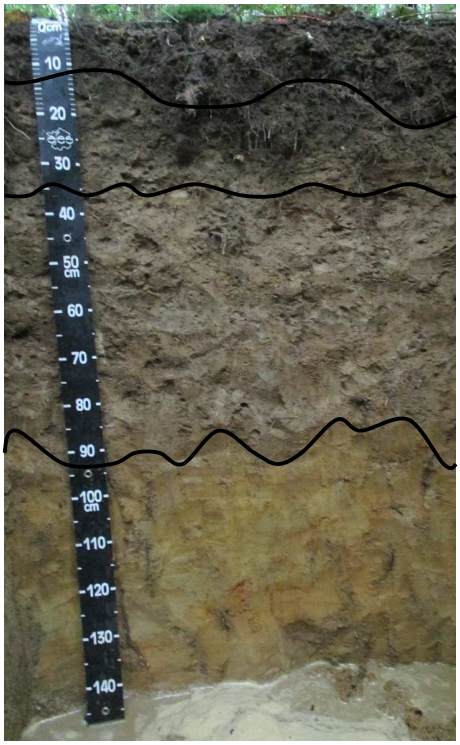
X_L2e : 578003.48, Y_L2e : 2429225.18
Géologie (BRGM, 1/50000) : Sables et grès de Fontainebleau. Stampien s.s.
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire meuble siliceuse
Description le 06/08/2014

Antécédent climatique : pluies faibles
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : 145cm
-régime hydrique : engorgement temporaire (nappe temporaire)

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Redoxisol**
Humus : OLn très discontinu => **Eumull**
Le sol est peu acide (humus de type eumull, pas de traces de podzolisation), la réserve utile est importante : **194 mm** sur 160 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte pour ce sol est l'apparition d'une nappe temporaire à partir de 35cm et la forte sensibilité à l'appauvrissement minéral (matériau parental pauvre).



N.Pousse

Horizon A : texture LS; frais, couleur : 10 YR 4/1 (100%); structure arrondie (0.5mm) très nette; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 0% d'éléments grossiers; plus de 50 racines fines (<2mm) par dm² et 3 à 10 racines moyennes (2 à 5mm) à pénétration homogène

Horizon S : texture SL; frais, couleur : 10 YR 5/3 (100%); structure particulaire nette; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% d'éléments grossiers (meulière de 0.2 à 2cm) de forme irrégulière et à disposition quelconque; de 10 à 50 racines fines (<2mm) par dm² et 1 à 3 racines moyennes (2 à 5mm) à pénétration homogène

Horizon Sg : texture SL; sec; couleurs : 10 YR 5/4 (matrice, 92%), 10 YR 6/3 (décoloration, 2%), 10 YR 5/8 (réoxydation, 5%) et 10 YR 2/1 (concrétions ferro-manganiques, 1%); structure particulaire nette; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 2% d'éléments grossiers (meulière de 0.2 à 2cm) de forme irrégulière et à disposition quelconque; de 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² et 1 à 3 racines moyennes (2 à 5mm) à pénétration homogène

Horizon Cg : texture SL; sec; couleurs : 10 YR 5/6 (matrice, 80%), 10 YR 6/6 (décoloration, 15%) et 5 YR 5/8 (réoxydation, 5%); structure particulaire très nette; horizon peu compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid, 0% d'éléments grossiers, de 1 à 3 racines fines (<2mm) à pénétration homogène

FD Marly, parcelle n°150, fosse n°06

X_L2e : 580438.88, Y_L2e : 2427477.63
Géologie (BRGM, 1/50000) : Sables et grès de Fontainebleau. Stampien s.s.
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire meuble siliceuse (limon)
Description le 06/08/2014

Antécédent climatique : pluies faibles
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : profil sec

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Brunisol luvique limoneux sur sables de Fontainebleau**
Humus : Oln très discontinu => Eumull
Le sol est riche en surface (humus de type eumull, structure du limon stable et bien développée, probablement en lien avec l'historique de mise en culture de ce sol), la réserve utile est très importante : 260 mm sur 190 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est la discontinuité structurale à partir de 70cm de profondeur. Ce sol présente une forte sensibilité à l'appauvrissement minéral (matériau parental pauvre) et une sensibilité moyenne au tassement (texture limoneuse, profil bien drainé).

N.Pousse

Horizon A : texture Lm; sec; couleur : 7.5 YR 3/1 (100%); structure grumeleuse (10mm) très nette; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 10 à 50 racines fines (<2mm) et 3 à 10 racines moyennes (2-5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon S : texture Lm; sec; couleur : 7.5 YR 6/4 (100%); structure polyédrique subanguleuse (2mm) nette; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de cailloux (2-7.5cm, meulières) de forme irrégulière et à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) et 1 à 3 grosses racines (5-20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon C : texture LA; sec; couleur : 7.5 YR 7/4 (100%); structure polyédrique subanguleuse (4mm) peu nette; horizon très compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de graviers (0.2-2cm, meulières) de forme irrégulière et à disposition quelconque; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon IIM : texture S; sec; couleur : 10 R 4/8 (100%); structure particulaire très nette; horizon très compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 2% de cailloux (2-7.5cm, meulières) de forme irrégulière et à disposition quelconque; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

FD Marly, parcelle n°162, fosse n°07

X_L2e : 582432.95, Y_L2e : 2426795.04
Géologie (BRGM, 1/50000) : Sables et grès de Fontainebleau. Stampien s.s.
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire meuble siliceuse (sables)
Description le 06/08/2014

Antécédent climatique : pluies faibles
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : engorgement temporaire (nappe temporaire)

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Podzosol ocrique luvique rédoxique**
Humus : OLn et OLv peu discontinu, OFdiscontinu et OH (1mm, particulaire) très discontinu, transition OH/A : graduelle => **Mésomull à Hémimoder** (même si localement à l'endroit de la fosse l'humus est de type mésomull, il est de type hémimoder quelques mètres plus loin correspondant plus à la morphologie de type podzol observée sur la fosse)
Le sol et le matériau parental sont pauvres chimiquement => forte sensibilité à l'appauvrissement minéral, la réserve utile est très importante : **227 mm** sur 190 cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est l'apparition d'une nappe temporaire à partir de 50cm de profondeur.

N.Pousse

Horizon Ae : poivre et sel, texture SL; frais; couleur : 7,5 YR 2,5/1 (100%); structure particulaire; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; plus de 50 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon BP : texture SL; sec; couleur : 7,5 YR 5/4 (dégradation, 100%); structure particulaire; horizon meuble ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; 1% de graviers (0,2-2cm, meulières) de forme irrégulière et à disposition quelconque; 10 à 50 racines fines (<2mm) et 3 à 10 grosse racines (5-20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon E : texture SL; sec; couleur : 10 YR 6/4 (matrice, 100%); structure particulaire; horizon peu compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 3 à 10 racines fines (<2mm) et 1 à 3 racines moyennes (2-5mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon BTg : texture SA; sec; couleurs : 10 YR 6/6 (matrice, 20%), 10 YR 7/2 (décoloration, 30%), 7,5 YR 5/6 (réoxydation, 49%), 7,5 YR 2,5/1 (concrétions ferro-manganiques, 1%); structure particulaire; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 3 à 10 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Cg : texture SA; frais; couleurs : 10 YR 6/8 (matrice, 50%), 10 YR 7/4 (décoloration, 9%), 7,5 YR 4/6 (réoxydation, 40%), 7,5 YR 2,5/1 (concrétions ferro-manganiques, 1%); structure particulaire; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Msi : texture S; frais; couleur : 10 YR 7/6 (matrice, 100%); structure particulaire; horizon compact ne faisant pas effervescence à HCl dilué à froid; absence d'éléments grossiers; 0 ou <1 racine fine (<2mm) par dm² à pénétration homogène

FD Saint Germain, parcelle n°36, fosse n°1

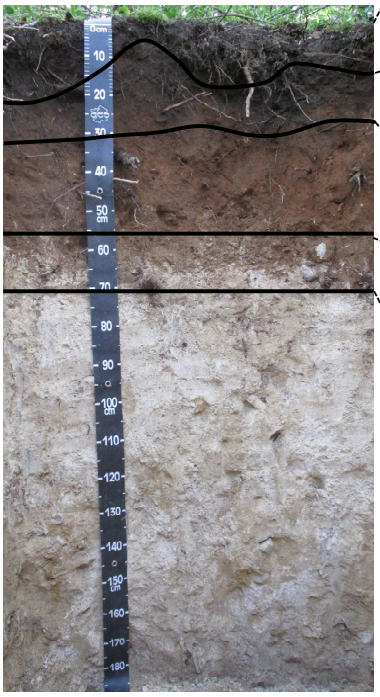
X_L2e : 583104.27, Y_L2e : 2441070.86
Géologie (BRGM, 1/50000) : Alluvions anciennes de haute terrasse (terrasse de 20-30 m) : sables et graviers sur Calcaires marins indifférenciés (Marnes et caillasses, Calcaires à Cérithes, Calcaire grossier)
Substrat observé dans la fosse : roche sédimentaire cohérente carbonatée
Description le 05/08/2014

Antécédent climatique : ensoleillé (05/08) et pluies fortes (03/08)
Pas d'affleurements rocheux à la surface du sol

Geomorphologie
-apports et départs d'eau équilibrés
-position topographique : zone plane
-profondeur d'apparition de la nappe observée le jour de la description : non observée
-régime hydrique : profil drainé

pas d'influence humaine, animale ou autre perturbation

Nom du sol (RP 2008) : **Calcosol sableux**
Humus : OLn (2mm épaisseur) continu et OLv (1mm épaisseur) discontinu, OF et OH absent, transition O/A : <2mm => **Mésomull carbonaté**
La réserve utile est faible à moyenne : 90 mm sur 70cm (calcul selon Al Majou et al. (2007) et Tétégan et al. (2011)), la principale contrainte à l'enracinement est la très forte charge en éléments grossiers à partir de 55cm.



N.Pousse

Horizon Aca1 : texture LS; frais; couleurs : 5 YR 3/1 (matières organiques, 95%), 5 YR 7/1 (matrice : grains de sables, 5%); structure arrondie (2mm) nette; horizon meuble faisant effervescence à HCl dilué à froid (faible intensité); 1% de graviers (0,2-2cm, calcaire dur) de forme arrondie à disposition quelconque; plus de 50 racines fines (<2mm) par dm² et 3 à 10 racines moyennes (2 à 5mm) à pénétration homogène

Horizon Aca2 : texture LS; humide; couleurs : 5 YR 3/1 (matières organiques, 10%), 5 YR 5/7 (matrice, 90%); structure polyédrique subanguleuse (5mm) peu nette à sous-structure particulaire; horizon peu compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (faible intensité); 1% de graviers (0,2-2cm, calcaire dur) de forme irrégulière à disposition quelconque; 3 à 10 racines moyennes (2 à 5mm) et 1 à 3 racines fines (<2mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon Sca : texture SL; frais; couleur : 5 YR 5/7 (matrice, 100%); structure particulaire; horizon peu compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 2% de graviers (0,2-2cm) et 2% de cailloux (2-7,5cm) de calcaire dur de forme irrégulière à disposition quelconque; 3 à 10 racines fines (<2mm) et 1 à 3 grosses racines (5 à 20mm) par dm² à pénétration homogène

Horizon IICca : texture SL; sec; couleur : 5 YR 8/1 (matrice, 100%); structure particulaire; horizon compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 40% de graviers (0,2-2cm) et 10% de cailloux (2-7,5cm) de calcaire dur (majoritairement) et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 3 à 10 racines fines (<2mm) à pénétration homogène et 0 ou <1 grosses et très grosses racines (5 à >20mm) par dm² à pénétration déviée

Horizon IIDca : sec; couleur : 5 YR 8/1 (matrice, 100%); horizon très compact faisant effervescence à HCl dilué à froid (forte intensité); 70% de graviers (0,2-2cm) et 10% de cailloux (2-7,5cm) de calcaire dur (majoritairement) et silex de forme irrégulière à disposition quelconque; 0 ou <1 racine fine (<2mm) à pénétration homogène

Fiche terrain utilisée pour l'inventaire de la flore en Forêt de Marly (17/11/2014)

Auteur relevé															**Relevé**				pH	CN	ET.i	Tmoy	**Bilan**
N° de relevé															Agrostis capillaris				5.1		0	12	**N°rel.**
															Ajuga reptans				6.1	10	2	7.3	**pH**
Peuplement															Arctium nemorosum						-1		<4
Futaie irrégulière															Arum maculatum				6.9	10	3	10	
Futaie régulière															Athyrium filix-femina				5.2	10	1	7.3	4-5
TSF															Atrichum undulatum				5.2	11	6	10	
Taillis															Brachypodium pinnatum				8.5	10	-4	16	5-6
															Brachypodium sylvaticum				6.9	10	-1	12	
Recouvrement des strates															Brachythecium rutabulum				6.4	10	2	11	6-7
Rec. de la strate arbor. (H>7 m + taillis) %															Bromus ramosus				7.1	11	-1		
Rec. de la strate arbustive (0,5<H<7) %															Carex pendula				6.3	10	6	14	>= 7
Recouvrement de la strate herbacée %															Carex pilulifera				4.2	24	6	10	
Recouvrement de la strate muscinale %															Carex remota				5.8	10	8	10	Est. pH
															Carex sylvatica				6.4	10	4	9.6	
															Circaea lutetiana				6.4	10	9	10	**C/N**
Essences/relevé															Cirsium arvense				7.0	13	2		<12
	A	a	h	A	a	h	A	a	h	pH	C/N	ET	T		Clematis vitalba				8.5	10	-5	16	
Acer campestre (érable champ.)										7	10	-4	11		Corylus avellana				6.8	10	7	9.8	12-16
Acer platanoides (érable plane)										8	10	-5	8		Crataegus monogyna				7.0	10	0	13	
Acer pseudoplatanus (érable syc)										8	10	-4	7		Dicranella heteromalla				3.6	26	1	10	16-20
Alnus glutinosa (aulne glutineux)										6	10	9	11		Dicranum scoparium				3.0	32	1	7	
Betula pendula (bouleau ver.)										3	32	13	9		Digitalis purpurea				3.0	19	-4	7.5	20-25
Carpinus betulus (charme)										6	10	16	10		Dryopteris carthusiana				3.0	12	8	8.7	
Castanea sativa (châtaigner)										4	26	-3	12		Dryopteris filix-mas				5.7	10	-1	6.8	>=25
Fagus sylvatica (hêtre)											19	-4	8		Epilobium montanum				6.1	10	-4	6.6	
Fraxinus excelsior (frêne)										7	10	0	9		Euonymus europaeus				7.4	10	-1	11	Est. C/N
Ilex aquifolium (houx)										4		-1	11		Eupatorium cannabinum				7.6	10	-1	12	
Pinus sylvestris (pin sylvestre)										3	39	0	9		Euphorbia amygdaloides				6.6	10	-4	12	
Populus tremula (temble)										6	10	20	10		Euphorbia cyparissias				8.3		-4	3	**Engorg.**
Prunus avium (merisier)										6	10	-2	11		Eurhynchium praelongum				5.6			11	<0
Quercus petraea (chêne sessile)										4		7	10		Eurhynchium striatum				6.2	10	7	11	
Quercus pubescens (chêne pub)										9		-8	16		Fissidens taxifolius				6.2	10	3	12	0-2
Quercus robur (chêne pedonculé)										6		19	11		Fragaria vesca				6.6	10	-3	3	
Robinia pseudoaccacia (robinier)															Galeopsis tetrahit				5.0	10	-2	8.1	2-5
Sorbus aria (alisier blanc)										9		-9	7		Geranium robertianum				6.5	10	-5	6.5	
Sorbus aucuparia (sorbier des ois.)										3	29	-4	6		Geum urbanum				6.7	10	-2	10	5-10
Sorbus torminalis (alisier tormin.)										6	20	6	11		Glechoma hederacea				6.6	10	2	10	
Tilia cord. (tilleul à flles en coeur)										7	10	5	10		Hedera helix				6.5	10	2	12	>10
Tilia plat.(tilleul à grandes flles)										8	10	-5	9		Hieracium sabaudum				4.7		1	12	
Ulmus glabra (orme des mont.)										7	10	-4	8		Hypericum perforatum				6.9		-1	16	Est Eg
Ulmus laevis (orme lisse)										8	10	2	10		Hypnum cupressiforme				3.0	30	1	10	
Ulmus minor (orme champêtre)										7	10	-1	13		Impatiens parviflora						-2		**RU (sol)**
															Juncus conglomeratus				5.2	18	7		
															Juncus effusus				5.2		4	11	**App/Dép**
															Lamium galeobdolon				6.3	10	-1	8.5	
															Leucobryum glaucum				3.0	31	6	10	**BH**
															Ligustrum vulgare				7.3	10	-4	12	
															Linaria repens				4.9	16	-2	12	
															Lonicera periclymenum				4.6	23	16	11	**T an.**
															Mercurialis perennis				7.6	10	-6	8.5	<5
															Milium effusum				5.7	10	1	8.5	
															Mnium hornum				3.0		1	10	5-8
															Moehringia trinervia				5.5	10	-4	8.8	
															Molinia caerulea				3.0	31	17	11	8-10
															Mycelis muralis				6.6	13	-4	3	
															Origanum vulgare				8.0	11	-2	16	10-12
															Plagiomnium undulatum				6.3	10	1	10	
															Plagiothecium nemorale								>=12
															Poa chaixii				5.5	10	-1	6.1	
															Poa nemoralis				6.0	10	-2	7.2	Est. T
															Polygonatum multiflorum				6.6	10	4	9.6	
															Polytrichum formosum				3.0	25	13	9.5	
															Pteridium aquilinum				3.0	32	1	12	**Station**
															Ribes alpinum				6.9	12	-6	7.3	
															Rubus sp.								
															Rumex acetosella				4.8	24	-3	12	
															Rumex sanguineus				7.3		1	12	
															Salix caprea				5.7		5	9.3	
															Sambucus nigra				8.3	10	-4	11	
															Scrophularia nodosa				6.0	10	5	9	
															Solanum dulcamara				6.7	10	-1	12	
															Stachys sylvatica				6.9	10	4	9.3	
															Taxus baccata				8.4		0	11	
															Teucrium scorodonia				4.8	23	3	12	
															Thuidium tamariscinum				5.5	20	15	11	
															Torilis japonica						0		
VI d'après Gégout 2003, 2005															Urtica dioica				6.7	10	-3	8.5	
															Viola reichenbachiana				6.5	10	-5	7.6	
Hyd : indice d'hydromorphie temporaire (*100																							

Rapport final convention de recherche/développement ONF-INRA N° 12000381 : Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant.

Nancy, 2016.