PREVISION DE L'IMPACT DES DEPOTS ATMOSPHERIQUES AZOTES ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITE FORESTIERE EN FRANCE

Apport de la modélisation dynamique des charges critiques azotées

Janvier 2017

N° de contrat : *1362c0008*
Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *CNRS*

Coordination technique ADEME : *GALSOMIES Laurence* **– Direction\Service :** *VANVES DVTD SEQA*

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

RAPPORT D'ETUDE

En partenariat avec :

EcoLab Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement — LERFoB — Lund University — University of Iceland — Office National des Forêts — Université de Toulouse — Université Paul Sabatier Toulouse III — cnrs — INP ENSAT

REMERCIEMENTS

Les membres du comité de pilotage de l'étude MODYCRIN (cités par ordre alphabétique) sont :

- Didier ALARD, Université de Bordeaux - INRA, UMR BioGeco, Bordeaux, France ;
- Salim BELYAZID, Consulting & Communication AB, Sweden and Institute of Ecology, CEC group, Lund University, Lund, Sweden ;
- Emmanuel CORCKET, Université de Bordeaux - INRA, UMR BioGeco, Bordeaux, France ;
- Laurence GALSOMIÈS, ADEME, Service de la qualité de l'air, Paris, France ;
- Jean-Claude GEGOUT, AgroParisTech, UMR 1092 LERFOB, Nancy, France ;
- Manuel NICOLAS, ONF, Département R&D, Fontainebleau, France ;
- Anne PROBST, EcoLab (Laboratoire Ecologie fonctionnelle et Environnement), Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France ;
- Harald SVERDRUP, University Lund, Sweden and Industrial Engineering, University of Iceland, Iceland.

Nous tenons à remercier l'Office National des Forêts, et plus particulièrement Marc LANIER et Manuel NICOLAS (Département Recherches et Développement / ONF), pour nous avoir permis d'accéder aux multiples données du réseau RENECOFOR, ainsi que Laurence GALSOMIÈS (Ingénieur ADEME) pour son suivi attentif du projet MODYCRIN.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. PROBST Anne, RIZZETTO Simon, BELYAZID Salim, GEGOUT Jean-Claude, ALARD Didier, CORCKET Emmanuel, MANSAT Arnaud, SVERDRUP Harald. 2017. Prévision de l'impact des dépôts atmosphériques azotés et du changement climatique sur la biodiversité forestière en France – Apport de la modélisation dynamique des charges critiques azotées. Rapport ADEME, 50 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr, rubrique Médiathèque (URL)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

TABLE DES MATIERES

Résumé 4
1. Introduction 5
1.1. Contexte et enjeux 5
1.2. Objectifs de l'étude MODYCRIN 7
2. Résultats de l'étude 9
2.1. Déroulement de l'étude 9
2.2. Régionalisation de l'utilisation de ForSAFE-VEG 9
2.2.1. Validation du modèle 10
2.2.2. Régionalisation de l'utilisation de ForSAFE 13
2.3. Attribution de classes EUNIS et Habitats aux sites RENECOFOR - Indices de biodiversité et leur évolution 15
2.4. Amélioration de la table VEG : Paramétrisation et groupes fonctionnels 18
2.4.1 Paramétrisation et amélioration de la table Veg 18
2.4.2. Valeurs des traits fonctionnels 27
2.5. Estimation des charges critiques azotées à l'horizon 2100 (changements de biodiversité) 28
2.5.1. Richesse spécifique et index harmonisé de biodiversité (évolution temporelle) 28
2.5.2. Impact à long terme des scénarios de changement de dépôts azotés et du climat sur la composition de la solution de sol 31
2.5.3. Impact à long terme des scénarios de changement de dépôts azotés et du climat sur la composition floristique du sous-étage 35
2.5.4. Impact à court terme de la gestion forestière 36
3. Conclusion générale 40
Références bibliographiques 41
Index des tableaux et figures 44
Sigles et acronymes 46
Annexe 1 – Valorisations scientifiques de l'étude MODYCRIN 47

Résumé

Dans le cadre de la convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance, les pays européens s'engagent à réduire leurs émissions et dépôts atmosphériques, notamment azotés. Pour la France, il apparaît en effet primordial de pouvoir prédire l'effet de ces dépôts atmosphériques sur les écosystèmes forestiers, notamment du fait de leur impact sur le fonctionnement des sols, sur la santé des forêts et sur la biodiversité végétale du sous-bois. Pour ce faire, des modèles couplés biogéochimiques – écologiques, tels que ForSAFE-VEG, sont développés. Ils permettent de simuler sur le long terme l'impact des dépôts atmosphériques et du changement climatique sur la biodiversité forestière et donc d'estimer les charges critiques, outil permettant d'apprécier la sensibilité d'un écosystème aux dépôts d'azote. Au cours de précédents projets, le modèle ForSAFE-VEG a été calibré et validé pour la France sur certains sites forestiers appartenant au réseau national RENECOFOR (décrits au niveau 3).

L'étude MODYCRIN vise à élargir l'utilisation de cette approche à l'ensemble des 102 placettes du réseau RENECOFOR afin d'estimer les charges critiques azotées à l'échelle du territoire et d'en faire la cartographie, en rattachant chacune d'elles à une classe d'habitat EUNIS, et en utilisant la notion de groupes fonctionnels pour les prévisions de changement de biodiversité. L'accent est mis sur la finalisation de la construction d'une table de végétation pour la France, basée sur des données mesurées issues d'une grande base de données phytoécologiques (base de données EcoPlant, (Gegout et al. 2005), ainsi que sur la fin de la calibration du modèle ForSAFE (grâce notamment à l' utilisation de cette base de données finalisée) sur une douzaine de placettes de référence dans un premier temps, puis sur l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR.

La paramétrisation de la table de végétation est réalisée pour élaborer des modèles de régression logistique permettant de prédire l'évolution de plusieurs centaines d'espèces végétales forestières métropolitaines, en réponse à des modifications d'une dizaine de facteurs environnementaux majeurs. Par ailleurs, en collaboration étroite avec des modélisateurs Suédois, la calibration du modèle ForSAFE sur l'ensemble des placettes étudiées s'effectue notamment par une prise en compte stricte d'un grand nombre de paramètres dont les variations sont connues (mesurées) au cours du temps, et qui sont représentatifs des conditions stationnelles rencontrées sur l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR. La prise en compte de ces paramètres a donc permis une calibration du modèle qui intègre l'ensemble des gradients environnementaux présents sur la France.

Mots clés : pollution atmosphérique ; dépôt atmosphérique azoté ; forêt ; modélisation couplée biogéochimie – écologie ; biodiversité végétale ; charges critiques ; groupes de végétation.

ABSTRACT

The Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution was signed by different European countries to reduce the emissions and the atmospheric deposition of pollutants, and particularly to limit the noticeable impact of atmospheric nitrogen deposition on terrestrial ecosystems. The MODYCRIN project describes a modelling approach, which couples biogeochemical and ecological models. The objective is to predict the atmospheric deposition effects under climate change on forest ecosystems, particularly using the modifications observed at the understorey vegetation scale. These changes are used to calculate nitrogen critical loads that reflect ecosystems sensitivity to nitrogen atmospheric deposition. Following previous investigations, the first steps of the project aim at doing an important work to calibrate and validate the biogeochemical – ecological coupled model ForSAFE for French environmental conditions. For that purpose, data from some well-documented forest sites belonging to the French forest ICP network RENECOFOR, are used. This work was done in partnership with Swedish modellers and French ecologists.

The MODYCRIN project has a main objective to enlarge the modelling approach to the country scale using the whole RENECOFOR network – i.e. 102 sites previously classified according to their EUNIS habitat class. To reach this aim, the project was focussed on ending the construction of the Table VEG for France by combining with the measured phytoecological datas from the ecological database EcoPlant (Gegout et al. 2005)), as well as the calibration of the ForSAFE model on 12 reference RENECOFOR sites, before extrapolation to the whole set of RENECOFOR sites. The parametrisation of the vegetation table was set up to perform logistic regression models, in order to predict the evolutions of a hundred of vegetation species for the French territory, under the influence of a decade of main environmental factors

The calibration of the ForSAFE model on the whole set of RENECOFOR sites was performed using a large set of parameters which variations were known (measured) on a long period of time, and which are representative of the environmental conditions of the forest stations usually found on the forest network (RENECOFOR). Taking into account of these parameters allow a reliable calibration of the model for a large environmental gradient in France.

Key words: atmospheric pollution; atmospheric nitrogen deposition; forest; coupled biogeochemistry – ecology modelling; vegetation biodiversity; critical loads; vegetation groups.

1. Introduction

1.1. Contexte et enjeux

Les activités anthropiques ont considérablement contribué à une augmentation des émissions d'azote et de soufre dans l'atmosphère depuis 1880, ce qui a entraîné une accentuation des processus d'acidification et d'eutrophisation dans les écosystèmes, notamment terrestres (Galloway et al. 2003; Wim de Vries et al. 2007; de Schrijver et al. 2008). Or, les dépôts atmosphériques sont connus pour avoir des effets notables et négatifs sur le fonctionnement des écosystèmes en influençant le fonctionnement du sol et sa balance nutritive, et donc la croissance des forêts, leur état sanitaire et la biodiversité qu'elles hébergent (Probst et al. 1995; Belyazid 2006; Jonard et al. 2012).

Pour ces raisons, l'Europe a décidé de mener un effort global afin de réduire la pollution atmosphérique, et ce en impliquant tous les pays européens via la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (UNECE, 2005). En France, les émissions de soufre ont ainsi diminué de 80 % depuis 1980 alors que la diminution est moins évidente pour l'azote (35 % pour NOx et 5 % pour NHy) (CITEPA, 2010). Cette diminution moindre est essentiellement due à la multiplicité et à la diversité des sources d'azote (Galloway et al. 2008), ainsi qu'à la complexité du cycle de l'azote étant donné qu'il interagit avec tous les compartiments de l'écosystème (ex. sol, plantes, micro-organismes). Pour ces raisons, les émissions atmosphériques des composés azotés, ses dépôts et ses effets sur les écosystèmes, sont devenus un intérêt primordial pour la recherche ces dernières décennies (Bobbink et al. 2010; van Dobben et de Vries 2010). De ce fait, les potentiels effets de forts dépôts d'azote sur les écosystèmes sont largement documentés. Il a été montré qu'un apport d'azote excédentaire dans un écosystème terrestre, forestier ou prairial, engendrait des modifications au niveau de la richesse spécifique (Stevens et al. 2004) et de la composition (Krupa 2003; Bobbink et al. 2010) de la communauté végétale, impactant ainsi directement la biodiversité.

De plus, l'impact du climat est important sur les forêts. Le climat a un impact direct sur les forêts via les précipitations et la température, et un impact indirect sur la décomposition de la matière organique, et donc sur la teneur en azote du sol (Butler et al. 2012; Guntiñas et al. 2012). Les effets de la pollution atmosphérique azotée doivent donc être considérés conjointement avec ceux du changement climatique, et ce particulièrement dans le contexte actuel du changement climatique.

Pour comprendre et prédire sur le long terme les effets combinés de la pollution atmosphérique azotée et du changement climatique sur les forêts, le seul outil adapté est la modélisation dynamique couplée biogéochimique – écologique (de Vries et al. 2010, Probst et al., 2013). Le principe d'une telle approche est de considérer que les dépôts azotés et le climat modifient les caractéristiques biogéochimiques du sol (pH, cycle de l'azote) (Gaudio et al., 2015), ce qui engendre des changements en cascade au niveau des espèces végétales se développant sur le système considéré, chaque espèce végétale ayant des exigences bien définies au regard des facteurs du milieu.

Dans ce contexte, la France s'investit de manière non négligeable depuis une dizaine d'années dans le développement d'outils de modélisation adaptés, notamment par le biais de projets menés conjointement avec l'ADEME. Ainsi, les projets DYNAMO I (Bortoluzzi et al., 2010) et II (Gaudio et al., 2014) ont permis d'améliorer l'approche de modélisation couplée et d'adapter un modèle couplé existant, ForSAFE-VEG (Wallman et al. 2005; Belyazid et al. 2011), aux écosystèmes forestiers français. Ces projets ont permis de simuler sur une dizaine de sites forestiers appartenant au réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers), développé et suivi par l'ONF (Ulrich et Lanier 1996), l'évolution de la biodiversité et des peuplements forestiers en tenant compte des scénarios de dépôts azotés et des scénarios climatiques. Pour ce faire, une base de données regroupant 476 espèces végétales, la table de végétation (table VEG), a été conçue et renseigne sur les exigences écologiques des différentes espèces. Du fait du travail réalisé dans les projets précédents, cette table VEG regroupe maintenant les espèces les plus fréquemment rencontrées en forêt française, ainsi que plusieurs espèces moins fréquentes mais indicatrices de paramètres fondamentaux relatifs aux changements environnementaux tels que l'eutrophisation et le climat. Grâce à ces outils, les charges critiques azotées (Nilson et Grennfelt 1988; Probst et Leguédois 2008), reflétant la sensibilité d'un écosystème à la pollution azotée, ont ainsi été estimées.

Le développement de ces thématiques a permis au laboratoire EcoLab du CNRS et au Point Focal National (PFN) français pour les charges critiques, porteur du présent projet MODYCRIN, de représenter la France au sein du groupe de travail sur les effets de la pollution atmosphérique, impliqué dans le Programme International Concerté sur la Modélisation et

la Cartographie (PIC M&C, http://www.icpmapping.org/). Le PIC M&C utilise en effet les travaux des différents pays européens pour élaborer des cartes à l'échelle européenne illustrant l'évolution des charges critiques azotées sur les territoires nationaux. Les projets sur les charges critiques, portés par le CNRS et soutenus par l'ADEME, ont donc un rayonnement international tant du point de vue fondamental que d'applications concrètes vis-à-vis des enjeux de réduction des émissions de polluants atmosphériques.

Cependant, à ce stade, les simulations du modèle ForSAFE-VEG sont réalisées seulement pour une dizaine de sites forestiers français mais décrits par un jeu de données très complet (PIC Forêts niveau 3), permettant une calibration et une validation du modèle pour la France (Projet Dynamo II). Il y a cependant un enjeu fort à pouvoir prédire de façon précise les impacts et les charges critiques en polluants sur les écosystèmes aux échelles régionale et nationale. La modélisation des émissions atmosphériques transfrontières de contaminants et de leurs dépôts (modèle EMEP) se joue à ces niveaux d'échelles dans les travaux réalisés par EMEP pour l'Europe. Dans une optique de régionalisation des charges critiques azotées, il est donc maintenant indispensable d'appliquer la modélisation couplée biogéochimique – écologique à ces échelles. Cela passe par la nécessité de généraliser le modèle ForSAFE-VEG à partir de son utilisation sur des sites décrits par un jeu de données plus restreint, ce qui est le cas par exemple des autres sites du réseau RENECOFOR (102 au total). Ce challenge permet d'obtenir une bonne représentation des écosystèmes forestiers sur l'ensemble du territoire français pour mieux étendre le champ d'utilisation du modèle à d'autres types d'écosystèmes. Un enjeu fort serait également d'appliquer la modélisation dynamique sur les zones Natura 2000 (http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Natura-2000,2414-.html).

Les projets précédents (notamment DYNAMO (Bortoluzzi et al. 2010) et DYNAMO II (Gaudio et al. 2014)) ont également permis de fournir les premières estimations de l'évolution de la biodiversité végétale selon diverses combinaisons de scénarios de dépôts atmosphériques et de climat, et ce à l'horizon 2100, et en se basant sur les exigences écologiques des espèces renseignées dans la table VEG. Toutefois, seul un nombre limité d'écosystèmes a été considéré. L'enjeu est important car il est nécessaire de tester ces scénarios sur un plus grand nombre d'écosystèmes.

Les prédictions concernant l'évolution de la biodiversité peuvent se faire à l'échelle de l'espèce mais aussi à celle du groupe fonctionnel. Pour le moment, les valeurs des traits fonctionnels ont été renseignées dans la table VEG pour 123 espèces sur 476, en se basant sur la base de données LEDA (http://www.leda-traitbase.org/LEDAportal/) qui fournit la valeur de plusieurs traits fonctionnels pour un certain nombre d'espèces. De plus, les exigences écologiques des espèces sont renseignées dans la table VEG « à dire d'experts » (pour le moment), ce qui donne lieu à différentes interprétations et à des imprécisions. Une quantification basée sur des données mesurées permettrait assurément d'améliorer la table VEG et donc les prédictions du modèle.

Pour bien comprendre le principe de cette modélisation couplée se référer aux rapports concernant les projets DYNAMO (Bortoluzzi et al., 2010), VALERIANE (Obeidy et al., 2012) et DYNAMO II (Gaudio et al., 2014) où ce principe est décrit en détail (Figure 1).

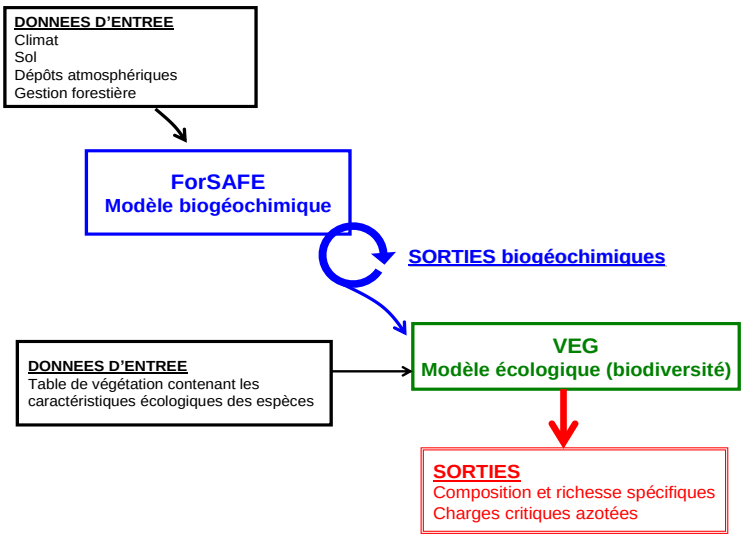


Figure 1 : Fonctionnement du modèle ForSAFE-VEG (Gaudio et al., 2014)

L'étude MODYCRIN s'inscrit dans la continuité des travaux menés pour déterminer et prédire sur le long terme la réponse des écosystèmes terrestres aux dépôts atmosphériques et au changement climatique via la notion de charges critiques. L'estimation des charges critiques repose ici sur la modélisation dynamique couplée biogéochimique – écologique, qui permet de prédire des changements de biodiversité végétale à partir desquels les charges critiques azotées seront estimées.

Comme les projets précédents, MODYCRIN repose sur une collaboration interdisciplinaire forte entre des biogéochimistes, des écologues et des modélisateurs français et suédois.

Dans le cadre du projet DYNAMO II, le modèle ForSAFE-VEG a été appliqué sur une dizaine de sites forestiers français suffisamment bien renseignés (RENECOFOR-CATAENAT, développé et suivi par l'ONF) en termes de suivis de terrain pour que l'ensemble des données d'entrée nécessaire au fonctionnement du modèle soit disponible (Tableau 1, Figure 2).

Les placettes ont été sélectionnées pour prendre en compte des conditions environnementales variées (sols, localisation). Ces placettes sont dominées par quatre essences ligneuses différentes, dont la flore de sous-étage a été décrite grâce à des relevés phytosociologiques exhaustifs :

- CHS41 et CPS77, dominées par le chêne sessile et / ou pédonculé (*Quercus petraea* et *Q. robur*),
- EPC08, EPC63 et EPC87, dominées par l'épicéa (*Picea abies*),
- HET64, dominée par le hêtre (*Fagus sylvatica*),
- SP05, SP11, SP38, SP57 et SP68, dominées par le sapin (*Abies alba*).

1.2. Objectifs de l'étude MODYCRIN

Dans ce document sont présentées les démarches pour atteindre les objectifs, les développements méthodologiques et les résultats acquis dans l'étude MODYCRIN.

L'objectif global est de généraliser l'utilisation du modèle couplé biogéochimique – écologique ForSAFE-VEG, en vue d'estimer les charges critiques azotées et l'évolution de la biodiversité des écosystèmes forestiers français à l'échelle nationale. Cela nécessiterait soit *i)* une « dégradation » du modèle afin qu'il puisse être utilisé sur des sites définis avec un jeu de données relativement faible (données mesurées caractérisant le milieu), ou bien *ii)* l'établissement de « lois » de calcul permettant d'estimer certaines variables à partir de données mesurées disponibles (afin de pallier l'absence de certaines données). C'est la deuxième solution qui a été retenue car le modèle ne peut être « dégradé » sans altérer son fonctionnement. Une estimation des variables d'entrée manquantes sur certaines placettes peut ainsi être réalisée grâce au regroupement de placettes en fonction de leurs caractéristiques environnementales, et grâce au développement de lois utilisant d'autres variables disponibles. Dans cette même optique de généralisation de l'utilisation du modèle, la biodiversité végétale est évaluée par la prise en compte des espèces considérées individuellement mais aussi à partir d'une approche par groupes fonctionnels et par types d'écosystèmes qui sont classés selon les classements européens EUNIS (European Nature Information System) et Habitats (classement des écosystèmes menacés). Dans la classification EUNIS et Habitats, les habitats forestiers sont essentiellement définis en fonction de l'espèce d'arbre dominante, des caractéristiques de la station, et de la flore du sous-bois (Louvel et al. 2013).

Ces deux classifications présentent également le grand avantage d'être communes à tous les pays européens. La classification Habitats sert aussi de référence à un programme européen de conservation des écosystèmes remarquables Natura 2000.

Plus précisément, les tâches nécessaires au bon déroulement de l'étude MODYCRIN sont les suivantes :

1 - Régionalisation de l'utilisation de ForSAFE-VEG : il s'agit d'élargir l'approche de modélisation couplée ForSAFE-VEG aux 102 placettes du réseau RENECOFOR représentatives des grands types d'écosystèmes forestiers du territoire français,

2 - Attribution de classes EUNIS et Habitats aux sites RENECOFOR : attribuer des classes EUNIS et Habitats aux 102 placettes RENECOFOR, faire une étude de faisabilité sur la possibilité de modéliser les types d'habitats forestiers Natura 2000 grâce à la nouvelle version du modèle élargie à l'ensemble des sites d'étude.

CHP = Quercus robur *L.*,

CHS = Quercus petraea *Liebl.*,

CPS = mixed Q. robur / Q. petraea,

EPC = Picea abies *(L.) Karst.*,

HET = Fagus sylvatica L.,

PM = Pinus pinaster Aiton,

PS = Pinus sylvestris L.,

SP = Abies alba Mill.

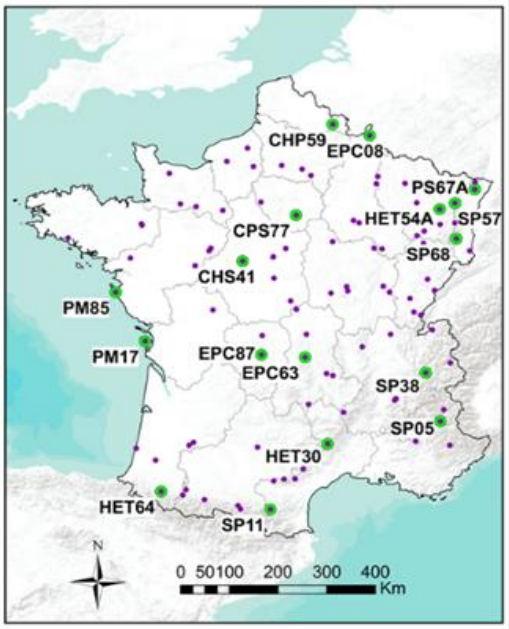


Figure 2 : Carte localisant les 102 placettes (●) du réseau RENECOFOR avec les 17 placettes (●) du sous-réseau CATAENAT utilisées pour la modélisation

NB : *Les sites sont identifiés par des lettres indiquant l'espèce arborée dominante de la placette. Les nombres correspondent au département de localisation du site (Ponette et al., 1997)*

SITE	Essence dominante	Géologie	Altitude (m)	Coordonnées	Région	Topographie et pente
CHS41	*Quercus petraea*	Limons et limons sableux épais	127	47°34'09"N - 1°15'36"E	Centre	Plateau, ⩽5%
CPS77	*Quercus petraea, Quercus robur*	Sables et sables sur argiles	80	48° 27' 14"N - 2° 43' 02" E	Fontainebleau	Plateau, ⩽5%
EPC08	*Picea abies*	Schistes et micaschistes (acides)	470	49°56'51" N - 4°48'35"E	Champagne-Ardenne	Versant, 5-10%
EPC63	*Picea abies*	Formations volcaniques	950	45° 45' 20"N - 2° 57' 58"E	Auvergne	Plateau, ⩽5%
EPC87	*Picea abies*	Granites, gneiss et roches assimilées	650	45°48'00"N - 1°48'55"E	Limousin	Versant, 20%
HET64	*Fagus Sylvatica*	Calcaires	400	43°09'01"N - 0°39'29"W	Aquitaine	Versant, 40%
SP05	*Abies alba*	Marnes	1360	44°29'25"N - 6°27'33"E	Provence-Alpes-Côte d'Azur	Versant, 30%
SP11	*Abies alba*	Marnes	950	42°52'02"N - 2°06'04"E	Languedoc-Roussillon	Versant, 32%
SP38	*Abies alba*	Alluvions quaternaires et formations glaciaires	1100	45°25'17"N - 6°07'53"E	Rhône-Alpes	Versant, 30%
SP57	*Abies alba*	Grès et gaize	400	48°36'36"N - 7°08'02"E	Lorraine	Versant, 16%
SP68	*Abies alba*	Schistes et micaschistes	680	47°56'01" - 7°07'31"E	Alsace	Versant, 45%

Tableau 1 : Caractéristiques stationnelles des onze placettes du réseau RENECOFOR-CATAENAT utilisées dans la modélisation couplée biogéochimie – écologie via le modèle ForSAFE-VEG au sein du projet DYNAMO II

3 - Amélioration de la Table VEG : compléter les traits fonctionnels et quantifier les paramètres c'est-à-dire approfondir l'approche de regroupement d'espèces via les groupes fonctionnels en renseignant les valeurs des traits fonctionnels pour la totalité des espèces présentes dans la table VEG. Cela consiste à renseigner les exigences écologiques des espèces présentes dans la table VEG grâce à des données quantifiées issues de la base de données EcoPlant (Gégout 2001; Gegout et al. 2005; Coudun et Gégout 2005) développée par le LERFoB à Nancy. Cette base de données à l'échelle de la France regroupe plus de 7000 relevés phytosociologiques forestiers, centrés sur la réponse des espèces à l'azote, aux conditions hydriques et au pH.

4 - Estimation des charges critiques azotées à l'horizon 2100 : prédire les charges critiques azotées, en se basant sur les changements observés sur la végétation et en prenant en compte les scénarios de dépôts atmosphériques et de climat jusqu'à 2100, et ce sur 102 sites forestiers appartenant au réseau RENECOFOR et répartis sur tout le territoire.

Ce projet repose sur une collaboration franco-suédoise. Autour du concept de charges critiques maîtrisé par les partenaires français (EcoLab, BioGeCo, LERFoB) et suédois (université de Lund), la Suède possède une forte expertise en modélisation alors que la France a une connaissance approfondie de ses écosystèmes, du fonctionnement des communautés végétales terrestres et de la biogéochimie des écosystèmes.

2. Résultats de l'étude

2.1. Déroulement de l'étude

Quatre axes d'étude sont définis pour atteindre les objectifs présentés dans la partie 1.2. Les travaux pour mener à bien l'étude MODYCRIN sont détaillés dans les parties suivantes (points 2.2 à 2.5).

Plusieurs réunions de coordination ont été organisées pour planifier le déroulement de l'étude MODYCRIN. Les différents lots composant le projet ont été passés en revue pour contrôler la bonne réalisation des tâches et préciser le cas échéant les tâches ou parties de tâches à mieux planifier pour atteindre les objectifs finaux. Cette analyse des objectifs a permis de prioriser les travaux à réaliser, en tenant compte des interactions et des liens de dépendance existants entre les différentes tâches. Cette phase fut l'occasion de préciser l'implication et le rôle de chacun des partenaires en fonction de leurs spécialités et des contraintes organisationnelles.

Les premières étapes de l'étude concernent d'une part, la finalisation d'une calibration du modèle ForSAFE en vue de la spatialisation des résultats, et d'autre part, la finalisation du couplage entre la base de données EcoPlant et la table de végétation.

La troisième étape porte sur l'établissement des groupes fonctionnels. L'attribution des classes EUNIS constitue la deuxième partie du projet.

Enfin, l'étape d'évaluation de la modélisation des habitats Natura 2000 et l'estimation des charges critiques azotées couplées aux scénarios de changements climatiques constituent les étapes ultimes du projet.

2.2. Régionalisation de l'utilisation de ForSAFE-VEG

Les tâches sont détaillées :

1- achèvement de la validation du modèle pour les placettes CATAENAT, et extension aux 102 placettes RENECOFOR ;
2- construction des fichiers paramétriques pour les essences ligneuses dominantes ;
3- établissement des lois entre les variables d'entrée afin d'élargir le champ d'application du modèle avec moins de données.

2.2.1. Validation du modèle

Pour les dépôts atmosphériques

Suite aux travaux menés notamment dans le cadre du projet DYNAMO II, une méthode a été adoptée pour produire de façon générique des données d'entrée de dépôts atmosphériques reflétant le dépôt total (sec + humide). Cela concerne les sites renseignés, mais en vue de la spatialisation à l'échelle du territoire dans le cadre du présent projet, une réflexion a été menée sur la méthode à utiliser.

Les données de composition des dépôts atmosphériques hors-couvert (dépôts secs et humides) et des pluviolessivats sont issues de mesures mensuelles réalisées sur les placettes du réseau RENECOFOR de 1993 à 2008. Le modèle requiert quant à lui les valeurs des dépôts totaux atteignant le sol pour fonctionner, ce qui correspond aux dépôts hors-couvert, ou aux pluviolessivats. Du fait de l'interception des dépôts par le couvert forestier (surface de captation élevée du feuillage de la canopée), il a été montré que les pluviolessivats reflètent mieux la concentration totale des dépôts que les dépôts hors-couvert dans lesquels les dépôts secs sont sous-estimés par les capteurs de mesure.

De ce fait, les pluviolessivats ont été utilisés pour déterminer les dépôts totaux (pour différents éléments de l'atmosphère) n'interagissant pas avec la canopée (chlorures, soufre, sodium), soit des éléments conservatifs. Pour les éléments réactifs, c'est-à-dire interagissant avec la canopée (azote et cations basiques) et dont la teneur dans les pluviolessivats peut être enrichie ou appauvrie suite au passage à travers les feuilles des arbres, il n'est pas possible d'utiliser les pluviolessivats puisque les valeurs rencontrées ne reflètent alors plus les dépôts atmosphériques totaux.

Pour ces éléments, on utilise alors les dépôts atmosphériques hors-couvert en leur affectant un facteur de correction afin de prendre en compte la partie sèche des dépôts dans leur concentration. L'hypothèse posée pour cette correction est que la différence de concentration observée, pour un élément neutre tel que les chlorures (Cl), entre les pluviolessivats et les dépôts hors-couvert, reflète la part de dépôt sec non prise en compte dans les dépôts hors-couvert. Ainsi, les dépôts hors-couvert mesurés pour l'azote et les cations basiques sont corrigés par le ratio $chlorures_{pluviolessivats}$ / $chlorures_{hors-couvert}$.

Par conséquent, la concentration en calcium Ca^{2+} dans les dépôts se calcule de la manière suivante (équation 1) :

$$[Ca^{2+}]_{tot} = [Ca^{2+}]_{hors-couvert} \; x \left(\frac{[chlorures]_{pluviolessivats}}{[chlorures]_{hors-couvert}} \right) \quad \text{(Eq. 1)}$$

La question se pose donc en terme de représentativité statistique de la solution retenue. Les données disponibles relatives aux dépôts atmosphériques peuvent être représentées par trois variables :

- La mesure des dépôts hors-couvert ;
- La mesure des dépôts sous-couvert (pluviolessivats) non corrigés ;
- La mesure des dépôts sous-couvert (pluviolessivats) corrigés.

Afin de tester l'hypothèse mise en place, les trois types de données sont ainsi conservées, afin d'effectuer une comparaison des quantités de dépôts estimées à partir de chacune des méthodes. L'objectif de cette comparaison est de pouvoir déterminer la méthode permettant d'estimer le plus efficacement possible les quantités de dépôts, et aussi la plus pertinente d'un point de vue écologique.

Les premières investigations ont mis en évidence un certain nombre de limites. Les données sont récoltées à l'échelle de la France, couvrant ainsi un gradient écologique important. Or, ces données doivent servir à déterminer la représentativité d'un calcul sur un petit gradient « hors-couvert / sous-couvert ». La comparaison des trois méthodes sur les quelques placettes RENECOFOR disponibles n'est donc pas suffisante. Le nombre de placettes pour réaliser le test doit être beaucoup plus important. Ainsi, les placettes de la base de données IFN ou les données EMEP ont été utilisées.

Quel que soit le facteur environnemental dont on veut étudier l'impact sur la réponse des espèces, il peut être intéressant de raisonner en fonction de la gamme de réponse de la plante par rapport à la gamme d'évolution du facteur. Il peut aussi être nécessaire de raisonner à l'échelle d'un type d'habitat, de communautés de sous-bois, en stratifiant les échantillons

suivant que le couvert est ouvert ou fermé, par exemple. Un des objectifs a donc été de rechercher des sites le long d'un gradient écologique sur lesquels les espèces sont situées en limite de niche, afin de tester l'effet du couvert.

Pour les paramètres d'entrée climatiques, des données journalières de température et de précipitation mesurées sur 15 placettes du réseau RENECOFOR entre 1995 et 2009 ont été comparées aux moyennes mensuelles calculées par le modèle SAFRAN de Météo France. Les résultats montrent que pour la période durant laquelle les données RENECOFOR ont été échantillonnées, les valeurs modélisées correspondent extrêmement bien aux mesures moyennées sur un mois. Les 15 placettes sur lesquelles ont été comparées les valeurs de précipitation et de température sont des placettes situées principalement en plaine. La seconde partie du travail a consisté à comparer ces mêmes valeurs sur l'ensemble des placettes RENECOFOR, soit 26 placettes, sur lesquelles un suivi météorologique est effectué. Aux valeurs de comparaison issues du modèle SAFRAN ont également été ajoutées celles issues de la base de données écologiques EcoPlant développée par le LERFoB de Nancy (Gégout, 2001; Gegout et al., 2005). L'objectif était de déterminer si une source de données extérieure permettait de pallier l'absence de données météorologiques mesurées sur les placettes, et de voir si les données modélisées restent fiables même au sein d'une cellule de 8 km x 8 km dans laquelle se trouvent des gradients altitudinaux, et des expositions et degrés de pente différents pour le cas de SAFRAN, par exemple. Ce test a été réalisé pour les variables « *précipitations* » et « *température moyenne* ». Il s'avère qu'en fonction des placettes, les valeurs obtenues entre données mesurées et données modélisées peuvent varier dans des proportions diverses.

Des tests de corrélation ont donc été effectués entre les différentes sources de données. Les valeurs RENECOFOR et EcoPlant ont été testées en totalité mais les valeurs Safran ont été scindées en deux groupes :

- Le premier groupe correspond à la période totale modélisée (1959/2014) ;
- Le second correspond à la période couverte par les relevés RENECOFOR (1995/2014).

Pour les températures

Pour cette analyse, les données de températures de toutes les sources de données ont été ramenées à des moyennes annuelles (soit la somme des températures mensuelles divisées par le nombre d'années durant la période totale couverte par les relevés ou le modèle). Un exemple représentatif des résultats des tests de corrélations concernant les températures moyennes mensuelles est présenté dans le Tableau 2.

Les tests de corrélations démontrent que les températures moyennes mensuelles sont toujours très fortement corrélées avec les 26 placettes du réseau RENECOFOR (0,94<R^2<0,99). L'analyse des températures moyennes mensuelles sur les 26 placettes communes aux différentes sources de données révèle que les données RENECOFOR sont comprises dans les écarts types des données Safran 1995/2014 (Figure 3 a et b).

Il est à noter que les meilleures corrélations des écarts types de température moyennes mensuelles apparaissent entre les données RENECOFOR et Safran sur la période 1995/2014 excepté pour la placette SP57.

Pour les précipitations

Pour cette analyse, les données de précipitations de toutes les sources de données ont été ramenées à des moyennes annuelles (soit la somme des précipitations mensuelles divisées par le nombre d'années durant la période totale couverte par les relevés ou le modèle).

Le calcul des coefficients de corrélation entre les sources de données démontre que les précipitations moyennes annuelles sont faiblement corrélées entres elles (0,41<R^2<0,68) pour toutes les périodes confondues (Tableau 3).

Les valeurs de précipitations annuelles révèlent que deux placettes présentent des valeurs extrêmes : HET30 et EPC08 (Tableau 4).

Après extraction de ces deux placettes du calcul des coefficients de corrélation, les précipitations moyennes annuelles se révèlent être mieux corrélées qu'auparavant (0,79<R^2<0,89) toutes périodes confondues (Tableau 5).

Les précipitations moyennes annuelles Safran, sur la période 1995/2014, apparaissent plus fortement corrélées avec les données RENECOFOR mais moins avec les données EcoPlant. Les valeurs sont très légèrement supérieures à la corrélation RENECOFOR / EcoPlant. Une représentation en radar des résultats de comparaison, sur 24 placettes (sans HET30 et EPC08) pour lesquelles des précipitations sont relevées, permet une meilleure visualisation des écarts entre les données RENECOFOR et les autres sources de données (Figure 4).

R² CHP40	ECOPLANT	RENECOFOR	Safran 1959-2014	Safran 1995/2014
ECOPLANT		0,975927784	0,991324177	0,983261228
RENECOFOR			0,991874946	0,997287263
Safran 1959-2014				0,997549115

Tableau 2 : Coefficients de corrélation des températures moyennes mensuelles sur la placette CHP40. Exemple représentatif de la globalité des coefficients de corrélation obtenus sur les 26 placettes du réseau RENECOFOR communes aux différentes sources de données

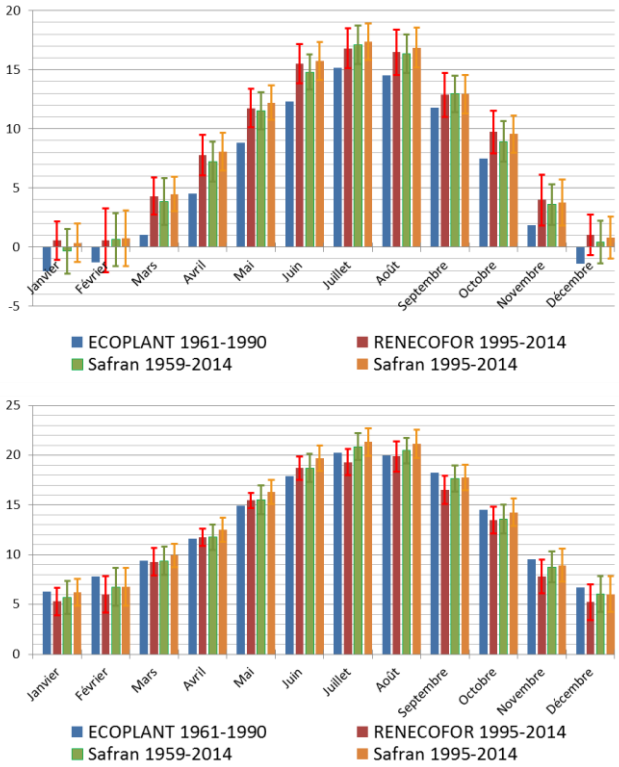


Figure 3 a et b : Histogramme des températures moyennes mensuelles (°C)

NB : *<u>En haut</u> (a) : Exemple de la placette HET30, représentatif des 9 placettes où les valeurs EcoPlant sont inférieures à l'écart-type des données Safran et RENECOFOR ; <u>En bas</u> (b) : Exemple de la placette CHP40, représentatif des données RENECOFOR comprises dans les écarts-types des données Safran*

R²	RENECOFOR	Safran 1959/2014	Safran 1995/2014
ECOPLANT	0,64	0,70	0,68
RENECOFOR		0,48	0,41
Safran 1959/2014			0,99

Tableau 3 : Coefficients de corrélation des précipitations moyennes annuelles

Pmm	RENECOFOR	EcoPlant	Safran 1995/2014
EPC08	1247,17	2082,49	1140,27
HET30	2210,61	1699,41	998,15

Tableau 4 : Précipitations moyennes annuelles (en millimètres) des placettes RENECOFOR EPC08 et HET30

R²	RENECOFOR	Safran 1959/2014	Safran 1995/2014
EcoPlant	0,86	0,79	0,79
RENECOFOR		0,89	0,89
Safran 1959/2014			0,99

Tableau 5 : Coefficients de corrélation des précipitations annuelles sans les placettes HET30 et EPC08

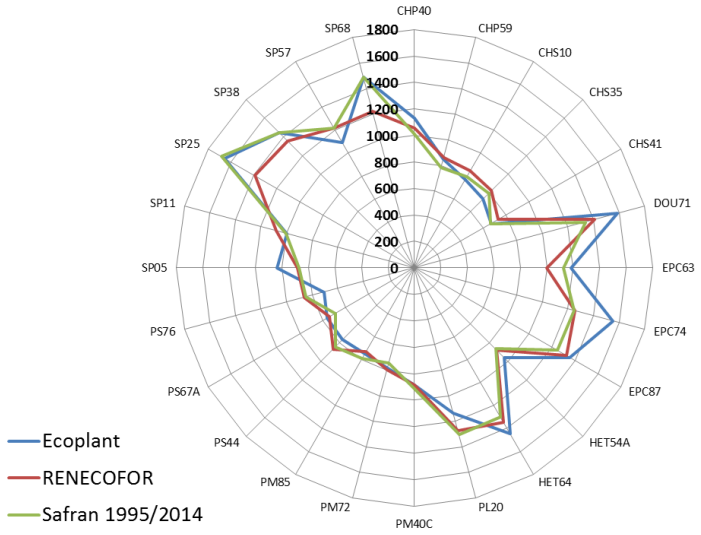


Figure 4 : Représentation en radar des cumuls moyens annuels de précipitations (en mm) pour 24 sites appartenant au réseau RENECOFOR, en fonction de trois sources de données distinctes

Bilan pour les données météorologiques (température et précipitation)

Il ressort de cette première approche que les données météorologiques des différentes sources apparaissent globalement bien corrélées entre elles. Les températures présentent une plus forte corrélation entre elles ($R^2>0,9$) que les valeurs de précipitations entre elles ($R^2 > 0,7$).

Excepté pour les valeurs extrêmes relevées sur deux placettes (*HET30 et EPC08*), les écarts entre les précipitations peuvent s'expliquer en partie par l'échelle de représentativité des données. Les données relevées sur les placettes RENECOFOR sont représentatives d'une surface inférieure à l'hectare, les données EcoPlant d'une surface égale à un kilomètre carré et les données Safran le sont pour un territoire de 8 km de côté.

Les données de précipitations Safran 1959/2014 et Safran 1995/2014 présentent une corrélation identique avec les autres données. À la vue de ces résultats, la disponibilité des données, issues de la base SAFRAN alliée à la relativement bonne correspondance des valeurs avec les mesures réalisées sur les placettes, sont autant d'arguments permettant de valider l'utilisation des données, issues du modèle SAFRAN, en tant que variables d'entrée de la modélisation (en vue de la spatialisation à l'échelle du territoire dans le cas ou des valeurs mesurées *in situ* ne sont pas disponibles).

2.2.2. Régionalisation de l'utilisation de ForSAFE

La régionalisation de l'utilisation de ForSAFE a pour but d'étendre l'utilisation du modèle au plus grand nombre de nouveaux sites possibles, intégrant par exemple plus tard les prairies, ou bien les zones sous statut de protection Natura2000. À terme, une cartographie en continu de la réponse des espèces végétales aux scénarios de dépôts atmosphériques et de changement climatique pourra être réalisée à l'échelle de territoires, ou bien à l'échelle nationale, à partir des données produites par la modélisation couplée.

La première étape du travail a consisté à construire les fichiers paramétriques de chacune des principales espèces ligneuses dominantes permettant ainsi d'assurer la calibration du modèle en fonction du peuplement. Cette partie du travail a été réalisée pendant le stage de 2ème année d'ENSAT de Lewis Cuinet qui s'est déroulé durant dix semaines au sein du laboratoire EcoLab (CNRS-Université de Toulouse). L'objectif principal de ce travail est de déterminer la robustesse du paramétrage des fichiers existants pour les principales essences dominantes, puis de tester la pertinence de la construction d'un fichier par essence en lieu et place de deux fichiers de synthèse pour les résineux et les feuillus, respectivement. Sur les dix essences dominantes recensées sur l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR, l'étude réalisée au cours du stage a porté principalement sur l'Épicéa. Cette essence a été sélectionnée en raison du

grand nombre de placettes sur lesquelles elle est présente, ainsi que de l'accessibilité à la quasi-totalité de ses données physiologiques. Le travail réalisé durant le stage s'est déroulé en deux phases :

- Une première phase du travail a consisté à rechercher dans la bibliographie la valeur des différents traits physiologiques de l'Épicéa nécessaires au modèle. La comparaison de ces valeurs (ponctuelles ou gammes) avec les données utilisées jusqu'alors dans les fichiers paramétriques existants, a permis de valider ou d'infirmer l'utilisation de paramètres initialement basés sur des dires d'experts.

- La deuxième phase est centrée sur une analyse de sensibilité des traits physiologiques les plus influents sur les résultats de sortie du modèle ForSAFE-Veg. Pour ce faire, plusieurs simulations ont été réalisées sur l'évolution du pH et de la concentration en cations basiques de la solution du sol, et sur l'évolution du volume de bois sur pied pour le peuplement de la station RENECOFOR EPC87. Le stagiaire a pu au cours de cette phase de travail comprendre et prendre en main le fonctionnement du modèle ForSAFE-Veg. À la suite de quoi, une comparaison des données mesurées sur la placette, avec les résultats produits par le modèle pour les trois types de calibration (dire d'experts initial, bibliographie et étude de sensibilité), a été réalisée afin de construire et de valider une fiche paramétrique pour l'Épicéa.

La deuxième étape a consisté en l'établissement de lois entre les différentes variables d'entrée, afin d'assurer une extrapolation des *inputs* pour les sites non-échantillonnés sur lesquels appliquer le modèle. Les options méthodologiques à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs :

- Les discussions avec les modélisateurs suédois impliqués dans le projet ont conforté l'idée qu'une des solutions les plus efficaces à utiliser pour la spatialisation du modèle consiste à caler le modèle le plus finement possible sur quelques sites bien connus. À la suite de quoi, les nouveaux paramètres retenus sont intégrés à la table de végétation, avant de lancer le modèle sur l'ensemble des sites à modéliser. Cette méthode permet d'obtenir des résultats extrêmement satisfaisants, allant jusqu'à atteindre des valeurs de R^2 supérieures à 95 %.

- Une autre option méthodologique permet d'étendre l'utilisation de la modélisation couplée, en passant de 27 à 102 placettes. Des regroupements sont établis entre les 27 placettes références et les 75 autres placettes décrites de niveau 1 du réseau RENECOFOR, en fonction de la similarité des caractéristiques de stations. Les regroupements sont basés sur différents critères (lithologie, topographie, type de sol, type de peuplement) et à partir des descriptions des placettes présentes dans la documentation du réseau RENECOFOR. Une fois ces regroupements effectués et après vérification par les experts du projet MODYCRIN, il est possible d'étendre la modélisation à l'ensemble des sites RENECOFOR. À terme, cela permet d'envisager une fusion avec les sites du réseau européen (CEE).

Une réunion de travail organisée au laboratoire EcoLab (CNRS-Université de Toulouse) avec Salim Belyazid (modélisateur suédois du projet) a permis de répondre à des questionnements sur le fonctionnement pratique du modèle ForSAFE (fichiers d'intrants) et d'élaborer la stratégie méthodologique pour les différentes paramétrisations du modèle. De façon à assurer l'extrapolation optimale des situations des placettes RENECOFOR, des discussions ont été menées sur les fichiers de calibration des paramètres du sol (ex. la minéralogie) et de la biomasse ayant un rôle important dans les sorties du modèle. L'objectif est aussi de déterminer les clefs essentielles pour réaliser la spatialisation (un travail par regroupement de sites en fonction de l'altitude, de la fertilité des espèces). Ainsi, la paramétrisation a permis (selon la littérature) la prise en compte de nouvelles espèces d'arbres dominants.

- *La* ***méthode d'approche pour déterminer la minéralogie des sols*** en vue de la spatialisation a été évoquée : une utilisation du modèle A2M (logiciel open source) est préférable à celle du modèle «Uppsala» utilisée jusqu'ici (Party 1999). Certaines incohérences ont en effet été rencontrées sur des sites sur sols sableux. Toutefois, la prise en main de ce logiciel nécessite un certain temps afin de comprendre l'ensemble des interactions à prendre en compte, aussi les valeurs issues de la thèse de Party (1999) ont été intégrées en inputs du modèle ForSAFE par limite de temps.

- ***Données de description de sol*** : L'acquisition de nouvelles données, mesurées lors des dernières campagnes de terrain du réseau RENECOFOR, a permis de réaliser une grande avancée dans cette phase du projet. La mise à jour de la base de données relative aux caractéristiques des sols a en effet permis de disposer de données d'entrée pour le modèle depuis 1993 jusqu'à aujourd'hui (données acquises auprès de M. Nicolas).

- Pour ce qui est de ***certaines données de sol absentes ou bien non disponibles actuellement dans la base***, nous nous sommes référés à la publication de Balland et al. (2008). L'établissement de fonctions utilisant la texture et la profondeur de sol permettent par exemple d'estimer des variables telles que la densité apparente ou bien la densité de particules fines. Ces estimations sont faites à partir de données inputs relevées sur les sites que nous étudions. Un classeur Excel est fourni par les modélisateurs suédois dans lequel sont reportées les formules de calcul présentes dans la publication de Balland et al.

- ***Fin de la calibration*** : Suite aux étapes de calibration menées à bien, les simulations réalisées précédemment dans le cadre du projet DYNAMO II (en décembre 2012) sont ensuite confrontées à celles issues de la nouvelle calibration et en utilisant la nouvelle version du modèle. La comparaison des deux phases de modélisation permet de mesurer les progrès effectués sur la calibration du modèle en vue de la spatialisation. La confrontation entre les données simulées et mesurées permet de valider les résultats, et de vérifier si les estimations du modèle restent dans les ordres de grandeur de mesures des 17 sites de référence.

- ***Validation*** *:* La validation s'effectue en comparant les données simulées en sortie du modèle avec les données mesurées sur les placettes. Si des décalages apparaissent lors de cette phase de validation, il faut tout d'abord regarder du côté des données de dépôts en entrée du modèle. En effet, les travaux menés jusqu'ici avec ForSAFE ont montré que le modèle est relativement complexe dans son utilisation et nécessite beaucoup de vérifications dans les fichiers d'entrée. Dans tous les cas, lors de la validation, il est nécessaire de vérifier en premier la cohérence des données en entrée du modèle avant de chercher plus loin la source d'éventuelles erreurs.

L'application aux 102 placettes passe donc par un travail méticuleux sur la paramétrisation du modèle ForSAFE qui se fait, pas à pas, pour la prise en compte optimale des conditions écosystémiques propres aux différentes placettes.

2.3. Attribution de classes EUNIS et Habitats aux sites RENECOFOR - Indices de biodiversité et leur évolution

Dans le cadre de la présente étude MODYCRIN, les volets identifiés comme les clefs à développer sont les suivants :

- Classification des habitats des placettes RENECOFOR suivant la norme EUNIS ;
- Proposition d'une méthode de classification des placettes en fonction des espèces végétales hébergées ;
- Proposition de correspondances possibles entre classification EUNIS, rattachements phytosociologiques et typologie d'habitats.

La classification des habitats de l'ensemble des sites du réseau RENECOFOR (suivant la norme européenne EUNIS) a pour but d'harmoniser la cartographie des habitats étudiés, ce qui permet une estimation des charges critiques à l'échelle européenne. Cette classification doit permettre de disposer d'un outil rendant possible la compatibilité de l'ensemble des travaux des pays impliqués dans le groupe de travail sur les effets de la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance.

Une première cartographie (dans le cadre du projet DYNAMO II) a été intégrée dans le rapport du PIC Cartographie et Modélisation (ICP M&M, 2014). Les caractéristiques des sites forestiers français ont ainsi été spatialisés en utilisant la classification des habitats EUNIS comme référence. Cette mise à jour cartographique pour les forêts françaises permet de mieux collaborer avec les autres pays européens et d'harmoniser à l'échelle européenne les données, (notamment pour extrapoler le processus de modélisation des solutions de sols et de la réponse des plantes aux différents scénarios de dépôts d'azote et de changements climatiques) pour, *in fine*, produire les cartes de charges critiques azotées et d'excès de dépôts associés. Cette première approche a permis de tester les limites des méthodes d'approche.

À partir d'un travail préliminaire, deux méthodes ont été testées utilisant la carte de végétation potentielle à l'échelle de la France, la base de données d'occupation des sols du Corine Land Cover, les données du réseau RENECOFOR et la clef de détermination des habitats EUNIS.

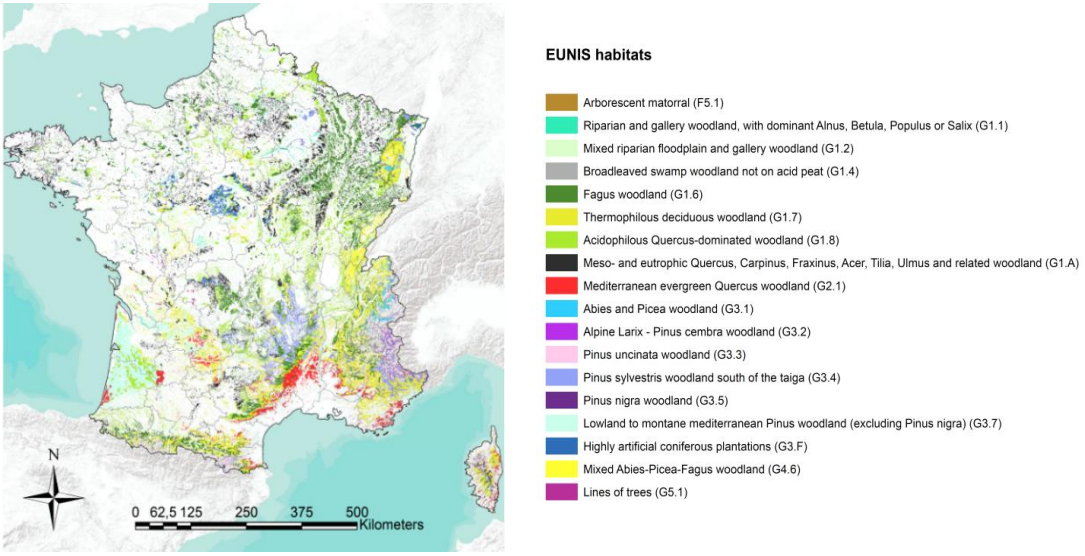


Figure 5 : Carte des habitats EUNIS des forêts françaises

NB : *carte décrite au niveau 3, basée sur la carte de végétation potentielle (Leguédois et al., 2011) et la base de données Corine Land Cover (2006)*

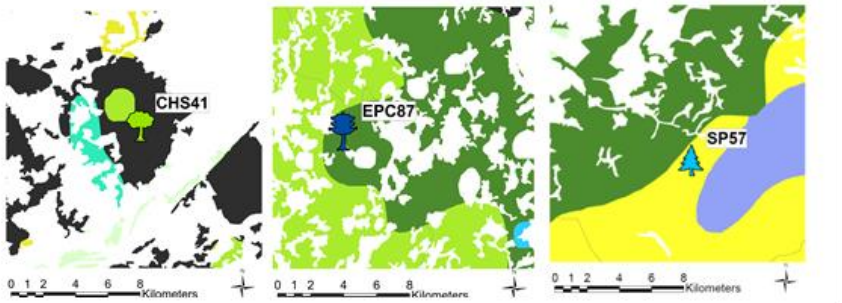


Figure 6 : Illustration des différences entre les échelles nationale et locale (sites RENECOFOR) de la classification EUNIS des écosystèmes forestiers.

NB : *Les symboles des arbres représentent l'échelle locale. La cartographie sous-jacente correspond à l'échelle nationale. Légende EUNIS (Figure 5)*



Figure 7 : Distribution des 11 grandes régions écologiques (GRECO) - (source : www.inventaire-forestier.ign.fr, 12/2016)

NB : *Liste des 11 GRECO (avec sites internet[1]) sur lesquelles les données issues de relevés floristiques de l'IGN ont été analysées : GRECO A (Grand Ouest cristallin et océanique) ; GRECO B (Centre Nord semi-océanique) ; GRECO C (Grand Est semi-continental) ; GRECO D (Vosges) ; GRECO E (Jura) ; GRECO F (Sud-ouest océanique) ; GRECO G (Massif central) ; GRECO H (Alpes) ; GRECO I (Pyrénées) ; GRECO J (Méditerranée) ; GRECO K (Corse)*

[1] GRECO A (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article796) ; GRECO B (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article792) ; GRECO C (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article805) ; GRECO D (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article780) ; GRECO E (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article786) ; GRECO F (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article806) ; GRECO G (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article804) ; GRECO H (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article807) ; GRECO I (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article808) ; GRECO J (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article809) ; GRECO K (http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article787)

La première méthode combine la carte de végétation potentielle française (Leguédois et al. 2011) et la base de données du Corine Land Cover à l'échelle 1 / 1 000 000ème. Les correspondances entre les unités de cartographie de végétation et les habitats EUNIS sont déterminées en considérant la végétation potentielle dominante. Une première cartographie des écosystèmes caractérisés par leur classe EUNIS a donc été mise à jour à l'échelle nationale pour la France (Figure 5).

Ensuite, une classe d'habitat EUNIS a été attribuée à chacun des 102 sites RENECOFOR, correspondant à la classification de l'habitat de son polygone d'appartenance. Ainsi, cette première méthode permet de classer tous les sites suivant classification EUNIS en relation avec leur localisation et les caractéristiques de végétation potentielle de leur zone géographique. Cette méthode donne des résultats assez bons à une large échelle mais ne permet pas une classification précise des habitats à l'échelle des sites. Certaines incohérences ont pu être montrées. Par exemple, la placette EPC87 (*Picea abies*) du réseau RENECOFOR est caractérisée comme appartenant à la classe EUNIS G1.6 (« Hêtraies ») à l'échelle nationale, mais cela ne correspond évidemment pas à la réalité. L'explication de cette désignation erronée serait liée à un effet de précision d'échelle (trop grossière pour l'échelle site/habitat) car elle ne prend pas en considération les réalités de terrain de l'échelle fine dans la base de données de la végétation potentielle (comme les plantations, les surfaces cultivées…). Pour cette raison, les petites surfaces plantées artificiellement sont considérées, avec cette méthode de classification, comme les plus larges surfaces de forêts situées à proximité. Cette méthode donne donc une bonne vision de classification globale mais dans quelques cas particuliers elle reste imprécise et incapable de classer certains écosystèmes forestiers suivant l'échelle retenue (nationale/locale) (Figure 6).

Comme alternative, **une deuxième méthode** a été utilisée pour prendre en compte les effets d'échelle locale et mieux refléter la réalité du terrain. L'habitat correspondant à chaque placette considérée a été déterminé en utilisant ses caractéristiques environnementales et notamment sa composition végétale. Pour ce faire, la clé de détermination EUNIS est lue en utilisant ces informations par méthode dichotomique en atteignant le 3ème degré de description. Cette méthode, testée sur quelques placettes du réseau RENECOFOR, a donné de très bons résultats sur les sites tests en attribuant à chaque fois le bon habitat.

Les différences d'habitats observées entre les deux approches sont présentées à la Figure 6. Ces deux méthodes sont complémentaires :

- À l'échelle nationale basée sur les données de végétation potentielle, la première méthode donne une description continue des habitats forestiers sur l'ensemble du territoire. Cette approche donne des informations relatives aux habitats des zones forestières partout en France, mais elle n'est pas suffisante pour classer les habitats à l'échelle du site (25 % d'erreur) ;
- En s'appliquant à une échelle plus locale, la seconde méthode permet de classer précisément les habitats de sites en utilisant les observations de terrain, mais ne permet pas de spatialiser de manière continue les habitats EUNIS des forêts françaises sur de larges surfaces. Cette seconde méthode de classification est automatisable mais elle nécessite d'avoir toujours l'information sur les listes d'espèces par site.

À partir de ce travail préliminaire, trois méthodes peuvent permettre de façon précise d'assurer une classification selon EUNIS pour les 102 sites du réseau RENECOFOR :

- ***Classification des habitats des placettes RENECOFOR suivant la norme EUNIS*** **:** cette méthode consiste en une lecture dichotomique de la clé de détermination EUNIS, en fonction de l'essence dominante du peuplement. L'attribution se déroule en analysant une à une chacune des placettes, et peut être automatisée grâce au développement d'une routine, réalisée en langage Visual Basic ;
- ***Proposition d'une méthode de classification des placettes en fonction des espèces végétales hébergées*** **:** classification à dire d'expert, avec détermination du type d'habitat en fonction de la liste des espèces rencontrées sur la placette, du type de station et des connaissances empiriques de l'expert ;
- ***Proposition de correspondances possibles entre classification EUNIS, rattachements phytosociologiques et typologie d'habitats*** **:** établissement de correspondances entre différents types de classifications (Corine Land Cover, typologie d'habitats de Gégout, …) afin de lier les habitats actuels des sites avec les habitats EUNIS.

Des méthodes d'interpolation peuvent ensuite être appliquées pour les grands types d'écosystèmes à l'échelle nationale. La mise en œuvre de la troisième méthode de classification impliquant l'établissement de correspondances entre les typologies d'habitats et la classification EUNIS a été rendue possible grâce à l'utilisation d'une nouvelle source de données. En effet, en l'état actuel des données disponibles, il était impossible d'établir un lien entre la phytosociologie des habitats (disponibles dans les données de description des placettes RENECOFOR) et la classification EUNIS. Une

étape intermédiaire pour permettre d'établir cette relation consiste à passer par la typologie Corine biotope. Pour ce faire, la liste des espèces typiques relative à chacun des codes Corine rencontré sur les placettes doit être croisée avec le relevé floristique exhaustif établi par l'ONF sur chaque site.

La convention de recherche établie entre le laboratoire EcoLab et l'IGN permet d'utiliser les données de relevés floristiques de l'IGN. Une liste d'espèces représentatives de chaque habitat a donc été établie par l'IGN, à partir de leur base de données regroupant l'ensemble des relevés floristiques réalisés sur les placettes de leur réseau. Ce travail d'analyse a été réalisé par GRECO, pour chaque habitat Corine rencontré sur les placettes RENECOFOR. La distribution des 11 GRECO en France métropolitaine est présentée dans la Figure 7. L'utilisation de ces données en provenance de l'IGN a donc permis de classer les 102 placettes du réseau RENECOFOR suivant la classification européenne EUNIS, à partir de l'analyse de la liste exhaustive des espèces qu'elles abritent, et en fonction du GRECO au sein duquel elles se trouvent localisées.

2.4. Amélioration de la table VEG : Paramétrisation et groupes fonctionnels

- Couplage table VEG / EcoPlant : détails du travail par variable, choix des paramètres, définition des variables à conserver pour chaque facteur environnemental considéré
- Calibration de la table et du modèle Veg pour les espèces végétales présentes sur trois sites de référence de réseau RENECOFOR
- Complément des espèces présentes dans la table de végétation (dont les paramètres ne sont pas encore renseignés)

2.4.1 Paramétrisation et amélioration de la table Veg

Pour rappel, la table de végétation contient une liste d'espèces. Pour chaque espèce, le comportement écologique et certaines caractéristiques structurelles et architecturales (hauteur, longévité, etc.) sont décrits par un ensemble de paramètres (Tableau 6). Cette table est utilisée comme donnée d'entrée par le modèle VEG, en plus des sorties biogéochimiques simulées par ForSAFE, afin de prédire l'évolution de la composition spécifique et l'abondance de chaque espèce selon les conditions du milieu. Cette table de végétation a été élaborée, sur avis d'experts internationaux et dans le cadre des projets DYNAMO et DYNAMO II, pour renseigner les valeurs des niches écologiques des principales espèces végétales des écosystèmes forestiers français. En première intention, cette table a été utilisée pour implémenter la base de données Veg Europe compte tenu de la grande variété des écosystèmes français (230 espèces de la base Veg France). Ces espèces sont décrites par une trentaine de paramètres environnementaux. Mais cette table Europe a été enrichie/modifiée par plusieurs avis d'experts en Europe pour atteindre 415 espèces, ce qui a conduit à des incohérences avec les références écologiques françaises et une liste de plantes caractéristiques. Environ 200 espèces observées dans les placettes RENECOFOR n'étaient pas dans la table. Pour valider le contenu de la table de végétation ainsi que le module VEG, il a été décidé d'utiliser les mêmes placettes RENECOFOR, pour lesquelles des relevés floristiques exhaustifs ont été réalisés en 1995, 2000, 2005 et 2010. Pour permettre une validation du modèle ForSAFE-Veg, les espèces manquantes ont donc été ajoutées et les paramètres les caractérisant ont été harmonisés (cf. projet DYNAMO II, Gaudio et al., 2014). Lors de cette harmonisation, l'ensemble des paramètres est ainsi décrit par deux variables (au lieu de 1, 2 ou 3 variables dans la version précédente de la table de végétation). Par exemple, la croissance des plantes a été caractérisée par une amplitude et un optimum relativement à la concentration en azote du sol (Figure 8).

Autre source d'incohérences, la quantification des paramètres listés dans la table de végétation actuelle étaient pour le moment renseignés à dire d'experts. Nous avons suggéré dans le cadre du projet MODYCRIN d'utiliser la base de données EcoPlant (Gégout 2001; Gégout et al. 2003) afin d'attribuer des valeurs quantifiées aux différents paramètres de la table VEG. En effet, les paramètres doivent avoir un sens en terme écologique et rester compatibles avec les entrées du module Veg. Deux étapes de calibration de la table de végétation sont réalisées :

- La première étape consiste à vérifier et adapter les niches écologiques des espèces présentes dans la table en fonction de leur affinité aux différents facteurs environnementaux testés ;
- La seconde étape consiste à utiliser la base de données EcoPlant qui contient plusieurs milliers de relevés phytoécologiques (~7 000) correspondant à des paramètres du sol qui sont mesurés.

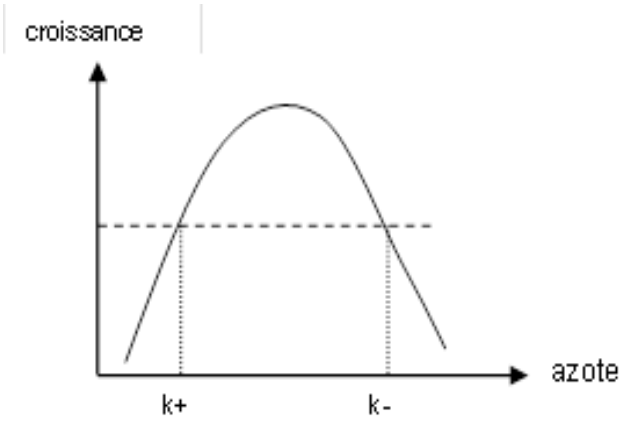


Figure 8 : Réponse des espèces végétales à l'azote, décrite par les paramètres k+ et k- dans la table de végétation

Facteur du milieu ou caractéristiques des espèces	Variables	Unité	Description
Azote	K+	mgN/l	Nitrogen promotion factor
	K-	mgN/l	Nitrogen inhibition factor
	W	unitless	Slope of the nitrogen response curve
Calcium	kCa	mgCa/l	Calcifuge inhibition factor
pH	pHhalf	pH	pH promotion factor
Eau du sol	Wmin	yearly average of % soil moisture saturation	Minimum water threshold
	Wtop	% soil moisture saturation	Optimal water threshold
	Wmax	% soil moisture saturation	Start of water inhibition
Température	Tmin	Yearly average air temperature in °C	Minimum temperature threshold
	Ttop	Yearly average air temperature in °C	Optimal temperature
	Tmax	Yearly average air temperature in °C	Upper temperature limit
Lumière	Lmin	Yearly average in µmol (photons)/m2,sec	Minimum PAR requirement
	Lmax	Yearly average in µmol (photons)/m2,sec	Optimal PAR threshold
Caractéristiques morphologiques des espèces	H	m	Plant shading height
	root_class	unitless	Root depth class
	Grazing	unitless	Palatability factor
	Years	years	Plant longevity
Codification des espèces	Group code	not a factor	Plant group code
	Group	not a factor	Plant group name
	EUNIS Classes	not a factor	EUNIS class membership

Tableau 6 : Paramètres utilisés dans la table de végétation VEG (Probst et al., 2015) pour décrire la réponse des espèces aux facteurs du milieu ou leur comportement biologique (azote, pH, calcium, eau du sol, température, luminosité, compétition pour la lumière (capacité d'ombrage), profondeur d'enracinement, palatabilité, longévité, appartenance à des groupes de végétation identifiés)

Calibration des paramètres écologiques dans Veg

Une calibration est réalisée pour les espèces végétales du sous – étage présentes sur les placettes de référence CHS41, EPC87 et SP57, pour lesquelles le modèle biogéochimique ForSAFE avait déjà fait l'objet d'une calibration. Les paramètres de niche écologique de 29 espèces ont donc été adaptés vis-à-vis des facteurs environnementaux présentés ci-dessus, et calibrés à partir des couverts mesurés en 1995 sur ces placettes. Cette calibration de Veg a par la suite été validée à partir des données mesurées en 2000, 2005 et 2010. Les paramètres des espèces présentes sur plusieurs de ces trois sites ont été harmonisés, afin de proposer une seule table Veg pour l'ensemble des sites. Les résultats de calibration et de validation du modèle sont présentés dans la Figure 9.

Les indices de similarité calculés en 2000 et 2005 pour les trois sites confirment la qualité de la calibration du modèle à partir des données observées en 1995. En effet en 2000 et 2005, la similarité atteint les 75 % entre les données observées et celles simulées pour les sites CHS41 et EPC87, et pour le site dominé par le sapin elle dépasse même les 80 %. À l'exception de quelques espèces dont le couvert est relativement faible, le modèle permet de simuler avec une certaine précision l'évolution au fil du temps du couvert des espèces. Cependant, une diminution dans la précision de prédiction est observée en 2010 pour des espèces comme *Rubus fruticosus* L. et *Polytrichum formosum* Hedw. La calibration de ces espèces communes aux trois sites nécessite en effet d'homogénéiser au mieux les limites de niche, entraînant de fait une légère baisse de la qualité prédictive du modèle.

Enfin, le plus faible taux de similarité est observé pour le site EPC87 même si, en comparaison avec le taux de similarité obtenu avant calibration, un index de Czekanowski autour des 70 % est tout à fait acceptable. La différence de performance observée avec les deux autres sites peut être expliquée par la composition floristique du site, étant donné que la moitié de la communauté végétale est composée de mousses dont la calibration est rendue complexe par la large amplitude écologique d'une grande partie des espèces.

Suite à cette étape de calibration, des scénarios de changement climatique et de dépôts d'azote atmosphérique ont été appliqués sur les trois sites. Les résultats de ces simulations ont permis de déterminer l'impact à long terme des changements globaux sur la composition floristique des trois sites. L'impact à court terme de la gestion forestière sur la végétation a été analysé grâce à l'intégration du calendrier des coupes d'éclaircies et de récolte, ainsi que des différentes tempêtes ayant entraîné une perte de biomasse au sein des peuplements. Ces résultats sont présentés aux paragraphes 2.5.2. et 2.5.3.

Suite à la réalisation de la première étape de calibration de la table Veg en utilisant les niches écologiques des espèces, la deuxième méthode qui est mise en place a consisté à coupler la table avec la base de données mesurées EcoPlant (Gégout et al., 2005).

La paramétrisation de la table nécessite d'établir une relation, d'une part, entre les variables décrites dans EcoPlant, et d'autre part, les variables utilisées actuellement dans la table VEG qui sont nécessaires au bon fonctionnement du modèle VEG. En effet, les facteurs du milieu que sont l'azote, le pH, l'eau du sol et la température sont renseignés dans la table VEG et dans la base de données EcoPlant de manière différente. La base de données EcoPlant correspond à des relevés de terrain spatialisés à l'échelle de la France. Une première réflexion entre experts montre que cette approche quantitative est réalisable et qu'elle est essentielle à la robustesse de la paramétrisation de la table VEG pour la France et, au-delà, pour de nombreuses conditions écosystémiques en Europe compte tenu de la diversité des écosystèmes français.

L'enjeu est donc de continuer cette harmonisation et cette quantification pour l'ensemble des plantes de la table, de façon à ce que l'application du modèle ForSafe – Veg soit robuste.

L'objectif de ce perfectionnement de la table VEG est de parvenir à une quantification fiable des facteurs environnementaux qui influent sur la réponse de chacune des espèces végétales présentes dans la table. Ce travail passe par une calibration des différents paramètres décrivant chaque facteur, en utilisant les valeurs mesurées de la base de données EcoPlant. Les résultats des réflexions menées au début du projet, ayant conduits aux résultats actuels concernant les principaux facteurs de la table de végétation, sont présentés dans la suite du document. Pour rappel, la méthodologie utilisée pour coupler les deux modèles EcoPlant et ForSAFE a consisté à calibrer la réponse des espèces végétales de la table de végétation aux cinq facteurs climatiques testés, grâce à l'utilisation de régressions linéaires multiples.

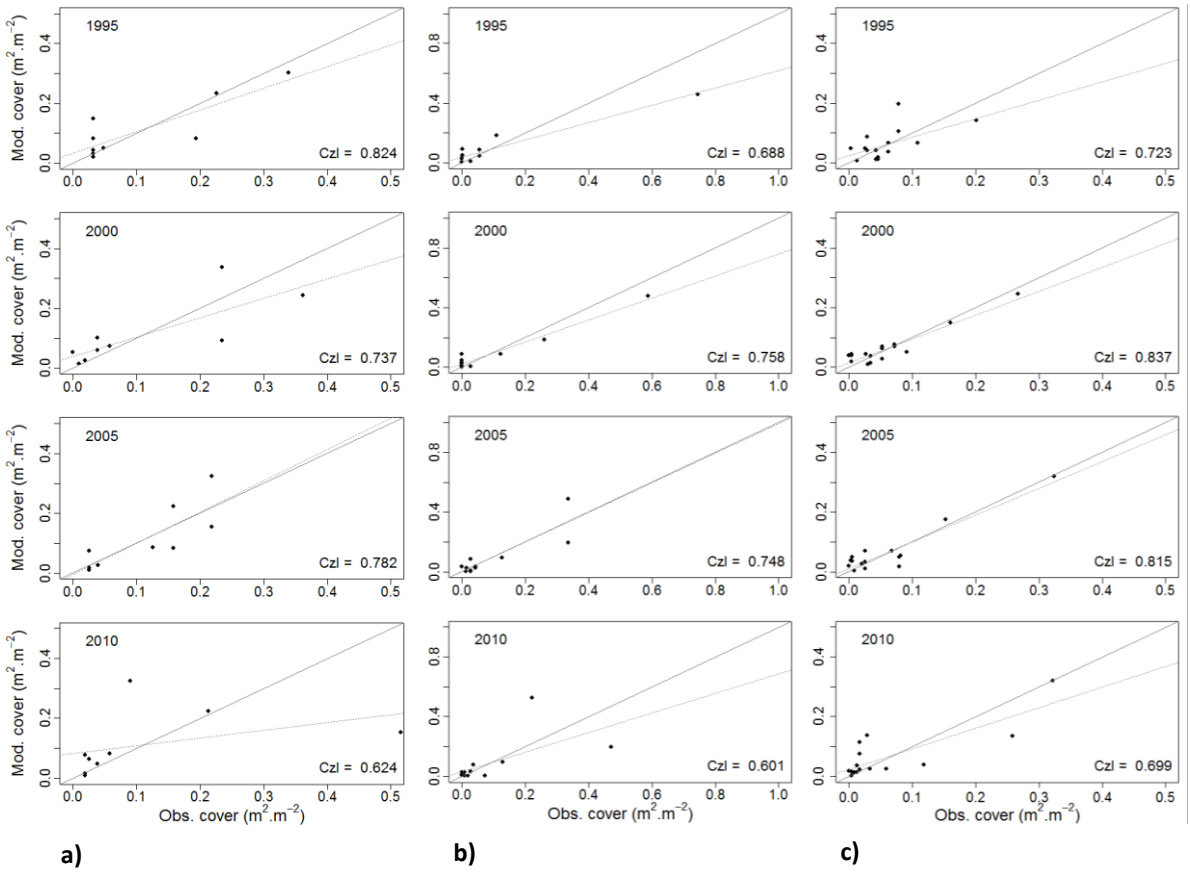


Figure 9 : Calibration des espèces végétales pour trois sites (CHS41, EPC87, SP57)

NB : (a) CHS41, (b) EPC87, (c) SP57 : *La calibration est réalisée sur les données de l'année 1995. La validation est réalisée sur les années 2000, 2005 et 2010. Czl correspond à la valeur de l'indice de Czekanowski permettant d'évaluer la similarité entre les pourcentages de couvert mesurés et calculés (Rizzetto et al., 2016)*

Lumière

La réponse des plantes à la lumière est calculée en fonction de leur besoin en lumière exprimé en $\mu mol_{photon}.m^{-2}$. Pour chaque espèce, l'objectif est d'estimer la quantité de lumière pouvant arriver jusqu'au sol sous couvert forestier sur les placettes où l'espèce est présente, afin de paramétrer les limites de la niche écologique vis-à-vis de la lumière.

Durant l'étape de calibration de la table, pour les trois sites d'étude, le paramétrage des niches écologiques pour la lumière est établi en se basant sur le caractère héliophile ou sciaphile de chaque espèce (Julve, 1998; Rameau *et al.*, 1989), ainsi que sur les indices d'Ellenberg. En croisant les informations issues de ces trois sources, la réponse à la lumière de chaque espèce étudiée a pu être paramétrée pour les trois sites.

Pour la calibration utilisant les données mesurées de la base EcoPlant, un coefficient d'extinction de la lumière a été calculé à partir du pourcentage de recouvrement de chacune des essences forestières dominantes, présentes sur l'ensemble des sites d'échantillonnage de la base EcoPlant. Cette opération permet d'estimer la fraction du rayon incident arrivant jusqu'au sol après avoir traversé la canopée, en utilisant une formule de calcul adaptée de la loi de Beer – Lambert ((Anderson 1966; Nilson 1971) (Eq.2).

$$I = I_0 * e^{-k * rec}$$

(Eq. 2)

I = intensité (puissance par unité de surface) de la radiation transmise ;
I_0 = intensité de la radiation incidente ;
k = coefficient d'extension lumineuse ;
rec = pourcentage de recouvrement des arbres dominants.

Le calcul du coefficient d'extinction de lumière est effectué grâce au développement d'une macro permettant la conversion des indices d'abondance-dominance de chaque essence de la strate arborée ou arbustive rencontrée sur la placette en pourcentage de recouvrement, et en sommant ensuite ces pourcentages en prenant en compte un coefficient de superposition entre les différents individus. La Figure 10 illustre, à partir d'un exemple, une des étapes du calcul de couvert effectué en ajoutant successivement, et après classement par ordre décroissant de couvert, les couverts des essences de la placette.

L'échelle utilisée pour la conversion des indices d'abondance / dominance de Braun-Blanquet en pourcentages de recouvrement correspond à l'échelle utilisée par les responsables du réseau RENECOFOR. La correspondance est présentée dans le Tableau 7.

La formule de calcul utilisée pour réaliser cette conversion est détaillée dans l'équation suivante :

(Eq. 1)

$$C = \sum_{i=1}^{N} (1 - C_{i-1}) * ct_i$$

C = pourcentage de couvert total ;
C_i = pourcentage de couvert après ajout du taxon i ;
ct_i = pourcentage de couvert du taxon i ;
N = nombre de taxons.

Le couvert des strates arborées et arbustives a ainsi pu être calculé sur chaque placette. Des modèles (linéaire et polynomial) entre couvert calculé et couvert mesuré ont été testés pour valider la pertinence d'un tel modèle de calcul.

Les résultats présentés sur les Figures 11 et 12 montrent, d'un point de vue statistique, que le modèle de calcul du couvert par conversion des indices d'abondance / dominance est acceptable.

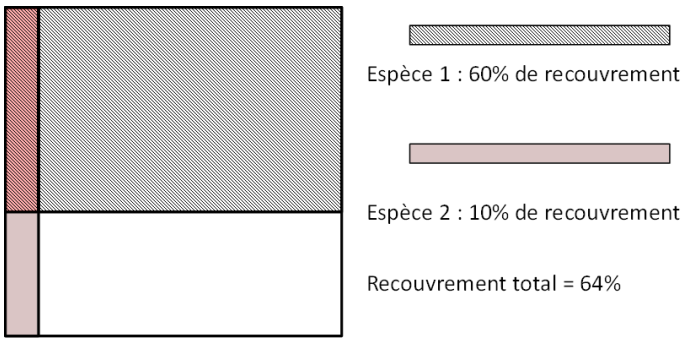


Figure 10 : Exemple de calcul du taux de recouvrement total de deux espèces de la strate arborée

Classes de recouvrement (Braun – Blanquet)	Pourcentages (%)
r	0,005
+	0,0
1	2,5
2	15
3	37,5
4	62,5
5	87,5

Tableau 7 : Correspondances entre indices d'abondance / dominance et pourcentages de recouvrement (Camaret, 2004; Archaux et al., 2009)

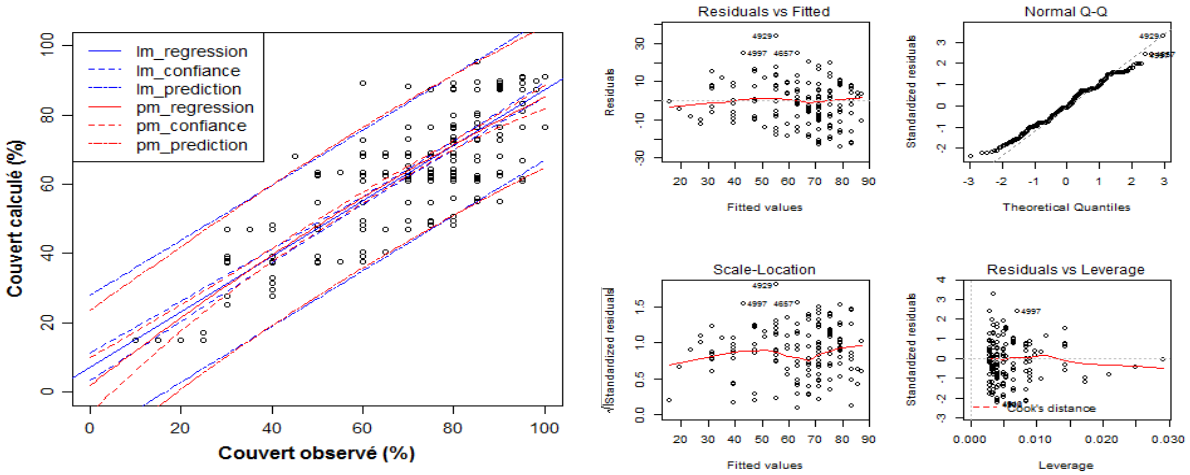


Figure 11 : Distribution des couverts (calculés en fonction des couverts observés dans la strate arborée (AH)) et forme des résidus

NB : *Les courbes bleues représentent les résultats du modèle linéaire simple (lm) ; les courbes rouges représentent les résultats du modèle polynomial (pm) sur le graphique de gauche*

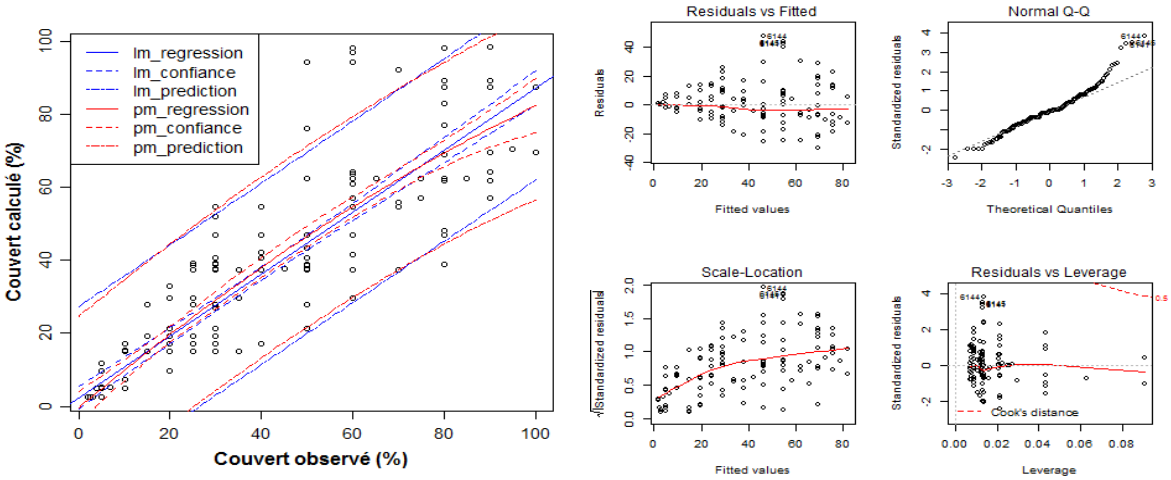


Figure 12 : Distribution des couverts (calculés en fonction des couverts observés dans la strate Arbustive) et forme des résidus

NB : *Les courbes bleues représentent les résultats du modèle linéaire simple (lm) ; les courbes rouges représentent les résultats du modèle polynomial (pm) sur le graphique de gauche*

Température

La calibration des niches écologiques des espèces en réponse à la température a été effectuée dans la première phase du travail, en utilisant les données écologiques relatives à la distribution géographique des espèces ainsi que des valeurs bio-indiquées. Pour chaque espèce, l'ensemble de ces données a permis de paramétrer une température minimale et une température maximale au-delà desquelles l'espèce est absente, ainsi qu'une température optimale correspondant à une présence maximale de l'espèce.

Dans l'optique d'un couplage entre les tables EcoPlant et Veg, deux variables indépendantes sont utilisées (la température moyenne annuelle et la température moyenne du mois le plus froid -Janvier) pour simuler respectivement les effets bénéfiques et inhibiteurs de la croissance des plantes. Les données de température sont issues de la base de données EcoPlant (Gégout et al. 2005).

Une alternative possible à l'utilisation d'une variable « Température moyenne » peut être celle du « Growth Degree Day ». L'utilisation de cette variable degrés jours donne un renseignement concernant le démarrage de la saison de végétation et de la floraison.

Pour tester l'utilité de la variable degrés jours, il est possible de comparer les relations entre l'ensemble des quatre variables suivantes :

- Somme des températures quotidiennes au-dessus du seuil de 0°C ;
- Somme des températures quotidiennes au-dessus du seuil de 5°C ;
- Somme des températures quotidiennes au-dessus du seuil de 7°C ;
- Températures moyennes quotidiennes sur l'ensemble des sites RENECOFOR.

Après avoir testé l'ensemble des corrélations entre ces 4 variables, une valeur de $R^2 > 0,95$ est retenue.

Suite à ces tests, en fonction de la nature de la variable retenue (Degrés jours ou Température moyenne), deux options sont envisagées :

- Le facteur température est représenté en entrée du modèle par une seule variable, Température moyenne annuelle (T°Cmoy) par exemple, qui traduit un gradient altitudinal ;
- Le facteur température est représenté en entrée du modèle par deux variables, la variable Température moyenne annuelle T°C moy, à laquelle s'ajoute la moyenne des températures minimales du mois de janvier (T°Cmin, mois le plus froid), qui traduit un gradient de continentalité.

pH

De même que pour la lumière et la température, le pH a été calibré pour les espèces présentes sur les trois sites en utilisant des données bio-indiquées ou en provenance de bases de données floristiques (Rameau et al., 1989, Julve 1998).

En ce qui concerne le couplage avec la base de données EcoPlant, le facteur pH est pour l'instant représenté par la variable pH de la solution du sol au sein de la table Veg. Dans la base de données EcoPlant, la variable mesurée est la variable pH_{eau}, correspondant à la mesure du pH d'une suspension dans l'eau de l'échantillon de sol séché à l'air dans un rapport 1/5. L'objectif consiste donc à prédire une variable représentant le facteur pH dans la table VEG, à partir de la variable pH_{eau} disponible dans la base de données EcoPlant.

Deux hypothèses sont formulées pour prédire cette variable pH :

- On raisonne avec une seule variable simple décrivant le pH sur l'ensemble du gradient ;
- On considère un couple de variables (par ex. Ca^{2+} et S/T) que l'on teste en fonction du pH pour analyser le comportement des plantes.

Les deux solutions sont testées pour certaines valeurs de pH. L'objectif est d'établir, par exemple, des relations du type pH = f(S/T). La courbe de réponse des plantes est déterminée sur l'ensemble du gradient de pH. Des tests sont menés sur des valeurs précises de pH. Lors de la mise en œuvre de ce modèle complexe, l'influence des différents paramètres est testée, et des calibrations sont réalisées en fixant certains d'entre eux (grâce au développement de mini-routines). Pour la variable pH seule, la relation entre le pH de la solution du sol et le pH_{eau} du sol est évaluée sur les 27 sites du sous-réseau CATAENAT sur lequel ces données sont disponibles. Le test de l'ensemble des relations possibles existant (entre le pH_{eau}, le pH de la solution du sol et la nutrition du sol sur la réponse des plantes) permet de déterminer l'expression de la variable à retenir pour représenter au mieux le facteur pH au sein de la table Veg. Une attention particulière a été portée sur l'influence du flux d'eau sur la variation du pH.

En ce qui concerne le modèle ForSAFE, des données de mesure du pH et de présence / absence des espèces sont disponibles pour des milliers de placettes (RENECOFOR et EcoPlant). Il est donc possible de calculer la réponse statistique de chacune des espèces en fonction du pH. Or, le pouvoir tampon du sol peut être un frein en terme de sensibilité de réponse, puisqu'une faible variation de pH n'entraîne pas forcément de variation visible dans la réponse des plantes (réponse qui est plus facilement visible sur les écosystèmes sensibles, notamment acides). Une analyse sur un nombre très important de placettes est nécessaire.

Pour être efficace, les sites dont le pH est proche de la neutralité (pH = 5,6) sont recherchés car une modification de 0,1 unité de pH peut, dans certains cas, engendrer des pertes allant jusqu'à une espèce. Pour confirmer ces cas, il est nécessaire de réaliser un bilan entre les espèces acidiphiles, neutrophiles et calcicoles, et d'établir un bilan gain / perte pour chaque type d'espèce en fonction du pH.

Les hypothèses posées pour réaliser cette analyse sont :

- Soit, raisonner à niche constante (c'est-à-dire que dans un premier temps, on ne prend pas en compte l'adaptation des espèces) ;
- Ou, transposer le raisonnement d'une échelle spatiale (plusieurs placettes) vers une échelle temporelle (entre 20 et 30 ans de données).

L'analyse de la réponse des plantes s'est effectuée en premier lieu par le biais d'un raisonnement en présence / absence. Les données RENECOFOR, codées en indices d'abondance / dominance, ont été relevées sur les quatre bandes en exclos de chacune des placettes du réseau. Cette répétition dans les relevés permet ainsi d'observer l'évolution des espèces végétales au sein d'une même placette. Il est intéressant de pouvoir séparer les quatre bandes et de multiplier ainsi les sites : les données d'abondance / dominance de la base RENECOFLORE ayant été converties en pourcentage de recouvrement moyen sur les quatre sous-placettes, il faut refaire le travail de conversion en conservant les données des quatre bandes. Ce travail permet d'augmenter le nombre d'échantillons disponibles pour la réalisation d'analyses statistiques.

Enfin, un raisonnement à l'échelle de groupes ou de communautés végétales plutôt qu'à l'échelle de l'espèce permet d'avoir une vision plus claire de la réponse des plantes aux variations d'un facteur environnemental.

Eau

Pour la calibration des niches écologique de la table de végétation, l'eau considérée est l'eau du sol disponible pour les plantes. Le paramétrage est donc effectué en considérant une limite inférieure et une limite supérieure de disponibilité en eau, au-delà desquelles l'espèce ne peut être présente sur le site, ainsi qu'une valeur optimale de disponibilité en eau pour la présence et la croissance des plantes.

Pour le couplage Veg-EcoPlant, les deux variables à tester sont par exemple la variable « *Eau utile* » représentant l'eau nécessaire à la croissance des plantes, ainsi qu'une variable « *Engorgement »*, représentant la durée et l'intensité d'un engorgement empêchant une croissance optimale des plantes.

Les variables testées pour représenter le facteur écologique d'approvisionnement des espèces en eau sont réparties en trois groupes distincts :

- Le premier regroupe les variables représentant un apport en eau bénéfique à la croissance des plantes, c'est-à-dire le cumul de précipitations durant la saison de végétation ou le bilan hydrique. Les logarithmes de ces variables sont également testés ;

- Le deuxième groupe de variables regroupe les variables représentant un effet contraignant pour la croissance des plantes, à savoir le déficit hydrique estival, ou bien le cumul de précipitations durant la saison sèche ;

- Enfin, un dernier groupe de variables marquant l'intensité de l'hydromorphie du sol a également été testé. Ce dernier groupe de variables permet de définir un coefficient modulant l'intensité de la réponse des espèces végétales aux autres facteurs à l'intérieur de la régression multiple. Un exemple de l'influence de ce coefficient lié à l'intensité de l'hydromorphie du sol sur la réponse des espèces est présenté au sein de la Figure 13.

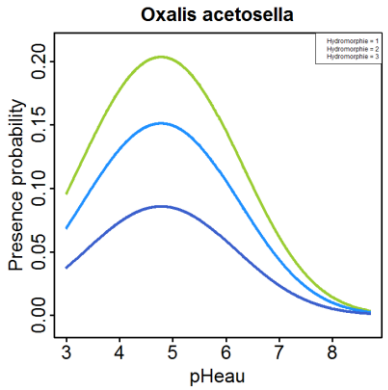


Figure 13 : Évolution de la réponse de l'espèce *Oxalis acetosella* à la variable pH du sol, en fonction de trois classes d'hydromorphie

NB : *vert = sol drainé, bleu clair = hydromorphie temporaire, bleu foncé = hydromorphie permanente*

Azote et autres paramètres

La réponse des plantes au facteur azote est calibrée dans la table de végétation en fonction de leur caractère nitrophile ou non. Pour le couplage, la paramétrisation de la réponse en azote dans la table de végétation est testée à partir du rapport C/N présent dans la base EcoPlant. Ce couplage s'avère délicat puisqu'il n'existe pas de mesure de la concentration en azote dans la solution du sol disponible dans la base de données EcoPlant, et que la variable C/N n'est pas très sensible pour permettre d'estimer la concentration en azote dans la solution du sol. Les valeurs de C/N sont directement introduites dans la table de végétation.

Conclusion/perspectives sur les paramètres

Deux méthodes de calibration de la table de végétation sont utilisées :

- **La première méthode vise à calibrer la réponse des espèces présentes sur quelques sites références du réseau RENECOFOR.** Cela a donné de bons résultats et a permis de simuler sur le long terme la réponse des plantes à divers scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique.

- **La seconde méthode mise en œuvre consiste à coupler deux bases de données** dont l'une permet le fonctionnement du modèle et l'autre, grâce à la grande quantité et à la qualité des données mesurées qu'elle regroupe, est utilisée pour calibrer de manière robuste la réponse des plantes aux divers facteurs environnementaux considérés. Cette méthode permet le développement de différents modèles en fonction du type de variables qui y sont intégrées :

    - *Un modèle dit saisonnier* a été testé, intégrant les variables calculées par trimestres (correspondants aux quatre saisons de l'année) ;
    - *Un modèle plus écologique* pour lequel les variables sont calculées sur la saison de végétation et la saison sèche dont les durées sont établies au jour près. Pour ce faire, pour chaque site, sont calculés le nombre de jours de l'année pour lesquels la température moyenne annuelle était supérieure à 5°C, et le nombre de jours pour lesquels le bilan hydrique était négatif. Ainsi, pour chaque site, des valeurs moyennes sont établies pour les variables représentant chaque facteur écologique spécifiquement. Ceci permet d'obtenir des meilleurs résultats de calibration de la réponse des espèces par rapport à ceux obtenus avec le modèle saisonnier pour lequel toutes les placettes avaient la même valeur de variable.
    - Enfin, *un troisième modèle contraignant* a également été testé. Il s'agit d'un modèle intégrant uniquement des variables contraignantes pour les plantes.

Après la création et l'utilisation des trois modèles, l'analyse des résultats de calibration de la réponse des espèces aux cinq facteurs environnementaux a conduit à conserver les deux modèles *« écologique » et « contraignant »*. Pour ces deux modèles, une sélection des variables les plus statistiquement représentatives des sites et des espèces est réalisée

parmi une liste de plus de 60 variables initiales. La distribution du poids et de l'occurrence des variables retenues pour le modèle contraignant sont présentés au sein de la Figure 14.

La progression suivie pour la réalisation de cette partie a d'abord été de calibrer quantitativement la table de végétation VEG en fonction de la base de données EcoPlant. Dans un deuxième temps, le calcul du coefficient de réponse de chacune des espèces est effectué en fonction des paramètres environnementaux présents en inputs du modèle VEG. À la suite de quoi, les résultats de cette calibration ont permis d'intégrer les modifications de paramétrage dans le code du modèle.

En ce qui concerne la paramétrisation des fichiers « espèces », l'objectif de cette étape est de pouvoir disposer de valeurs fiables (mesurées par exemple) pour des paramètres relatifs à la physiologie, à la phénologie et à l'activité photosynthétique, et ce pour chaque espèce d'arbre dominant présente sur les placettes du réseau RENECOFOR. L'établissement de tels fichiers paramétriques doit se faire pour chacune des espèces d'arbre et pour chacun des 17 sites de calibration. Une recherche bibliographique avec une forte dominance en autécologie des essences a été nécessaire pour réaliser ce travail effectué dans le cadre d'un stage de master M2.

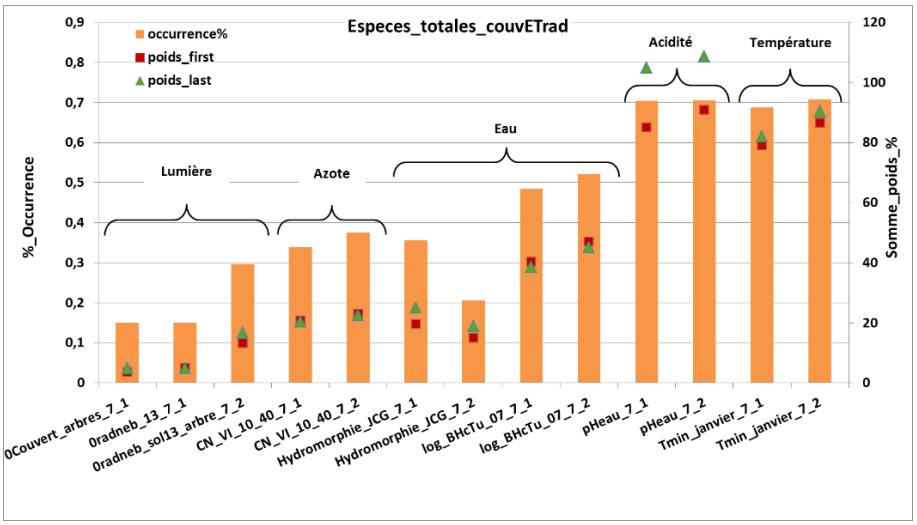


Figure 14 : Occurrence et poids des variables pour les espèces considérées dans leur globalité, lorsque les P-value de couvert_arbre et radneb13 sont conjointement significatives

2.4.2. Valeurs des traits fonctionnels

Les traits fonctionnels des espèces choisis sont :

- La longévité foliaire ;
- Le SLA (specific leaf area, surface foliaire spécifique) ;
- Le LDMC (leaf dry matter content, teneur foliaire en matière sèche) ;
- La hauteur de la canopée ;
- Le taux de lignine ;
- L'âge à maturité ;
- et les caractéristiques racinaires (cf. rapport définitif DYNAMO II).

Ces traits sont renseignés via la base de données du LEDA (http://www.ledatraitbase.org/LEDAportal/) ou la flore forestière française de Rameau (Rameau et al. 1989; Rameau et al. 2008). Les données ont été traitées par la réalisation d'une analyse en composante principale (ACP) et la construction de clusters pour l'ensemble des espèces et l'ensemble des paramètres contenus dans la table de végétation (stage de master M2 de Charles Schoirffer, réalisé à Bordeaux et encadré par Didier Alard et Emmanuel Corcket). Les ACP sont réalisées en utilisant les données de la table VEG, de la base BASEFLOR ainsi que les indices de Julve. Les résultats obtenus sont déjà satisfaisants mais restent à affiner, puisqu'ils permettent d'établir jusqu'à neuf groupes fonctionnels (mais pas au-delà). Avec un peu plus de détails, il serait donc possible de préciser la quantification des résultats.

Deux approches sont privilégiées :

- Une première approche consistant à raisonner sur la base de traits biologiques (SLA, âge, LDMC…) ;
- Une seconde approche intégrant les réponses physiologiques et écologiques des espèces.

En ce qui concerne les réponses écologiques, les réponses obtenues par ACP sont similaires en utilisant les deux systèmes différents (les indices de Julve et les paramètres de la table de végétation). Le travail affiné sur les groupes biologiques doit permettre d'obtenir une prédiction de la réponse des groupes *a posteriori*, grâce à l'utilisation des résultats de runs du modèle tenant compte de l'information concernant les espèces. L'hypothèse de produire et d'utiliser deux tables de végétation est à envisager, suivant qu'un ou plusieurs groupes sont associés à chaque espèce végétale.

Pour les 476 espèces végétales de la table de végétation Veg, il a été possible de renseigner pour 258 espèces l'ensemble des traits, pour 47 espèces un seul trait a pu être renseigné, et pour le reste des espèces de la table deux traits ou plus sont manquants.

Pour les espèces de la table Veg pour lesquelles les traits sont non renseignés, il reste encore à compléter leurs valeurs de traits fonctionnels. Pour cela, une recherche bibliographique approfondie est nécessaire. Si les espèces ne sont pas décrites dans la bibliographie existante, les traits sont déterminés à dire d'experts, ou en se basant sur des valeurs de traits déjà renseignés pour des espèces proches. La construction d'un plus grand nombre de groupes peut être envisagée au fur et à mesure de la mise à jour des traits manquants pour certaines espèces, en fonction des conclusions obtenues suite aux tests réalisés dans le projet. Si cela s'avère nécessaire, une division du territoire en zones biogéographiques peut être envisagée, avec établissement de groupes qui correspondront de manière spécifique à ces régions.

2.5. Estimation des charges critiques azotées à l'horizon 2100 (changements de biodiversité)

Des simulations sont réalisées sur les 102 sites RENECOFOR à l'aide de ForSAFE-Veg. Ces simulations doivent prendre en compte les différents scénarios de dépôts de NOx, de SOx et de NHx atmosphériques fournis par le CCE à l'horizon 2100, et intégrer des scénarios de changement climatique. Les principaux scénarios considérés étaient à l'origine les scénarios A2 et B1 du SRES. L'acquisition de données concernant de nouveaux scénarios de changement climatique de l'IPCC issus de modèles appliqués à l'échelle régionale a pu être réalisée. Ces nouveaux scénarios de changement climatique, actuellement utilisés par le GIEC, sont téléchargés pour chacune des 102 placettes. Ils sont de type RCP (Representative Concentration Pathway). La simulation sur l'ensemble des 102 sites intègre l'effet couplé de deux scénarios de dépôts atmosphériques et de quatre scénarios de changement climatique.

L'objectif est de :

- Réaliser les simulations, sur l'ensemble des placettes, en tenant compte des scénarios de dépôts et de climat ;
- Estimer les charges critiques azotées à l'horizon 2100 en se basant sur les changements de biodiversité observés.

2.5.1. Richesse spécifique et index harmonisé de biodiversité (évolution temporelle)

Il est important d'évaluer, via des indices indépendants, les évolutions de biodiversité basées sur des mesures au cours du temps et, outre l'impact des dépôts azotés, de tenter d'apprécier les effets des paramètres environnementaux comme l'effet espèce arborée sur ces évolutions.

En première approche, plusieurs indices de biodiversité (richesse spécifique, Shannon, Czekanowski) sont considérés pour évaluer l'impact des espèces arborées dominantes sur la biodiversité de la végétation de sous-bois, ainsi que l'impact de plusieurs habitats EUNIS sur l'évolution de la biodiversité. Les résultats de deux indices de biodiversité majeurs : le nombre d'espèces et l'indice de Shannon.

La richesse spécifique est illustrée pour chaque espèce arborée dominante (Figure 15a) et l'indice de Shannon est illustré pour chaque type d'habitat EUNIS (Figure 15b). La richesse spécifique est calculée à partir des relevés phyto-écologiques effectués par l'ONF sur les 102 sites du réseau RENECOFOR. L'évolution de la richesse spécifique est évaluée pour chaque type d'habitat et d'espèces d'arbres dominants à l'échelle nationale.

L'indice de Shannon index (H') est calculé (équation 3) en utilisant l'abondance relative de chaque espèce de plantes pour quelques sites du réseau RENECOFOR bien documentés.

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} x_i . \ln x_i \qquad \text{(Eq. 3)}$$

S = nombre d'espèces ;
x_i = proportion de i^{th} espèces par rapport au nombre total d'espèces.

Le nombre d'espèces de sous-bois est influencé par l'espèce arborée dominante. Les forêts à *Abies alba* et *Quercus robur* exhibent une plus grande diversité que celles à *Pinus*, mais la variabilité entre les sites est plus grande (Figure 15a). À l'exception de *A. alba* et *Q. robur*, la richesse en espèces est significativement différente pour toutes les espèces d'arbres dominants (95 % niveau de confiance du test de Tukey). Une plus grande diversité spécifique des espèces de sous-bois est observée dans les forêts mixtes à *Abies-Picea-Fagus* comparée aux peuplements purs.

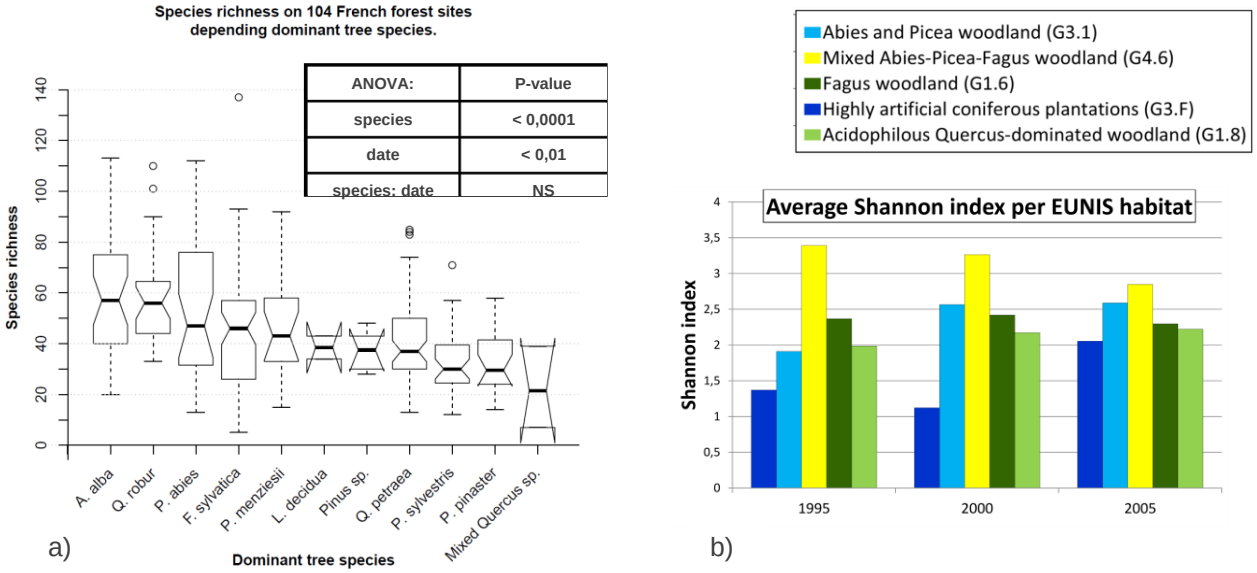


Figure 15 : Nombre d'espèces et tendances sur 10 ans de l'indice de Shannon pour différentes espèces arborées dominantes et habitats EUNIS

***NB :** (a) richesse spécifique (nombre d'espèces) ; (b) indice de Shannon*

Le changement de biodiversité est évalué sur trois sites sélectionnés suivant deux méthodes :

- Les abondance/dominance des espèces végétales : Sur chaque site, les relevés de végétation (années 1995, 2000 et 2005) avec les abondances des espèces végétales sont réalisés par l'ONF. La présence / absence de chaque espèce permet d'évaluer le changement de la composition en espèces entre 1995 et 2005. Pour chaque site, toutes les espèces relevées sont considérées au moins une fois. Cette méthode ne pouvait pas être extrapolée à d'autres périodes en raison du manque de données ;

- La simulation de la composition végétale jusqu'à 2100 : Cette seconde méthode a pour but de prédire la probabilité de présence d'environ 470 espèces de plantes, en relation avec les variations de quelques paramètres environnementaux, comme le pH, le C/N, la température moyenne, la température minimale et le teneur en eau du sol. Les sorties du modèle ForSAFE (sans Veg) peuvent alors être utilisées pour évaluer les changements de ces paramètres jusqu'en 2100. Ainsi, pour la totalité des 470 espèces, une routine a été élaborée pour calculer la probabilité de présence des plantes en considérant la valeur de l'optimum de croissance, et ainsi simuler l'évolution de la présence/absence des espèces à échéance pour les sites étudiés pour les différents paramètres dont l'azote.

L'évolution du pourcentage relatif de richesse spécifique entre 2010 et 2100 testés sur trois sites forestiers est présenté dans la Figure 16. Ces simulations sont basées sur la composition des relevés de 2010 effectués par l'ONF et sous l'influence de trois scenarios de dépôts d'azote atmosphérique. Le C/N et le pH sont les principaux paramètres considérés pour estimer les évolutions de la richesse spécifique.

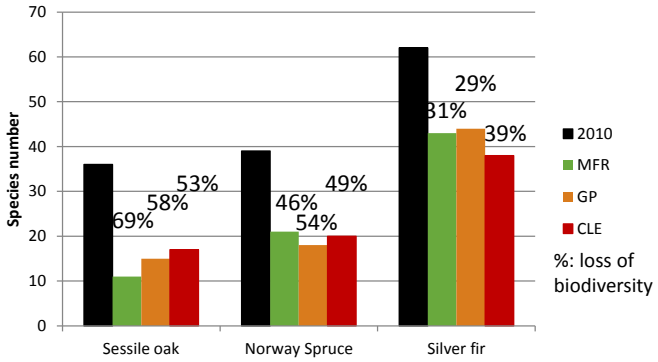


Figure 16 : Évolution de la richesse spécifique (%) entre 2010 et 2100 selon trois scenarios de dépôts atmosphériques (MFR, GP, CLE)

NB : *Maximum Feasible Reduction (MFR) ; Götenborg Protocol (GP) ; Current Legislation (CLE)*

Les simulations indiquent une perte nette de biodiversité de 47 % environ en moyenne, d'ici à 2100. Cette valeur dépend du site forestier. Elle est plus marquée pour le site à chêne sessile (sessile oak), en raison d'une plus forte augmentation de pH pour ce site. Peu de différences sont observées entre les trois scenarios, excepté pour le site à chêne sessile pour lequel le scénario MFR engendre une plus grande perte de biodiversité en raison d'une augmentation du pH de 5,8 à 6,4. Sur le site sous sapin (silver fir) en revanche, la perte de biodiversité est plus importante dans le cas du scénario CLE en raison du caractère acide accentué sur ce site. Selon les conditions, le changement de pH des sols, en positif ou négatif, peut impliquer un changement de biodiversité positif ou négatif.

Les paramètres C/N et pH peuvent toutefois ne pas être suffisamment sensibles pour prédire efficacement les évolutions de richesse spécifique, comme démontré par ces trois exemples avec des faibles variations observées en réponse aux scénarios de dépôts atmosphériques, notamment lorsque la richesse spécifique est très élevée au départ. Toutefois, ces résultats ne concernent que trois sites et doivent être étendus sur l'ensemble des autres sites.

Les résultats ont été présentés pour la contribution de la France aux derniers meetings du PIC Cartographie et Modélisation et intégrés dans le rapport du CCE (2014).

Lors du 24th CCE Workshop meeting à Rome en 2014, il a été décidé d'adopter un indice harmonisé entre les différents pays de "No net loss of biodiversity" basé sur la probabilité de présence des espèces. La France a été force de proposition grâce à une approche menée avec les derniers développements qui s'est révélée tout à fait justifiée. En ce qui concerne la richesse spécifique, il n'est pas toujours possible de comparer plusieurs sites entre eux en tenant compte seulement de ce seul indice.

L'indice HSI (pour *Habitat Suitability Index*, Equation 4) retenu lors du congrès du CCE prend en compte l'abondance relative des espèces présentes par rapport à l'abondance maximale atteinte dans les conditions environnementales de l'habitat.

$$HSI = \frac{1}{n}\frac{sp_i}{\sum_{i=1}^{n} sp_{i,max}} \quad \text{(Eq. 4)}$$

n = nombre d'espèces ;
sp_j = probabilité d'occurrence de l'espèce j ;
$sp_{i,max}$ = probabilité d'occurrence maximale pour l'espèce j.

La construction de cet indice permet d'envisager son application pour estimer les charges critiques relatives à un écosystème permettant de conserver une certaine stabilité de la communauté végétale ou bien d'utiliser les valeurs de niches écologique des espèces présentes sur le site considéré afin de déterminer les charges critiques d'acidité et en azote eutrophisant acceptables pour l'écosystème. Les résultats obtenus suite à la calibration de la table de végétation peuvent ainsi être utilisés pour calculer sur le long terme l'HSI des trois sites étudiés, en considérant les occurrences observées de 2000 à 2005 comme des probabilités maximales d'occurrence des espèces, et les occurrences modélisées jusqu'à 2100 comme probabilités d'occurrence de chaque espèce.

Ce nouvel indice de biodiversité, calculé en utilisant le module PROPS développé par Alterra (NL) ou le module VEG que nous utilisons, constitue donc un outil harmonisé intéressant pour tous les pays européens impliqués dans les évaluations de charges critiques azotées. Cela permet de comparer d'une même façon la perte nette de biodiversité. À la suite de la calibration du module Veg, les résultats d'évolution du couvert des espèces végétales au cours du temps ont permis de calculer cet indice de qualité pour chaque habitat des sites du réseau RENECOFOR. Les données acquises auprès de l'IGN (dans le cadre de la convention recherche établie en 2016) précisent, pour chaque habitat EUNIS rencontré sur les placettes RENECOFOR, la liste des espèces typiques qui y sont liées. Le nouvel indice de biodiversité HSi est calculé en rapportant la probabilité de présence des espèces, observées sur chaque site, à la probabilité de présence maximale de ces espèces remarquables.

Ces résultats ont été présentés au cours de la rencontre annuelle du PIC Cartographie et Modélisation à Dessau en avril 2016. Un des principaux objectifs de la rencontre était l'actualisation des charges critiques de biodiversité.

Outre l'utilisation de cet indice commun (HSi) par les pays européens participant à l'appel à données, d'autres indices de similarité, comme les indices de Czekanowski, Mondrian ou bien Sørensen, peuvent aussi être testés en parallèle, en appui, ou comme moyen de comparaison.

2.5.2. Impact à long terme des scénarios de changement de dépôts azotés et du climat sur la composition de la solution de sol

Dans le contexte des changements globaux actuel, il est nécessaire d'inclure les scénarios de changement climatique en plus des scénarios de dépôts atmosphériques pour estimer les charges critiques et prédire de manière réaliste l'évolution des forêts et de la biodiversité qu'elles hébergent. Dans la présente étude MODYCRIN, et comme commencé dans le projet DYNAMO II (Gaudio et al., 2014), l'objectif est donc d'appliquer les scénarios de changement climatique au modèle couplé biogéochimie – écologie ForSAFE-VEG (de Vries et Posch 2011).

Depuis 2011, de nouveaux scénarios de changement climatique sont élaborés. Ainsi les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 remplacent respectivement les scénarios SRES B1, A1B et A2 (Van Vuuren et al. 2011) (respectivement +2.6, +4.5 et +8.5°C d'augmentation de la température moyenne journalière). Une demande sans succès a été faîtes auprès de l'IPSL (Marie-Hélène Foujols) et de l'INERIS (Anne-Christine Legall) en septembre 2012 pour obtenir les données de ces nouveaux scénarios. Pour tenter de les obtenir, une nouvelle demande a été faîtes auprès du CNRM (Météo-France, Toulouse). Des scénarios de changement climatiques applicables à une échelle régionale sont aujourd'hui accessibles (ayant une résolution plus fine que les scénarios nationaux). Ces scénarios locaux sont plus adaptés dans le cas de l'étude MODYCRIN puisque nous travaillons à l'échelle de peuplements, voire de massifs forestiers (échelle à laquelle des variations microclimatiques locales peuvent avoir une influence certaine sur les espèces végétales). Pour chaque scénario (pour rappel, scénarios référence, RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5), environ 15 modèles différents développés par divers instituts météorologiques européens sont disponibles. L'ensemble de ces modèles a donc été téléchargé afin d'établir des valeurs moyennes mensuelles de température par scénario, en moyennant les valeurs proposées par les différents modèles.

Les données téléchargées au pas de temps quotidien sont relatives à la température minimale, à la température maximale, à la température moyenne, au cumul de précipitations, et aussi pour certains scénarios à la hauteur de neige et à la somme des rayonnements atmosphérique et infra-rouge. Pour chacun des 102 sites, des moyennes mensuelles sont calculées sur chaque scénario à partir des 15 modèles téléchargés. Ces données sont par la suite utilisées dans la modélisation à la place des anciens scénarios du SRES, dans le but de simuler l'impact du changement climatique sur la réponse des espèces végétales forestières.

Le projet DYNAMO II et les résultats présentés dans le rapport (Gaudio et al., 2014) ainsi que les travaux publiés (Probst et al., 2015) ont montré l'intérêt de combiner ces scénarios. On peut ainsi identifier l'importance relative des scénarios de dépôts et de climat sur la biodiversité. Ces résultats constituent cependant les premières sorties du modèle FroSAFE-

Veg maintenant calibré. Ces résultats nécessitent d'être approfondis dans le cadre de l'étude MODYCRIN et de la nouvelle version du modèle ForSAFE incluant les améliorations prévues et les nouveaux scénarios.

Les différents scénarios de dépôts atmosphériques et de température considérés sur les trois sites d'étude sont présentés au sein de la Figure 17.

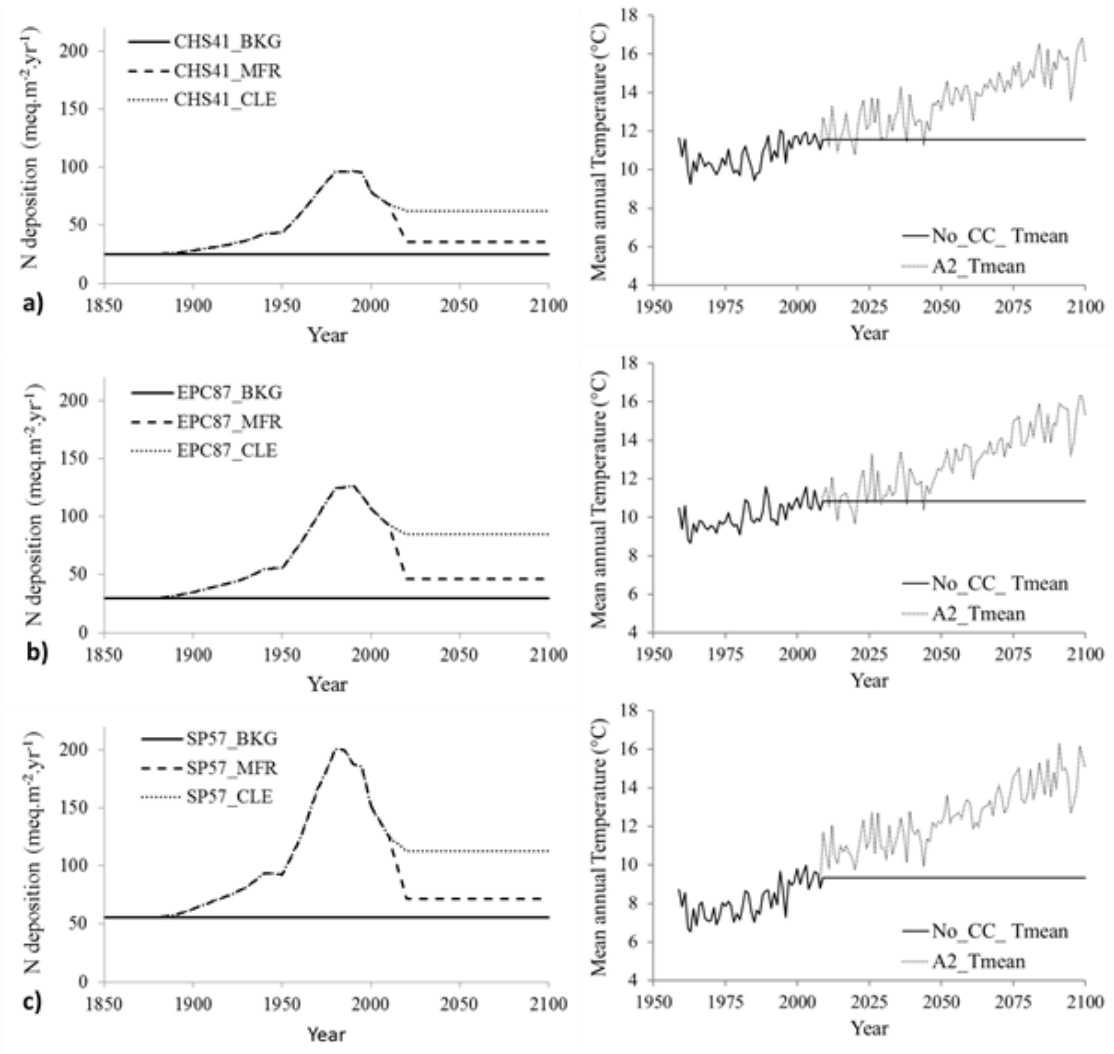


Figure 17 : Scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique pour trois sites (Chêne sessile (CHS41), Épicéa (EPC87), Sapin pectiné (SP57))

NB : *Dépôts atmosphérique d'azote (à gauche) ; Changement climatique (à droite). La quantité totale d'azote atmosphérique déposée au cours de la période 1800 – 2100, respectivement pour les trois sites (CHS41, EPC87, SP57), est égale à 9050 meq.m^{-2} (a), 11450 meq.m^{-2} (b), 19136 meq.m^{-2} (c).*

Impact des scénarios de dépôts atmosphériques

Quatre scénarios initiaux de dépôts atmosphériques, fournis par le programme EMEP (The European Monitoring and Evaluation Program) pour la France, sont utilisés dans les différentes phases de simulation. À l'occasion de l'appel à données 2014, une mise à jour des deux scénarios de dépôts *MFR* (*Maximum Feasible Reduction*) et *CLE* (*Current Legislation*) a été réalisée grâce à de nouvelles données fournies par le programme EMEP (Figure 17). Les scénarios MFR et CLE ont été actualisés et donc intégrés en priorité dans la modélisation, seuls ou en combinaison avec deux scénarios de changement climatique. Seuls ces deux scénarios de dépôts seront considérés lors de l'analyse des résultats afin de déterminer leur impact à long terme sur la végétation. Les quatre combinaisons de scénarios possibles

climat/dépôts, ainsi que leurs impacts sur la composition de la solution du sol et sur la composition végétale ont ainsi été testées pour chacun des trois sites RENECOFOR.

Une simulation a été réalisée sur l'évolution à long terme (de nos jours à 2100) de la composition de la solution du sol, et aussi la mise en lien avec l'évolution de la composition floristique relevée sur chaque site, grâce au couplage des modules biogéochimique et écologique du modèle ForSAFE-Veg.

Les résultats sont assez similaires concernant l'impact des quatre scénarios de dépôts atmosphériques sur plusieurs paramètres de la solution de sol pour les trois sites étudiés. Il y a une même gamme de tendances en réponse aux différents scénarios de dépôts. Pour illustrer ces résultats, l'évolution des concentrations en cations basiques de la solution de sol et de la saturation en bases du sol est présentée pour un site sous couvert d'épicéas (EPC 87) et pour un site sous couvert de sapins (SP 57) (Figure 18).

On observe une tendance à l'augmentation générale pour les cations basiques dans la solution de sol et du taux de saturation en bases du sol pendant les années 80 (avec un bon accord avec les données mesurées pendant la descente de la courbe) et pendant la deuxième partie du 21ème siècle. Si la première augmentation de la concentration en cations basiques de la solution de sol correspond au dépôt accru d'azote atmosphérique observé dans les années 80 (voir Figure 9), le pic de saturation en bases du sol observé dans les années 60 dans le site sous sapin, ne correspond pas à une augmentation du dépôt d'azote. Ainsi, d'autres facteurs d'influence sont à considérer.

Pour les années futures, les simulations sont cohérentes pour les différents scénarios. Après 2040, les simulations indiquent un accroissement important pour deux paramètres. Quelques différences sont observées à partir de 2010 entre les scénarios de dépôts. Pendant toute la période de 2010 à 2100, le scénario CLE a un plus fort impact sur la concentration en cations basiques de la solution de sol que les scénarios GP, MFR et BCK. Ceci est cohérent avec la désaturation du sol en lien avec un apport accru de protons via les dépôts atmosphériques azotés. Le scénario CLE a plus d'impact que le scénario MFR (sur tous les paramètres du sol) et cette différence s'accroit avec le temps jusqu'en 2100. La forte augmentation des concentrations en cations basiques en 2040 pour tous les scénarios n'est pas liée à un fort accroissement des dépôts d'azote. Les dépôts atmosphériques azotés ne sont donc pas les seuls facteurs d'influence de la concentration en cations basiques de la solution de sol et du taux de saturation en base du sol.

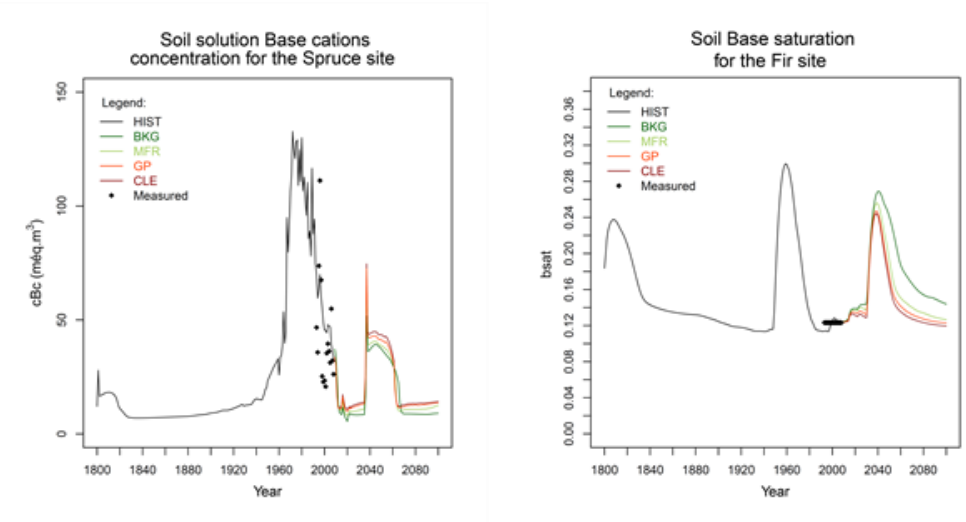


Figure 18 : Évolution de la concentration en cations basiques de la solution de sol et du taux de saturation du sol jusqu'à 2100, sous l'effet de quatre scénarios de dépôts atmosphériques (BGK, MFR, GP et CLE avec HIST représentant le scénario historique)

NB : *Background (BGK), Maximum Feasible Reduction (MFR), Gotenborg Protocol (GP), Current Legislation (CLE) avec HIST représentant le scénario historique. Les points représentent les données.*

Impact des scénarios combinés des dépôts atmosphériques azotés et des scénarios climatiques

L'impact de trois scénarios de changement climatique SRES (A2, B1 et no climate change, Figure 17) a été combiné aux scénarios de dépôts atmosphériques azotés les plus probables (MFR and CLE) d'ici 2100. Ces combinaisons permettent de discriminer les effets respectifs jusqu'en 2100 de chaque facteur d'influence sur les tendances de composition de la solution de sol et de composition floristique, comme le montre la Figure 19 pour les concentrations en cations basiques du site EPC87 et à la Figure 20 pour l'évolution de la composition floristique des trois sites étudiés.

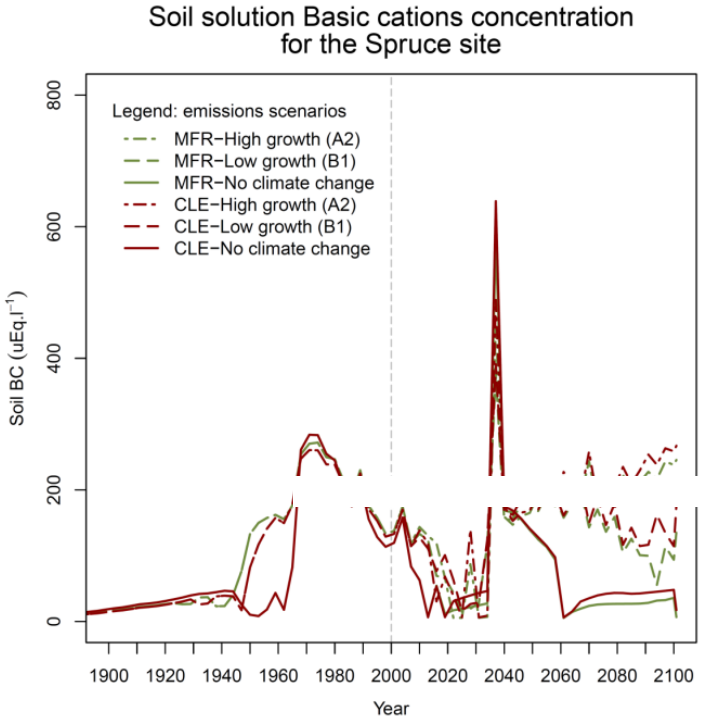


Figure 19 : Évolution de la concentration en cations basiques de la solution de sol du site sous épicéa (EPC 87), sous l'influence des scénarios de dépôt CLE et MFR combinés aux trois scénarios de changement climatique (A2, B1 et no change)

Pour les différents scénarios, de 1940 à 2040, les simulations ForSAFE indiquent que la réponse de la concentration en cations basiques de la solution de sol varie grossièrement de la même manière. Cette réponse est grandement influencée par les évolutions climatiques et les dépôts atmosphériques durant la période. Les intrants des dépôts azotés ont une plus forte influence durant les années 80.

Le scénario CLE a une plus forte influence sur le drainage de cations basiques que le scénario MFR. Cependant, à partir de 2040, les changements climatiques (scénarios A2 et B1) induisent une plus forte augmentation des concentrations en cations basiques dans la solution de sol que les dépôts azotés via CLE ou MFR. Le scénario (A2) – Fort impact sur la croissance – conduit à une augmentation de la concentration des cations drainés par la solution de sol de l'ordre de dix fois comparée avec le scénario "No climate change", et de deux fois comparé avec le scénario (B1) – Faible impact sur la croissance.

Cette plus forte influence du climat (A2 représentant les conditions climatiques les plus chaudes) peut être liée à une augmentation de la température du sol qui accélère les processus de minéralisation et qui contribue à une plus forte dégradation de la matière organique (Woodwell 1978; Jenkinson, et al., 1991; Schimel et al. 1994; Kirschbaum 1995) et de production de cations basiques dans la solution de sol.

2.5.3. Impact à long terme des scénarios de changement de dépôts azotés et du climat sur la composition floristique du sous-étage

L'évolution de la composition floristique (Figure 20) sur les trois sites, simulée de 1800 à 2100, est analysée à travers les changements de similarité observés entre un scénario de référence et différents scénarios de dépôts d'azote et de changement climatique utilisés seuls ou en combinaison. Les impacts de ces changements environnementaux sont donc étudiés à l'échelle de la communauté végétale, et non à l'échelle de l'espèce. En conséquence, il est possible que la réponse de l'ensemble de la communauté végétale d'un site soit guidée uniquement par les réponses de quelques espèces sensibles à l'azote.

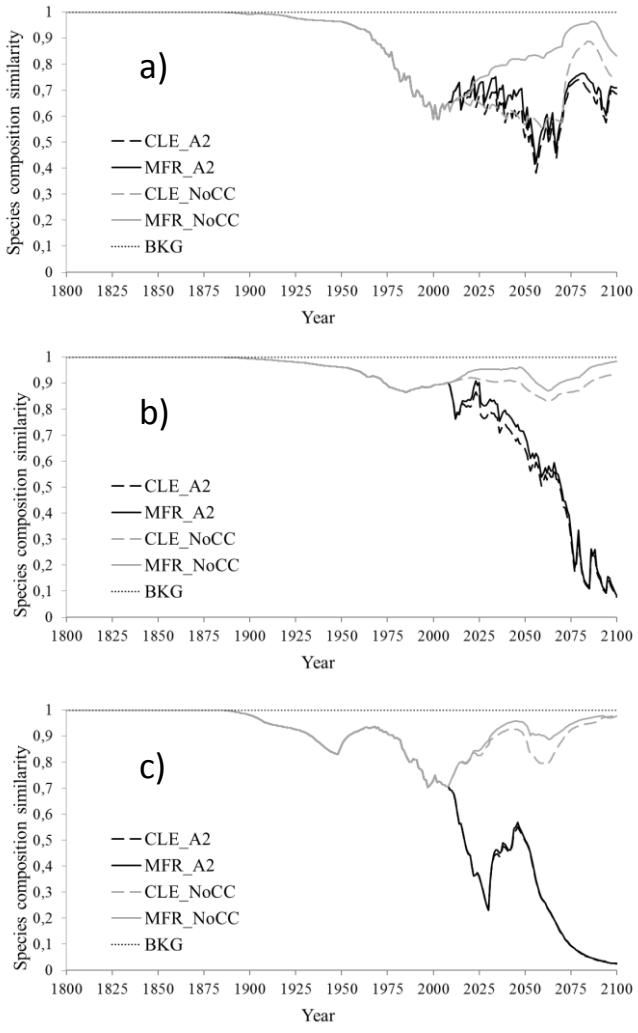


Figure 20 : Évolution dans trois sites (CHS41, EPC87 et SP57) de la similarité de la composition floristique entre un état de référence (scénarios "no climate change" pour le climat, et "BKG - background" pour les dépôts azotés) et les quatre combinaisons possibles des scénarios dépôts MFR et CLE (dépôts) et des scénarios climat « No climate change » et « A2 – high growth »

NB : *a) site CHS41 ; b) site EPC87 ; c) site SP57*

Impact des scénarios de dépôts atmosphériques

En analysant l'impact des scénarios de dépôt d'azote en l'absence de changement climatique, la Figure 20 montre d'importantes variations de similarité dans l'abondance des plantes en fonction des scénarios considérés. Une diminution générale de la similarité avec le scénario CLE apparaît pour les trois communautés végétales, bien qu'un effet site important influence prioritairement les variations observées sur chaque station. Les différences de similarité observées entre les deux scénarios MFR et CLE et le scénario de référence, présentent la même tendance à l'augmentation au début des années 2000, même si une perte de similarité plus faible est observée pour le scénario MFR. La plus grande différence entre MFR et CLE est observée pour le site CHS41. Le scénario de dépôt suivant la législation actuelle (CLE) a un impact plus négatif sur la composition de la communauté végétale. En ce qui concerne le site dominé par l'Épicéa (Figure 20b), une relative stabilité temporelle de l'abondance des espèces présentes sur ce site peut être observée, même si des différences existent entre les deux scénarios de dépôt. Quel que soit le scénario considéré, à ces variations à long terme de la similarité des communautés végétales s'ajoutent aussi de nombreuses fluctuations à court terme avec des périodes de perte ou de gain de similarité. Ces variations à court-terme sont particulièrement visibles sur les sites CHS41 et SP57, se déroulant sur des cycles de 10 ans pour le chêne, et sur des périodes plus longues pour le sapin, par exemple.

Impact des scénarios changement climatique

Pour l'ensemble des sites étudiés, une diminution progressive mais relativement importante de la similarité de la composition floristique apparaît suite à l'augmentation de température. Cette observation sur le long terme est d'autant plus vraie pour les deux sites EPC87 et SP57, alors qu'une perte de similarité plus modérée est visible sur le site CHS41, avec notamment l'apparition d'une relative stabilité aux alentours de 2050. Pour les trois sites, des modifications de la tendance générale suivie par la similarité des communautés peuvent être observées à court terme (de même que pour la réponse à l'augmentation des dépôts d'azote atmosphérique). Ainsi, la réponse des espèces végétales semble suivre deux grandes tendances :

- Une diminution générale de la similarité à long terme comparée avec l'évolution observée en l'absence de changement climatique, régulièrement entrecoupée de périodes d'augmentation ;
- Une diminution de la similarité se déroulant sur de courtes périodes.

Impact des scénarios combinés des dépôts atmosphériques azotés et des scénarios climatiques

En combinant l'effet des dépôts atmosphériques et du changement climatique, les tendances générales observées précédemment sont conservées. Cependant, des différences de similarité plus faibles sont observées entre les deux scénarios de dépôts appliqués en association avec le scénario de changement climatique A2, comparativement aux mêmes scénarios considérés en l'absence de changement climatique. Cette observation est particulièrement visible sur les résultats du site CHS41, mais peut être généralisée à l'ensemble des sites. En conséquence, il semble que la tendance générale de l'évolution de la similarité soit principalement soumise aux scénarios de changement climatique. Pour aller plus loin, les tendances secondaires observées à court terme et déjà décrites pour les scénarios de dépôt et de climat considérés de manière indépendante restent présentes lorsqu'ils sont utilisés en combinaison. Dans le cas du site dominé par le chêne sessile, bien que la tendance générale observée tende vers une perte de similarité lorsque le scénario de changement climatique est intégré à la simulation, un effet opposé peut être observé à court terme. Ce regain de similarité au cours duquel l'abondance des espèces semble tendre vers la composition standard de la communauté, est observable à plusieurs reprises, comme par exemple aux alentours de 2055 et 2070 pour le site CHS41, et 2035 pour le site SP57.

2.5.4. Impact à court terme de la gestion forestière

Les scénarios de changement climatique et de dépôts atmosphériques azotés ont de façon évidente un impact sur les évolutions à long terme de la composition de la solution de sol et de la végétation. Toutefois, d'autres facteurs anthropiques comme la gestion forestière ou les tempêtes d'origine naturelle peuvent avoir une influence sur ces paramètres, car ces coupes d'arbres influencent fortement les sols et la réponse de la végétation, en modifiant les équilibres des cycles biogéochimiques.

Cet impact de la gestion forestière peut être évalué dans le cas des forêts plantées. Ces types de forêts sont dédiés à la production de bois et sont ainsi gérés par des cycles réguliers de croissance qui commencent par la plantation et qui finissent par la coupe des arbres mâtures. Pour illustrer ces faits, les tendances d'évolution de la biomasse des troncs et de la concentration en cations de la solution de sol sont simulées sous l'influence de quatre scénarios de dépôts d'azote, en se focalisant sur l'impact des coupes sur un site à épicéas (Figure 21). Deux coupes sont réalisées durant la période considérée (1966 et 2036).

Les résultats montrent que les pics à court terme de concentrations en cations basiques de la solution de sol sont fortement liés à l'évolution de la biomasse des troncs, et notamment aux changements dus aux coupes à blanc. En 1960 et 2035, les concentrations en cations de la solution de sol augmentent subitement dans des proportions exceptionnelles, en raison de l'absence de prélèvements par les arbres, et ce quel que soit le scénario de dépôts atmosphériques. Les coupes réalisées dans le peuplement forestier induisent ces pics de concentrations élevées dans les eaux de drainage. Toutefois, l'intensité de lessivage des cations observée dans les années 80 reste fortement influencée par les dépôts azotés.

En 2040, la coupe a un effet plus faible sur ces sorties de cations quand le dépôt atmosphérique azoté est plus faible. Ainsi, à court-terme, la gestion forestière et en particulier les coupes d'arbres massives peuvent avoir un effet important sur le lessivage de cations basiques, et peuvent augmenter l'influence d'une augmentation des dépôts d'azote atmosphérique.

En 2035, juste avant et après la coupe forestière, il y a une légère différence selon les scenarios de dépôts, alors que pendant l'année de la coupe, les tendances pour les cations basiques sont les mêmes, ce qui indique l'influence significative de la gestion forestière.

Pour ce qui est des scenarios de changement climatique, la concentration en cations basiques est la même pour tous les scénarios pendant la période d'influence de la coupe forestière, conduisant aux même conclusions que ci-dessus.

Les résultats sur l'évolution de similarité de la composition floristique (décrits au paragraphe 2.5.2.) montrent des effets à court terme autres que les dépôts d'azote et le changement climatique. En comparant la fréquence d'apparition de ces effets avec le calendrier des coupes forestières prévues sur les différents sites, il est constaté, comme pour la composition de la solution du sol, que ces variations à court terme coïncident avec une ouverture du couvert arboré due à une coupe ou un épisode de tempête. Au changement de composition de la solution du sol s'ajoute donc un apport accru de lumière pour la strate du sous-étage, ayant comme effet l'augmentation du couvert des espèces héliophiles et de demi-ombre, et le recul de l'abondance des espèces les plus sciaphiles. L'impact de la gestion forestière est particulièrement visible pour les sites CHS41 et SP57 où le nombre d'espèces est important dans la strate du sous-étage. Son effet sur la composition de la communauté végétale est donc intimement lié à la réponse individuelle des espèces.

Ainsi, une forte augmentation de la similarité peut être observée aux alentours de 2030 sur le site SP57, faisant immédiatement suite à une coupe d'intensité importante. A l'échelle des espèces, une diminution du couvert (Figure 22c et d) est observée pour le Sapin (*Abies alba* Mill.) et l'Oxalis (*Oxalis acetosella* L.) qui sont deux espèces d'ombre ou tolérantes à l'ombre (durant les 10 premières années pour le Sapin, ce qui correspond à la période d'appartenance à la strate du sous-étage). Suite à cette perturbation, le couvert de ces deux espèces tend donc de nouveau vers la valeur atteinte avant l'augmentation de la quantité d'azote déposée.

Une observation similaire peut être faite pour deux espèces présentes sur le site CHS41. Le lierre (*Hedera helix* L.), dont l'augmentation du couvert semble favorisée par l'effet combiné des dépôts d'azote et du changement climatique, est plutôt une espèce d'ombre ou de demi-ombre. Les épisodes de coupe ont donc pour effet la diminution du couvert à court terme, permettant de revenir à une valeur d'abondance plus proche de celle atteinte avant l'expansion provoquée par les hausses de température et de dépôts d'azote (Figure 22a). Cette diminution du couvert du lierre, qui est l'une des espèces les plus abondantes sur ce site, permet en partie d'expliquer les regains de similarité de la communauté observés ponctuellement sur la Figure 20a. La diminution à long terme du couvert de la Houlque molle (*Holcus mollis* L.) (Figure 22b), espèce héliophile affectionnant les sols plutôt pauvres en éléments nutritifs, est quant à elle provoquée par l'augmentation des dépôts azotés. Celle-ci est cependant contre- carrée, sur de courtes périodes, par l'ouverture de la canopée liée aux coupes d'éclaircies, provoquant une augmentation de son abondance. Ce retour du couvert de la Houlque à une valeur voisine de celle antérieure à l'augmentation des dépôts et de la température s'ajoute alors à la diminution du couvert du lierre, ce qui permet là-aussi d'expliquer en partie les brefs regains de similarité observés sur la Figure 20a.

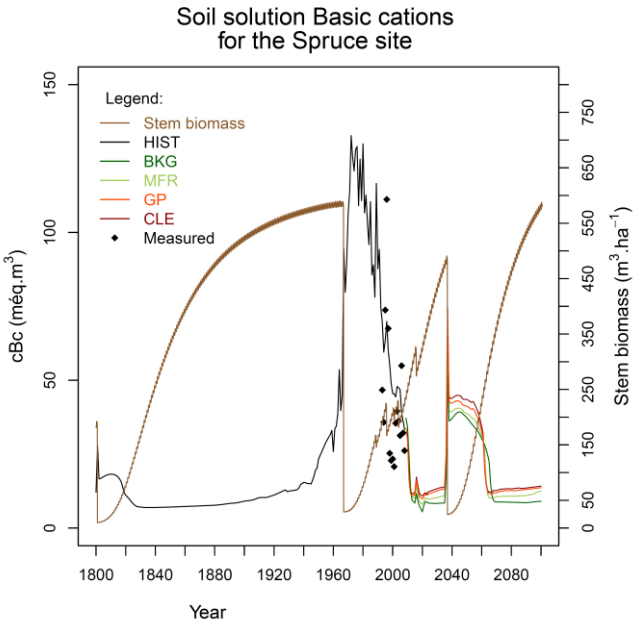


Figure 21 : Évolution de la biomasse des troncs et de concentration en cations basiques de la solution de sol du site sous épicéa (EPC 87) – étude de l'influence de quatre scénarios de dépôt

NB : *Les points noirs représentent les points de mesure. Les périodes de coupe correspondent aux chutes de quantité de biomasse*

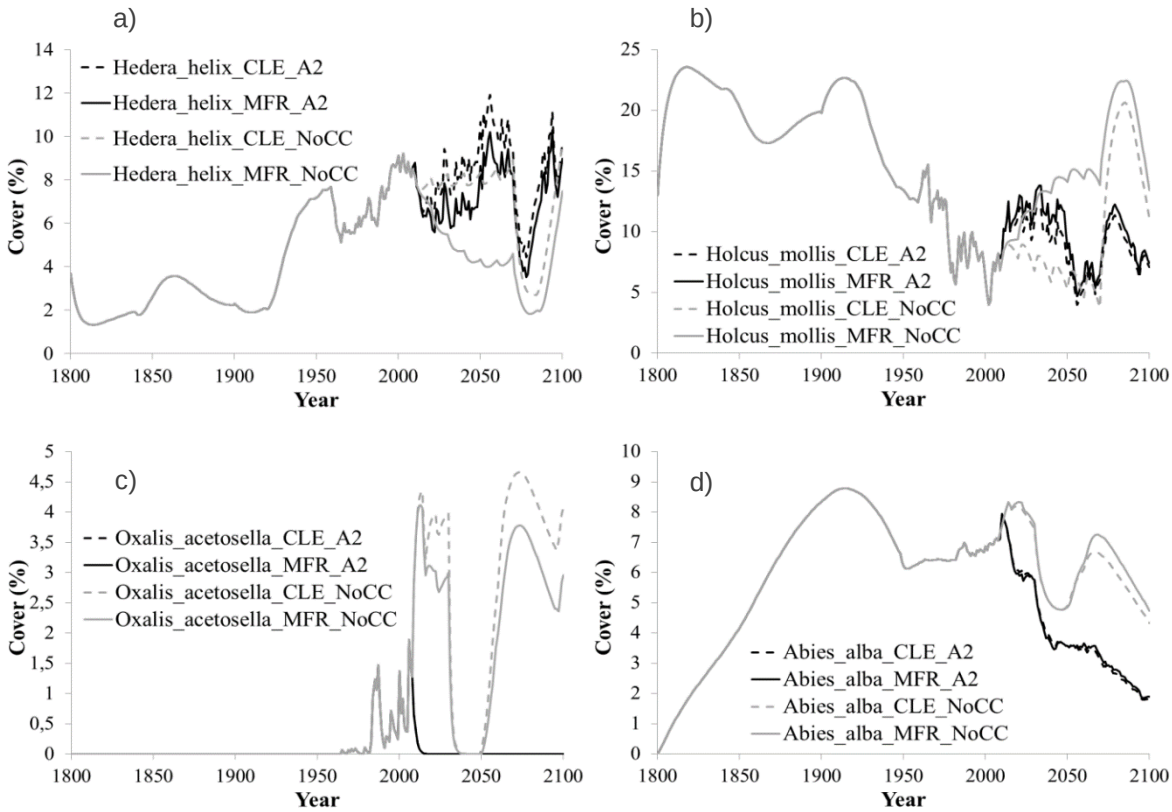


Figure 22 : Évolution du couvert (%) des espèces végétales sous l'influence d'une combinaison de scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique dans les sites CHS41 et SP57

NB : *Pour le site CHS41 : a) Hedera_helix L. et b) Holcus mollis L. ; Pour SP57 : c) Oxalis acetosella L. et d) Abies alba Mill.*

En conclusion, le changement climatique et la modification des dépôts atmosphériques azotés ont une influence importante sur la composition de la solution de sol d'une part, et sur la composition de la communauté végétale, d'autre part. Le climat semble le plus prépondérant du fait de son impact évident sur les cations basiques à partir de 2080, ainsi que sur la réponse des espèces végétales. Les résultats présentés dans les Figures 18 à 22 montrent bien que ces deux facteurs ont un impact important à long terme sur la solution du sol et sur la réponse des espèces végétales. Cependant, même si l'évolution des concentrations en cations basiques et du couvert des principales espèces du sous-étage sont principalement impactées par les changements climatiques, il existe des pics et des variations plus ponctuelles qui sont observés et que l'on peut relier à d'autres facteurs. À court terme (environ 25 ans), en complément du rôle joué par le changement climatique et les dépôts d'azote atmosphérique, au moins un voire plusieurs autres facteurs, comme la gestion forestière, peuv(en)t influencer les concentrations en cations basiques du sol.

Une partie de ces travaux est consignée dans deux rapports CCE (2014, 2016) pour la contribution de la France. Ils ont été présentés lors des 24th, 25th er 26th rencontres du PIC Cartographie et Modélisation (respectivement tenues à Rome en 2014, à Zagreb en 2015 et à Dessau en 2016).

Le couplage avec la table Veg dans sa version actuelle calibrée et validée pour trois sites, permet déjà de se rendre compte de l'intérêt de l'approche en raison de l'impact important du changement climatique et des dépôts atmosphériques azotés sur les espèces forestières françaises. Une fois validée par EcoPlant, la généralisation de l'utilisation de la table Veg couplée au modèle ForSAFE à d'autres sites d'étude permet d'apprécier les changements de biodiversité.

L'étude MODYCRIN a permis de :

- Terminer le couplage engagé entre la table de végétation Veg et le modèle EcoPlant ;
- Extrapoler l'utilisation du modèle couplé à l'ensemble des sites du sous-réseau CATAENAT dans un premier temps ;
- Établir des groupements de placettes dont les caractéristiques biogéochimiques et écologiques peuvent être homogénéisées afin de spatialiser l'utilisation du modèle à de nouveaux sites pour lesquels l'ensemble des données d'entrée nécessaires au modèle ne sont pas disponibles ;
- Utiliser les résultats de ces simulations de changements de biodiversité pour proposer une nouvelle carte des charges critiques empiriques à l'échelle de la France.

3. Conclusion générale

L'étude MODYCRIN a permis d'améliorer la modélisation couplée biogéochimique – écologique du modèle ForSAFE-VEG, ce qui fournit ainsi des éléments concrets permettant une application spatialisée à l'échelle du territoire. Cette étude a aussi été l'occasion de produire une importante valorisation des résultats (Annexe 1) sous la forme d'articles scientifiques, de contributions à un ouvrage et aux appels à données annuels du Programme Concerté International sur la Cartographie et Modélisation (ONU-CEE / GTE/CLRTAP).

L'étude MODYCRIN a essentiellement abouti à :

- Étendre la validation à l'échelle du territoire, à construire des fichiers paramétriques pour les essences ligneuses dominantes et à établir des lois entre les variables d'entrée pour élargir le champ d'application avec un jeu de données réduit ;

- Classer les habitats des placettes RENECOFOR suivant la norme EUNIS, proposer une méthode de classification des placettes en fonction des espèces végétales hébergées, proposer une correspondance entre classification EUNIS, rattachements phytosociologiques et typologie des habitats ;

- Coupler la table VEG/EcoPlant par variable avec sélection des paramètres d'intérêt, calibrer la table et le modèle VEG pour les espèces présentes sur trois sites référence du réseau RENECOFOR, et enrichissement d'espèces dans la table de végétation dont les paramètres sont à renseignés ;

- Appliquer le modèle sur un ensemble de placettes du réseau en tenant compte des scénarios de dépôts et de climat séparément et en combinaison pour estimer des charges critiques azotées à l'horizon 2100, en se basant sur des changements de biodiversité par différents indicateurs.

Les résultats des simulations ont montré que le changement climatique et la modification des dépôts atmosphériques azotés ont une influence importante, d'une part sur la composition de la solution de sol, et d'autre part sur la composition de la communauté végétale. **Le climat semble le plus prépondérant du fait de son impact évident sur les cations basiques à partir de 2080, ainsi que sur la réponse des espèces végétales.**

Même si l'évolution des concentrations en cations basiques et du couvert des principales espèces du sous-étage sont principalement impactées par les changements climatiques, **il existe des pics et des variations plus ponctuelles qui sont observés et que l'on peut relier à d'autres facteurs.** À court terme (environ 25 ans), en complément du rôle joué par le changement climatique et les dépôts d'azote atmosphérique, au moins un voire plusieurs autres facteurs, peu(ven)t influencer les concentrations en cations basiques du sol **comme par exemple la gestion forestière**.

Références bibliographiques

Anderson, Margaret C. 1966. « Stand Structure and Light Penetration. II. A Theoretical Analysis ». *Journal of Applied Ecology* 3 (1) (mai 1): 41-54. doi:10.2307/2401665.

Archaux, F., Boulanger, V., Camaret, S., Corcket, E., Dupouey, J.L., Forgeard, F., Heuzé, P. et al. 2009. *RENECOFOR - Dix ans de suivi de la végétation forestière : avancées méthodologiques et évolution temporelle de la flore (1994/95-2005)*. ONF. Office National des Forêts, Direction Technique et Commerciale Bois, 978 - 2 - 84207 - 339 - 8, 456 p.

Balland, V., Pollacco J.A.P., Arp P.A.. 2008. « Modeling soil hydraulic properties for a wide range of soil conditions ». *Ecological Modelling* 219 (3-4) (décembre 10): 300-316. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.07.009.

Belyazid, S. 2006. « Dynamic modelling of biogeochemical processes in forest ecosystems ». Thesis, Department of Chemical Engineering Lund University. Theses\Belyazid06_th.pdf.

Belyazid, S., Kurz D., Braun S., Sverdrup H., Rihm B., Hettelingh J.P. 2011. « A dynamic modelling approach for estimating critical loads of nitrogen based on plant community changes under a changing climate ». *Environmental Pollution* 159 (3): 789-801. doi:10.1016/j.envpol.2010.11.005.

Bobbink, R., K. Hicks, J. Galloway, T. Spranger, R. Alkemade, M. Ashmore, M. Bustamante, et al. 2010. « Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis ». *Ecological Applications* 20 (1): 30-59. doi:10.1890/08-1140.1.

Bortoluzzi E., Belyazid S., Alard D., Corcket E., Gauquelin T., Gegout J.C., Nihlgard B., Mansat A., Party J.P., Sverdrup H., Probst A. (2010). DYNAMO : MOdélisation DYNAmique des changements de végétation en réponse aux dépôts atmosphériques d'azote sur les écosystèmes forestiers en vue du prochain appel à données pour la détermination des charges critiques. Rapport d'étude, contrat ADEME-CNRS, n° 0962C0029, 50 p + annexes

Butler, S. M., J. M. Melillo, J. E. Johnson, J. Mohan, P. A. Steudler, H. Lux, E. Burrows, et al. 2012. « Soil warming alters nitrogen cycling in a New England forest: implications for ecosystem function and structure ». *Oecologia* 168 (3): 819-828. doi:10.1007/s00442-011-2133-7.

Camaret, S. 2004. *Suivi de la composition floristique des palcettes du réseau (1994/95 - 2000) et élaboration d'un programme d'assurance qualité intensif.* Office National des Forêts, Direction Technique.

Coudun, C., Gégout J.C. 2005. « Ecological behaviour of herbaceous forest species along a pH gradient: a comparison between oceanic and semicontinental regions in northern France ». *Global Ecology and Biogeography* 14: 263-270. doi:http://dx.doi.org/10.1111/j.1466-822X.2005.00144.x.

Van Dobben, H., de Vries W. 2010. « Relation between forest vegetation, atmospheric deposition and site conditions at regional and European scales ». *Environmental Pollution* 158 (3): 921-933. doi:10.1016/j.envpol.2009.09.015.

Galloway, J N, Townsend A.R., Erisman J.W., Bekunda M., Cai Z., Freney J.R., Martinelli L.A., Seitzinger S.P., Sutton M.A. 2008. « Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions ». *Science* 320: 889-892. doi:http://dx.doi.org/10.1126/science.1136674.

Galloway, J. N., Aber J. D., Erisman J. W., Seitzinger S. P., Howarth R. W., Cowling E. B., Cosby B. J.. 2003. « The nitrogen cascade ». *Bioscience* 53 (4): 341-356. doi:10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2.

Gaudio N., Belyazid S., Alard D., Corcket E., Gegout J.C., Rizzetto S., Mansat A., Party J.P., Gauquelin T., Sverdrup H., Probst A. (2014). DYNAMO II : MOdélisation DYNAmique des changements de végétation en réponse aux dépôts atmosphériques azotés et au changement climatique : évaluation de la charge critique pour les écosystèmes forestiers français à échéance 2050. Rapport d'étude, contrat ADEME-CNRS, n° 1162C0027, 57 p + annexes

Gegout, 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. doi:10.1111/j.1654-1103.2005.tb02363.x.

Gégout, J.C. 2001. « Création d'une base de données phytoécologiques pour déterminer l'autécologie des espèces de la flore forestières de France ». *Revue Forestière Française* LIII (3-4): 397-403.

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.

Guntiñas, M.E., Leirós M.C., Trasar-Cepeda C., Gil-Sotres F.. 2012. « Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study ». *European Journal of Soil Biology* 48 (0): 73-80. doi:10.1016/j.ejsobi.2011.07.015.

Jenkinson, Ds, Adams De, Wild A.. 1991. « Model Estimates of Co2 Emissions from Soil in Response to Global Warming ». *Nature* 351 (6324) (mai 23): 304-306. doi:10.1038/351304a0.

Jonard, M., Legout A., Nicolas M., Dambrine E., Nys C., Ulrich E., van der Perre R., Ponette Q. 2012. « Deterioration of Norway spruce vitality despite a sharp decline in acid deposition: a long-term integrated perspective ». *Global Change Biology* 18 (2): 711-725. doi:10.1111/j.1365-2486.2011.02550.x.

Julve, Ph., (1998) ff. Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Version 2015. Programme Catminat. http://www.tela-botanica.org

Kirschbaum, M. 1995. « The Temperature-Dependence of Soil Organic-Matter Decomposition, and the Effect of Global Warming on Soil Organic-C Storage ». *Soil Biology & Biochemistry* 27 (6) (juin): 753-760. doi:10.1016/0038-0717(94)00242-S.

Krupa, S.V. 2003. « Effects of atmospheric ammonia (NH3) on terrestrial vegetation: a review ». *Environmental Pollution* 124: 179-221. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7.

Leguédois, S., Party J.P., Dupouey J.L, Gauquelin T., Gégout J.C., Lecareux C., Badeau V., Probst A. 2011. « La carte de végétation du CNRS à l'ère du numérique ». *Cybergeo : European Journal of Geography* (octobre 27). doi:10.4000/cybergeo.24688. http://cybergeo.revues.org/24688.

Louvel, J., Gaudillat V., Poncet L.. 2013. *EUNIS, European Nature Information System, Système d'information européen sur la nature. Classification des habitats. Traduction française. Habitats terrestres et d'eau douce. MNHN-DIREV-SPN, MEDDE*. 289 vol. Paris.

Nilson, T, Grennfelt P. 1988. *Critical Loads for Sulphur and Nitrogen. — European Environment Agency (EEA)*. Methodology Reference. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/critical-load-exceedance-for-nitrogen/critical-loads-for-sulphur-and-nitrogen.

Nilson, T. 1971. « A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands ». *Agricultural Meteorology* 8: 25-38. doi:10.1016/0002-1571(71)90092-6.

Obeidy C., Bortoluzzi E. Javaux B., J.C. Gegout, J.L. Dupouey, Mansat A., Probst A. (2012). VALERIANE : VulnérAbiLité des Écosystèmes à l'azote d'oRIgine Atmosphérique — Vers un modèle de charges critiques en N intégrant la protection Rapport d'étude, Convention ADEME-CNRS n° 0962c0073, 88p. de la biodiversité végétalE du territoire français.

Party, J.-P. 1999. « Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français: facteurs, mécanismes et tendances. Thesis, Louis Pasteur University, Strasbourg, France. 233 p. » Louis Pasteur university, Strasbourg, France: Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Probst, A., Fritz B., Viville D. 1995. « Midterm Trends in Acid Precipitation, Streamwater Chemistry and Element Budgets in the Strengbach Catchment (vosges Mountains, France) ». *Water Air and Soil Pollution* 79 (1-4) (janvier): 39-59. doi:10.1007/BF01100429.

Probst, A. Leguédois S. 2008. « Critical load, dynamic modelling and impact assessment in Europe. CCE status report ». In: Jean-Paul Hettelingh, Jaap Slootweg, Maximilian Posch (eds), 133-140.

Probst, A., Obeidy, C., Gaudio, N., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Alard, D., Corket, E., Party, J-P., Gauquelin, T., Mansat, A., Nihlgård, B., Leguédois, S. and Sverdrup, H.U. (2015). Evaluation of plant-responses to atmospheric nitrogen deposition in France using integrated soil vegetation models. In W. de Vries, J.-P. Hettelingh & M. Posch (Eds.).

Critical Loads and Dynamic Risk Assessments: Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Springer, Dordrecht, Netherlands: 359-379.

Rameau, J.-C., Mansion D., Dumé G., Timbal J., Lecointe A., Dupont P., Keller R. 1989. *Flore forestière française: Guide écologique illustré, Tome 1, Plaines et collines*. Paris: Institut pour le développement forestier.

Rameau, J.-C., Mansion D., Dumé G., Lecointe A., Timbal J., Dupont P., Keller R. 2008. *Flore forestière française: Guide écologique illustré, Tome 2, Montagnes*. Paris: Institut pour le développement forestier.

Schimel, Ds, Braswell Bh, Holland Ea, Mckeown R., Ojima Ds, Painter Th, Parton Wj, Townsend Ar. 1994. « Climatic, Edaphic, and Biotic Controls Over Storage and Turnover of Carbon in Soils ». *Global Biogeochemical Cycles* 8 (3) (septembre): 279-293. doi:10.1029/94GB00993.

De Schrijver, A, Verheyen K., Mertens J., Staelens J., Wuyts K., Muys B. 2008. « Nitrogen saturation and net ecosystem production ». *Nature* 451 (7180). doi:10.1038/nature06578. Papiers\Magnini07_comments.pdf.

Stevens, C.J., Dise N.B., Mountford J O, Gowing D.J. 2004. « Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands ». *Science* 303: 1876-1879.

Sverdrup, H., McDonnell T.C., Sullivan T. J., Nihlgård B., Belyazid S., Rihm B., Porter E., Bowman W.D., Geiser L. 2012. « Testing the Feasibility of Using the ForSAFE-VEG Model to Map the Critical Load of Nitrogen to Protect Plant Biodiversity in the Rocky Mountains Region, USA ». *Water, Air, & Soil Pollution* 223 (1) (janvier): 371-387. doi:10.1007/s11270-011-0865-y.

Ulrich, E., Lanier M. 1996. *Notice de présentation du Réseau National de suivi à long terme des ecosystèmes Forestiers*. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques.

De Vries, W., G. W. W. Wamelink, H. van Dobben, J. Kros, G. J. Reinds, J. P. Mol-Dukstra, S. M. Smart, et al. 2010. « Use of dynamic soil-vegetation models to assess impacts of nitrogen deposition on plant species composition: an overview ». *Ecological Applications* 20 (1): 60-79. doi:10.1890/08-1019.1.

De Vries, W., Kros H., Reinds G.J., Wamelink W., van Dobben H., Bobbink R., Emmet B., et al. 2007. *Developments in deriving critical limits and modelling critical loads of nitrogen for terrestrial ecosystems in Europe*. Alterra report 1382. http://nora.nerc.ac.uk/1779/.

De Vries, W., Posch M. 2011. « Modelling the impact of nitrogen deposition, climate change and nutrient limitations on tree carbon sequestration in Europe for the period 1900-2050 ». *Environmental Pollution* 159 (10) (octobre): 2289-2299. doi:10.1016/j.envpol.2010.11.023.

Van Vuuren, Detlef P., Edmonds J.A., Kainuma M., Riahi K., Weyant J. 2011. « A special issue on the RCPs ». *Climatic Change* 109 (1-2): 1-4. doi:10.1007/s10584-011-0157-y.

Wallman, P., Svensson M.G.E., Sverdrup H., Belyazid S. 2005. « ForSAFE - An integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments ». *Forest Ecology and Management* 207: 19-36. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.016.

Woodwell, Gm. 1978. « Carbon-Dioxide Question ». *Scientific American* 238 (1): 34-1.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques stationnelles des onze placettes du réseau RENECOFOR-CATAENAT utilisées dans la modélisation couplée biogéochimie – écologie via le modèle ForSAFE-VEG au sein du projet DYNAMO II **8**

Tableau 2 : Coefficients de corrélation des températures moyennes mensuelles sur la placette CHP40. Exemple représentatif de la globalité des coefficients de corrélation obtenus sur les 26 placettes du réseau RENECOFOR communes aux différentes sources de données **12**

Tableau 3 : Coefficients de corrélation des précipitations moyennes annuelles **12**

Tableau 4 : Précipitations moyennes annuelles (en millimètres) des placettes RENECOFOR EPC08 et HET30 ... **12**

Tableau 5 : Coefficients de corrélation des précipitations annuelles sans les placettes HET30 et EPC08 ..... **12**

Tableau 6 : Paramètres utilisés dans la table de végétation VEG (Probst et al., 2015) pour décrire la réponse des espèces aux facteurs du milieu ou leur comportement biologique (azote, pH, calcium, eau du sol, température, luminosité, compétition pour la lumière (capacité d'ombrage), profondeur d'enracinement, palatabilité, longévité, appartenance à des groupes de végétation identifiés) **19**

Tableau 7 : Correspondances entre indices d'abondance / dominance et pourcentages de recouvrement (Camaret, 2004; Archaux et al., 2009) **22**

Figures

Figure 1 : Fonctionnement du modèle ForSAFE-VEG (Gaudio et al., 2014) **6**

Figure 2 : Carte localisant les 102 placettes (•) du réseau RENECOFOR avec les 17 placettes (●) du sous-réseau CATAENAT utilisées pour la modélisation **8**

Figure 3 a et b : Histogramme des températures moyennes mensuelles (°C) **12**

Figure 4 : Représentation en radar des cumuls moyens annuels de précipitations (en mm) pour 24 sites appartenant au réseau RENECOFOR, en fonction de trois sources de données distinctes **13**

Figure 5 : Carte des habitats EUNIS des forêts françaises **16**

Figure 6 : Illustration des différences entre les échelles nationale et locale (sites RENECOFOR) de la classification EUNIS des écosystèmes forestiers **16**

Figure 7 : Distribution des 11 grandes régions écologiques (GRECO) - (source : www.inventaire-forestier.ign.fr, 12/2016) .. **16**

Figure 8 : Réponse des espèces végétales à l'azote, décrite par les paramètres k+ et k- dans la table de végétation. **19**

Figure 9 : Calibration des espèces végétales pour trois sites (CHS41, EPC87, SP57) **21**

Figure 10 : Exemple de calcul du taux de recouvrement total de deux espèces de la strate arborée **22**

Figure 11 : Distribution des couverts (calculés en fonction des couverts observés dans la strate arborée (AH)) et forme des résidus **23**

Figure 12 : Distribution des couverts (calculés en fonction des couverts observés dans la strate Arbustive) et forme des résidus **23**

Figure 13 : Évolution de la réponse de l'espèce *Oxalis acetosella* à la variable pH du sol, en fonction de trois classes d'hydromorphie **26**

Figure 14 : Occurrence et poids des variables pour les espèces considérées dans leur globalité, lorsque les P-value de couvert_arbre et radneb13 sont conjointement significatives **27**

Figure 15 : Nombre d'espèces et tendances sur 10 ans de l'indice de Shannon pour différentes espèces arborées dominantes et habitats EUNIS **29**

Figure 16 : Évolution de la richesse spécifique (%) entre 2010 et 2100 selon trois scenarios de dépôts atmosphériques (MFR, GP, CLE) **30**

Figure 17 : Scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique pour trois sites (Chêne sessile (CHS41), Épicéa (EPC87), Sapin pectiné (SP57)) **32**

Figure 18 : Évolution de la concentration en cations basiques de la solution de sol et du taux de saturation du sol jusqu'à 2100, sous l'effet de quatre scénarios de dépôts atmosphériques (BGK, MFR, GP et CLE avec HIST représentant le scénario historique) **33**

Figure 19 : Évolution de la concentration en cations basiques de la solution de sol du site sous épicéa (EPC 87), sous l'influence des scénarios de dépôt CLE et MFR combinés aux trois scénarios de changement climatique (A2, B1 et no change) **34**

Figure 20 : Évolution dans trois sites (CHS41, EPC87 et SP57) de la similarité de la composition floristique entre un état de référence (scénarios "no climate change" pour le climat, et "BKG - background" pour les dépôts azotés) et les quatre combinaisons possibles des scénarios dépôts MFR et CLE (dépôts) et des scénarios climat « No climate change » et « A2 – high growth » **35**

Figure 21 : Évolution de la biomasse des troncs et de concentration en cations basiques de la solution de sol du site sous épicéa (EPC 87) – étude de l'influence de quatre scénarios de dépôt **38**

Figure 22 : Évolution du couvert (%) des espèces végétales sous l'influence d'une combinaison de scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique dans les sites CHS41 et SP57 ..... **38**

Sigles et acronymes

ACP	Analyse en Composantes Principales (méthode statistique d'analyse multivariée)
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BIOGECO	Laboratoire Biodiversité, Gènes et Communautés (Bordeaux)
CATAENAT	Sous-réseau RENECOFOR, Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Ecosystèmes Naturels Terrestres
CCE	Centre de Coordination pour les Effets (dans le cadre de la LRTAP)
CLE	Scénario de dépôt d'azote atmosphérique envisagé si la législation européenne reste ce qu'elle est actuellement (Current Legislation in Europe)
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
EcoLab	Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (Toulouse)
EcoPlant	Base de données phytoécologiques développée au LERFoB
ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
(For)SAFE	Model dealing with Soil Acidification in Forest Ecosystems
GRECO	Grande Region ECOlogique
HSi	Habitat suitability index
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut National de l'Information géographique et Forestière
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement et des rISques
INP	Institut National Polytechnique
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace (Institut de recherche en sciences de l'environnement)
LERFoB	Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (Nancy)
MFR	Scénario de dépôt d'azote atmosphérique envisagé si l'on réduit drastiquement les émissions azotées (Maximum Feasible Reduction) dans la limite du possible
ONF	Office National des Forêts
PIC	Programme International de Coopération
RENECOFOR	REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers (ONF)
RENECOFLORE	Base de données floristiques du réseau RENECOFOR
SRES	Special Reports on Emission Scenarios (scénarios climatiques)
UMR	Unité Mixte de Recherche
VEG	VEGetation model

Annexe 1 – Valorisations scientifiques de l'étude MODYCRIN

Contributions écrites

- Un chapitre de livre (Probst *et al.*, 2015) intégré dans un livre édité par De Vries et al. :
    - Probst, A., Obeidy, C., Gaudio, N., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Alard, D., Corket, E., Party, J-P., Gauquelin, T., Mansat, A., Nihlgård, B., Leguédois, S. and Sverdrup, H.U. (2015). Evaluation of plant-responses to atmospheric nitrogen deposition in France using integrated soil vegetation models. In W. de Vries, J.-P. Hettelingh & M. Posch (Eds.). *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments: Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems*. Springer, Dordrecht, Netherlands: 359-379.

- Un article a été publié en 2015 sur l'application du modèle ForSAFE (pour trois sites de référence du réseau RENECOFOR) et sur l'impact de différents scénarios de dépôts d'azote atmosphérique et de changement climatique sur la composition chimique de la solution du sol :
    - Gaudio, N., Belyazid, S., Gendre, X., Mansat, A., Nicolas, M., Rizzetto, S., Sverdrup, H., & Probst, A. (2015). Combined Effect of Atmospheric Nitrogen Deposition and Climate Change on Temperate Forest Soil Biogeochemistry: A Modeling Approach. *Ecological Modelling* 306 (juin): 24-34. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.10.002.

- En 2016, un article a été publié suite à la calibration de la table de végétation pour les trois sites de référence. Cette étude portait sur la partie 3 du présent projet pour simuler l'évolution à long et court termes de la composition floristique du sous-bois et de son pourcentage de couvert, en fonction de différents scénarios de dépôts d'azote atmosphérique, de changement climatique, et de gestion forestière :
    - Rizzetto, S., Belyazid, S., Gegout, J.-C., Nicolas, M., Alard, D., Corcket, E., Gaudio, N. et al. 2016. Modelling the impact of climate change and atmospheric N deposition on French forests biodiversity. *Environmental Pollution* 213: 1016-1027.

- Deux articles scientifiques supplémentaires ont été publiés dans des revues internationales à comité de lecture :

Un article, rédigé à la fin de l'année 2016, présente la méthode et la philosophie retenues pour la construction de la table de végétation TabVeg-FR. Cet article détaille le processus de couplage entre la table et la base de données EcoPlant. Les résultats présentés dans cet article ont aussi fait l'objet d'une communication orale au cours du congrès iEMSs qui s'est tenu à Toulouse au mois de juillet 2016.

- "How to couple ecological and geochemical dynamic models to predict forest ecosystem response to global changes at the territory scale ?" soumis à la revue *Environmental Modelling and Software*.

- Rizzetto, S., Gégout , J.-C., Belyazid, S., Kuhn, E., Sverdrup, H. & A. Probst , 2017. How to couple ecological and geochemical dynamic models to predict forest ecosystem response to global changes at the territory scale ? *Environmental Modelling and Software*, soumis.

Le second article concerne l''étude de l'évolution de la biodiversité forestière non plus à l'échelle de l'espèce, mais des groupes fonctionnels. Suite au travail de couplage entre les bases Veg et EcoPlant, il est possible de spatialiser la réponse des espèces végétales aux scénarios de changements globaux pour l'ensemble des placettes du réseau RENECOFOR, à travers les traits biologiques des groupes fonctionnels.

- L'équipe du « point focal national français sur les charges critiques » a contribué à répondre aux appels à données 2015 et 2016 pour le PIC Modélisation et Cartographie et aux rencontres associés :
    - Probst, A., Rizzetto, S., Mansat, A. (2015) - National Focal Centre report: France. In: CCE Status report 2015, Posch M., Slootweg J., Hettelingh J.P. (Eds.)

Contributions orales

Les travaux des premières avancées du projet MODYCRIN ont également été présentés à Zagreb au cours du 25ème Workshop CCE et 31ème réunion de la Task Force du PIC Cartographie et Modélisation :

- Rizzetto, S., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Kuhn, É., Corcket, E., Alard, D., Nicolas, M., Sverdrup, H., Gaudio N., Probst, A. (2015)- Predicting vegetation composition in French forests under two atmospheric deposition scenarios using two modelling approaches. 25th CCE Workshop and 31st Task Force Meeting on assessments of impacts of air pollution, and interactions with the change of climate, biodiversity and ecosystem services, 20 – 23 April 2015, Zagreb, Croatie (Communication orale)

Les résultats de calibration des espèces à partir des données de la base de données EcoPlant ont également été présentés à Dessau (Allemagne) au cours du 26ème Workshop CCE et 32ème réunion de la Task Force du PIC Cartographie et Modélisation :

- Rizzetto, S., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Kuhn, É., Nicolas, M., Haunold, S., Sverdrup, H., Gaudio N., Probst, A. (2016)- Impacts of climate change and atmospheric N deposition on French forest biodiversity: challenges in upscaling from site to territory scale. 26th CCE Workshop and 32nd Task Force Meeting on assessments of impacts of air pollution, and interactions with the change of climate, biodiversity and ecosystem services, 19 – 22 April 2016, Dessau, Allemagne (Communication orale).

Le point focal national a aussi participé à trois congrès internationaux, l'un organisé en 2015 par l'IUFRO (International Union of Forest Research Organizations), le deuxième en 2015 par le groupe de travail sur les pluies acides, et le troisième en 2016 :

- *en juin 2015*, participation au congrès international du groupe de recherche 7.01 « Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems » à Nice :

- Rizzetto, S., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Nicolas, M., Alard, D., Corcket, E., Gaudio, N., Sverdrup, H., Probst, A. (2015). Modelling the impact of climate change and atmospheric N deposition on French forests biodiversity. 27th International Biennial Conference of the IUFRO Research Group 7.01 "Impacts of Air Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems", 01 – 05 juin 2015, Nice, France. (Communication orale).

- *en octobre 2015*, participation à la 9ème conférence internationale sur les dépôts acides : « 9th International Conference on Acid Deposition » à Rochester, NY, USA :

- Rizzetto, S., Belyazid, S., Gégout, J.-C., Nicolas, M., Alard, D., Corcket, E., Gaudio, N., Sverdrup, H., Probst, A. (2015). Modelling soil and vegetation response to atmospheric nitrogen deposition and climate change in French forests. 9th International Conference on Acid Deposition, Acid Rain 2015, 19 – 23 Octobre 2015, Rochester, NY, Etats-Unis (communication orale).

- *en juillet 2016*, participation au congrès international sur la modélisation environnementale :

- Rizzetto, S., Gégout, J.-C., Belyazid, S., Kuhn, E., Sverdrup, H., Probst, A. (2016). How to couple ecological database to geochemical dynamic model to predict the impact of atmospheric nitrogen deposition and climate change on French forest ecosystems at the national scale? 8th International Congress on Environmental Modelling and Software, 10 – 14 Juillet 2016, Toulouse, France.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr