

Bilan technique de l'année 2014



Mars 2015



Office National des Forêts

Ce document est à citer sous la forme suivante :
NICOLAS M., 2015 : RENECOFOR – Bilan technique de l'année 2014. Éditeur : Office national des forêts,
Direction forêts et risques naturels, 35 p.



RENECOFOR

(Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers)

Bilan technique de l'année 2014

Auteur : Manuel NICOLAS

Programme soutenu financièrement par :

- le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
- le ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
- l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- l'Office national des forêts

Mars 2015

Office national des forêts - Département recherche, développement et innovation
Boulevard de Constance 77300 FONTAINEBLEAU
Tel : +33 (0) 1.60.74.92.28 / Mél : manuel.nicolas@onf.fr

Avant-propos

Le réseau RENECOFOR renoue avec l'édition de bilans annuels dans sa série jaune. Le précédent avait été rédigé il y a dix ans, à propos des activités de l'année 2004. Entre temps, le réseau a fait l'objet de deux évaluations scientifiques en 2006-2007 puis en 2013, qui ont apporté des analyses approfondies et des points de vue extérieurs, prenant du recul sur 15 ans puis sur plus de 20 ans de suivi des écosystèmes forestiers.

La reprise de la rédaction de bilans annuels coïncide avec la mise en place du Comité de pilotage scientifique du réseau RENECOFOR, avec pour objectifs de partager la discussion de ses activités avec l'ensemble de ses bailleurs de fonds réunis et de solliciter le conseil régulier d'un panel d'experts scientifiques.

Ce document a fait l'objet d'une première version présentée et discutée à l'occasion de la première réunion du Comité de pilotage scientifique le 16 janvier 2015. Des amendements ont été apportés en réponse aux remarques et suggestions du Comité.

Sommaire

1.	Rappel des missions du réseau RENECOFOR	1
1.1.	Historique et objectifs du réseau RENECOFOR	1
1.1.1.	Objectifs initiaux	1
1.1.2.	Objectifs redéfinis en 2007	3
1.2.	Organisation du réseau RENECOFOR	3
1.3.	Financement	4
1.4.	Evaluation scientifique	4
2.	Activités de l'année 2014	5
2.1.	Réalisation des activités périodiques	5
2.1.1.	Campagne quinquennale d'inventaires dendrométriques	7
2.1.2.	Campagne quinquennale d'inventaires floristiques	8
2.2.	Fonctionnement du réseau	8
2.2.1.	Continuité de gestion de la base de données	8
2.2.2.	Renouvellement du marché de fonctionnement et de maintenance des stations météorologiques	9
2.2.3.	Mise en place du Comité de pilotage scientifique	9
2.3.	Communication	10
2.3.1.	Réunion d'information annuelle du réseau	10
2.3.2.	Communications orales extérieures	10
2.3.3.	Mise à jour et amélioration du site Internet du réseau	11
2.3.4.	Contribution à des actions de communication locales destinées au grand public	11
3.	Travaux de valorisation des données à l'initiative du réseau	12
3.1.	Variations spatio-temporelles des dépôts atmosphériques	12
3.1.1.	Tendances temporelles mesurées sur les sites CATAENAT de 1993 à 2013	12
3.1.2.	Spatialisation dynamique des dépôts atmosphériques hors couvert	17
3.2.	Evolution temporelle des propriétés physicochimiques des sols	19
3.3.	Variations des cortèges de champignons supérieurs	24
3.4.	Comparaison de l'évolution mesurée des propriétés des sols à celle bioindiquée par la flore	28
4.	Contribution aux travaux de valorisation d'initiative externe	29
5.	Conclusions	31
6.	Bibliographie	32
6.1.	Publications émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données en 2014	32
6.2.	Communications orales en 2014	34
6.3.	Autres références citées	34

1. Rappel des missions du réseau RENECOFOR

1.1. Historique et objectifs du réseau RENECOFOR

Le réseau RENECOFOR (réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers) a été créé en 1992 par l'Office national des forêts (ONF) afin de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts françaises (Barthod, 1994). Il répond à l'engagement international de la France à la convention de Genève sur les pollutions transfrontières à longue distance, à la suite de l'épisode des « pluies acides » et des questionnements apparus en Europe sur leurs conséquences pour les forêts. Il constitue la partie française d'un ensemble européen d'environ 800 placettes permanentes installées dans une quarantaine de pays – niveau II du Programme international concerté sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (ICP Forests). Il répond aux exigences de la résolution S1 de la Conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe, qui s'est tenue en 1990 à Strasbourg et aux règlements communautaires publiés depuis (les derniers en date : « Forest Focus » et LIFE+). Des 3 réseaux français de surveillance, qui ont été établis de manière cohérente, RENECOFOR est celui qui collecte le plus grand nombre d'observations. Sa conception a bénéficié des acquis du programme de recherche DEFORPA (déperissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique) mené de 1984 à 1991 (Landmann et Bonneau, 1995).

1.1.1. Objectifs initiaux

L'objectif principal du réseau RENECOFOR est de détecter d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers et de caractériser les raisons de ces changements. Les objectifs officiels suivant la résolution n° 1 de Strasbourg sont :

- Chercher à établir des corrélations entre la variation des facteurs environnementaux et la réaction des écosystèmes à l'aide de 102 peuplements étudiés intensivement sur l'ensemble du territoire français métropolitain ;
- Approfondir les connaissances sur l'évolution des écosystèmes français durant 30 ans (tendances, variations, cycle nutritif) ;
- Aider à déterminer le niveau des charges critiques en polluants susceptibles de déstabiliser les forêts ;
- Aider à mieux interpréter les observations du réseau systématique européen de niveau I (16 x 16 km).

Un cinquième objectif s'est ajouté avec le temps car il découle de l'expérience avec les utilisateurs :

- Augmenter de manière importante les connaissances scientifiques de base sur les forêts et leur hétérogénéité.

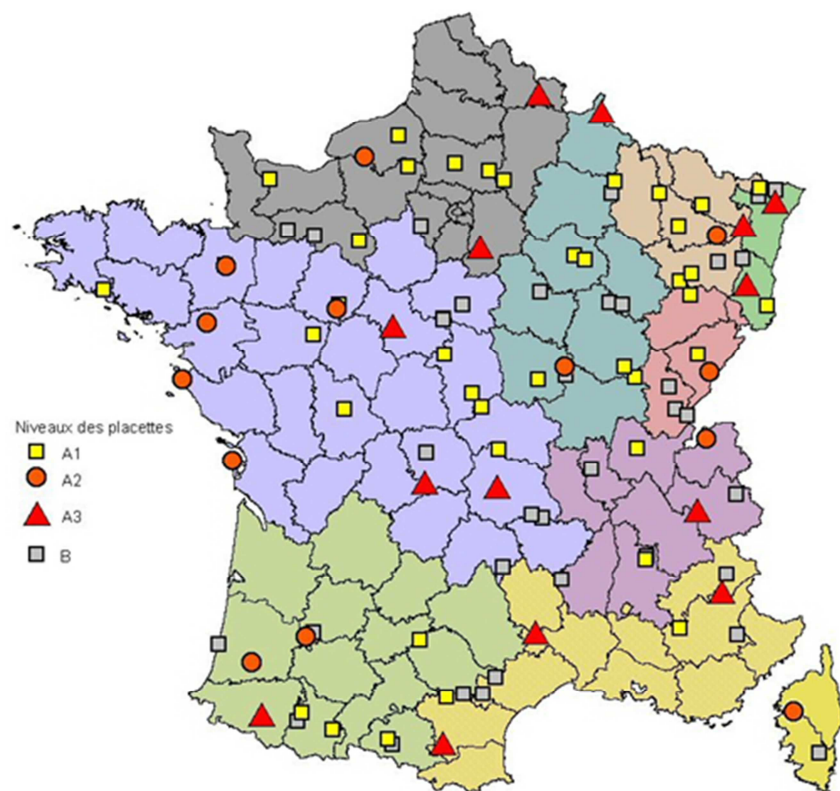


Figure 1 : Emplacement des 102 placettes du réseau RENECOFOR au sein du découpage territorial de l'ONF. Le niveau des placettes (4 modalités) correspond à l'intensité de leur suivi définie depuis la métamorphose du réseau en 2008. Le sous-réseau CATAENAT correspond aux sites suivis le plus intensivement, c'est-à-dire à l'ensemble des 13 sites de niveau A2 et des 14 sites de niveau A3.

1.1.2. Objectifs redéfinis en 2007

A la suite de la 1ère évaluation du réseau en 2006 (Comité spécial d'évaluation) et en 2007 par le Comité scientifique de l'ONF, de « nouveaux » objectifs ont été définis (Biro et Landmann, 2008) :

- Suivre avec rigueur, de façon continue et à long terme, l'évolution d'écosystèmes forestiers, principalement à vocation de production, sous l'effet de facteurs externes, en particulier le changement climatique (fonction d'observatoire) ;
- Contribuer à la détermination et à la compréhension des relations de causes à effets entre les facteurs externes et les évolutions constatées, et utiliser cette connaissance pour la prévision et l'établissement de scénarios prédictifs grâce à la modélisation ;
- S'inscrire dans le continuum des dispositifs de mesure et d'observation des écosystèmes forestiers permettant les extrapolations et généralisations nécessaires, en lien avec d'autres dispositifs ou expérimentations pertinents et en développant le partenariat ;
- Éclairer le gestionnaire sur ses choix de gestion durable dans un contexte changeant et incertain.

Les phénomènes à mesurer et à observer sont :

- 1) La réaction des écosystèmes forestiers aux évolutions du climat,
- 2) Le cycle des éléments nutritifs en forêt, notamment en relation avec les dépôts atmosphériques,
- 3) L'évolution de la biodiversité.

1.2. Organisation du réseau RENECOFOR

Le réseau est constitué de 102 placettes permanentes (Figure 1), situées entre une altitude de 5 à 1850 mètres et réparties de manière à représenter les principaux types de forêt de production par essence dominante (Chênes, Douglas, Epicéa, Hêtre, Mélèze, Pins et Sapin). Chaque placette a une surface de 2 hectares avec une partie centrale clôturée d'un demi-hectare. Le sous-réseau CATAENAT (charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres) désigne un ensemble de 27 placettes parmi les 102 placettes du réseau RENECOFOR (Figure 1), pour lesquelles dès 1992 des activités intensives de suivi de la pollution atmosphérique sont effectuées :

- sur 13 placettes (niveau A2) le suivi des dépôts atmosphériques hors couvert (jusqu'à fin 2007, on y suivait également la météorologie et les dépôts sous couvert).
- sur 14 placettes (niveau A3) le suivi de la météorologie, des dépôts atmosphériques hors et sous couvert, des solutions du sol, de la concentration en ozone dans l'air et des symptômes d'ozone sur la végétation.

Le réseau est géré depuis sa création par l'ONF. Il s'inscrit dans les objectifs de recherche et développement de l'actuel contrat Etat-ONF 2012-2016. Il est coordonné au sein du Département recherche, développement et innovation (RDI) de l'ONF et met à contribution environ 250 personnels techniques pour le suivi et la maintenance locale des sites. Il s'appuie

également sur des partenaires extérieurs (laboratoires d'analyse, universités, INRA, Irstea...) pour une partie des mesures réalisées (météorologie, analyse des dépôts atmosphériques et de la qualité de l'air, analyse des sols, analyses végétales, inventaires floristiques et autres suivis de biodiversité).

1.3. Financement

Le réseau RENECOFOR a été cofinancé à hauteur de 45 % par l'Union Européenne jusqu'en 2006, qui est la dernière année du règlement Forest Focus. Depuis 2007 jusqu'à ce jour, le financement du réseau est entièrement assuré par des bailleurs de fonds nationaux : l'Office national des forêts (ONF), le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF), le ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

1.4. Evaluation scientifique

Le réseau RENECOFOR a fait l'objet de deux évaluations scientifiques :

- La première évaluation a été organisée en 2006-2007 à son initiative et a permis de dresser le bilan de ses 15 premières années d'activité. Elle a servi de support à la redéfinition de ses moyens et de ses missions à compter de 2008 (métamorphose), à la suite de la fin du co-financement du monitoring forestier par l'Union Européenne.
- La deuxième évaluation s'est tenue en 2013, suivant une lettre de mission émanant des bailleurs de fonds nationaux du réseau et en s'appuyant sur un comité composé d'experts externes et indépendants.

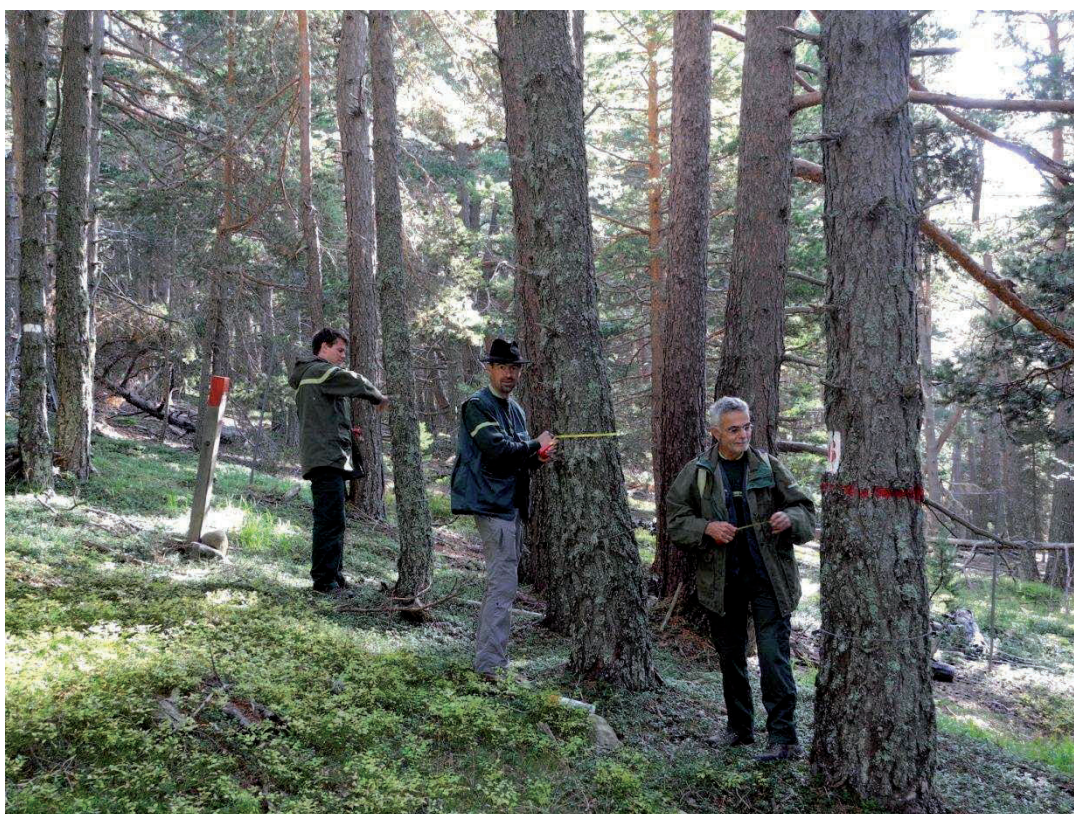
2. Activités de l'année 2014

2.1. Réalisation des activités périodiques

Dans l'attente d'une nouvelle négociation entre les bailleurs de fonds du réseau RENECOFOR (ONF, MAAF, MEDDE, ADEME) afin de redéfinir ses missions et moyens pour les années à venir, le programme des activités suit le calendrier défini lors de la métamorphose de 2008 (Tableau 1). L'ensemble des activités périodiques prévu en 2014 a été réalisé. La période 2014-2015 est marquée en particulier par l'organisation des campagnes quinquennales d'inventaires dendrométriques et d'inventaires floristiques concernant l'ensemble des 102 sites du réseau. Ces deux campagnes permettront d'atteindre 20 ans de recul dans leurs domaines respectifs. Elles sont d'autant plus importantes que les précédentes sur la période 2009-2010 avaient été réduites à un sous-ensemble de sites en conséquence de l'arrêt du co-financement de l'Union Européenne en 2007.

Sujet/année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Observations
Actions de fond									
Evaluation des données du réseau et publications									Action en continu
Développement du site Web du réseau									Action en continu
Développement de l'accès à la base de données via Internet									Essai non concluant avec IIFN
Réunions d'information plénières									
Réunions d'information CATAENAT									
Collectes de données sur tous les sites (ensemble des niveaux A1+A2+A3+B)									
Echantillonnage des sols (deuxième campagne)		←			→				Campagne pluriannuelle
Observations sanitaires									
Inventaire des placettes passant en éclaircie									
Observations phénologiques									
Maintenance des placettes									Action en continu
Echantillonnage foliaire		65 sites A		65 sites A			14 sites A3		
Inventaire dendrométrique quinquennal		65 sites A en diamètre							
Inventaire floristique quinquennal			27 sites A2+A3						2014 : intercalibration réalisée
Collecte de données sur les 27 sites de niveau A2+A3									
Mesures des dépôts atmosphériques HORS couvert uniquement									
Collecte de données sur les 14 sites de niveau A3									
Mesures des dépôts atmosphériques HORS et SOUS couvert forestier									
Echantillonnage des solutions de sol									
Collectes des chutes de litières									
Mesures météorologiques (sauf CPS 77)									
Mesures des concentrations et symptômes d'ozone		10 sites (FutMon)							

Tableau 1 : Programmation des activités périodiques du réseau RENECOFOR suivant le calendrier défini lors de sa métamorphose en 2008. Les cellules en gris clair indiquent les campagnes annuelles prévues sur un nombre restreint de sites.



Illustrations de la campagne d'inventaires dendrométriques 2014-2015

En haut : mise en place d'un placeau d'inventaire circulaire en application du nouveau protocole d'échantillonnage statistique dans un peuplement majoritairement en régénération dense depuis la tempête de 1999 sur le site HET 21 (photographie par Sébastien Macé)

En bas : mesures de circonférence dans le cadre d'un inventaire en plein d'un peuplement adulte sur le site PS 04 (photographie par Luc Croisé)

2.1.1. Campagne quinquennale d'inventaires dendrométriques

Le suivi dendrométrique concerne le peuplement délimité par les quatre angles de la zone centrale de 0,5 ha de chaque site. Il a pour but d'évaluer l'accroissement à l'échelle du peuplement mais aussi à l'échelle de l'arbre, chaque arbre de la zone centrale supérieur à 15 cm de circonférence à 1,30 m étant numéroté par une plaquette métallique depuis 2000. Il comprend des mesures de circonférence de l'ensemble des tiges numérotées et des mesures de hauteur totale d'un sous-échantillon d'arbres.

La dernière campagne menée en 2009-2010 ne concernait que les 65 sites de niveaux A1, A2 et A3, et ne comprenait que des mesures de circonférence. Les dernières mesures remontent donc à 2004 pour les 37 sites de niveau B et pour l'ensemble des mesures de hauteur. En outre, les peuplements en régénération depuis les tempêtes de 1999 et 2009 n'ont pas fait l'objet de suivi dendrométrique par manque d'un protocole adapté. A l'occasion de la campagne quinquennale 2014-2015, le protocole a été révisé et complété pour permettre d'inventorier l'ensemble des 102 sites, y compris ceux dont le peuplement est en grande partie ou totalement en régénération post-tempête (Cecchini *et al.*, 2014). Cette évolution répond aux recommandations de la 2^{ème} évaluation scientifiques dans le sens de l'intégration du renouvellement des peuplements dans les protocoles de suivi (Augusto *et al.*, 2013). La densité des jeunes tiges pouvant être très importante, l'objectif est alors d'appréhender la croissance de la régénération à l'échelle du peuplement, moyennant le cas échéant un échantillonnage statistique de la zone centrale de 0,5 ha et sans étiquetage systématique des tiges dont la circonférence à 1,3 m est inférieure à 15 cm. Dans les cas de peuplements fortement ouverts mais où subsiste encore une partie du peuplement initial de la placette, le protocole est prévu pour que les mesures sur la régénération puissent être menées en complément du suivi dendrométrique systématique des arbres numérotés préexistants. Des fichiers de saisie de terrain ont été développés en conséquence pour chaque site, offrant des contrôles automatiques par rapport aux mesures du dernier inventaire précédent.

La nouvelle version du protocole a été soumise à la relecture des correspondants territoriaux du réseau RENECOFOR dans les pôles R&D, en charge de mener les inventaires sur le terrain. Une formation a également été organisée à leur intention en septembre 2014 avec un exercice pratique d'intercomparaison de 4 équipes sur un même site RENECOFOR dans le Puy de Dôme (PS 63). Les résultats montrent globalement une bonne cohérence entre équipes d'opérateurs, les principales dérives étant liées à des erreurs de saisie manifestes, à l'omission d'un faible nombre de petites tiges, ou encore à des différences d'appréciation de l'étagement des arbres comptant pour le tirage du sous-échantillon à mesurer en hauteur. Ils permettent aussi de quantifier les incertitudes pesant sur les mesures de circonférence et de hauteur totale.

Les inventaires dendrométriques des sites ont débuté en octobre 2014 et s'étendront jusqu'en hiver 2015, pendant la période de dormance des arbres. Les agents locaux responsables des sites sont systématiquement sollicités en appui des correspondants territoriaux du réseau. Les 4 personnels techniques de l'équipe de coordination du réseau à Fontainebleau sont également mobilisés pour épauler voire remplacer les correspondants territoriaux sur tous les sites où

cela est nécessaire. Plus de la moitié des sites ont ainsi pu être inventoriés en 2014, ce qui permet d'envisager la réalisation complète de la campagne avant le printemps 2015.

2.1.2. Campagne quinquennale d'inventaires floristiques

La composition floristique est suivie sur les 102 sites du réseau RENECOFOR depuis 1995 suivant une périodicité quinquennale, avec l'appui d'experts botanistes majoritairement externes à l'ONF (universités, INRA, Irstea, conservatoires botaniques, bureaux d'études). Cependant, à compter de 2008 et en conséquence de l'arrêt du cofinancement de l'Union Européenne, il a été prévu de passer à une périodicité décennale pour la majorité des sites, la périodicité quinquennale n'étant alors maintenue que pour les 27 sites du sous-réseau CATAENAT (sites de niveaux A2 et A3). En pratique, en 2010 la réalisation d'un inventaire floristique restreint à 27 sites a été jugée peu pertinente par le groupe d'experts botanistes au regard des perspectives de valorisation. Avec la contribution volontaire de plusieurs d'entre eux, cet inventaire a pu être étendu à une cinquantaine de sites.

En 2015, la prochaine campagne d'inventaires floristiques concernera de nouveau l'ensemble des 102 sites du réseau RENECOFOR. Son organisation a commencé dès la fin de l'année 2013 afin de compléter le groupe d'experts et de pouvoir réaliser une intercalibration en amont de la campagne, en 2014. Les nouvelles équipes d'experts intégrant le groupe sont principalement universitaires (Universités de Picardie, de Franche Comté, de Rouen, Agrocampus Angers), intéressées non seulement à la collecte mais également à la valorisation des données. Toutes ont pu participer à l'intercalibration organisée à Compiègne du 23 au 26 juin 2014. L'organisation d'un exercice d'intercalibration fait partie des mesures d'assurance qualité mises en œuvre à chaque campagne floristique pour assurer une application homogène du protocole et quantifier les incertitudes liées aux observateurs. C'est aussi l'occasion de tester l'effet de facteurs méthodologiques sur la qualité des relevés : en 2014, il s'est agi de comparer la flore herbacée relevée sur des placeaux adjacents de 100 m² en forme de bandes de 2 m de large (type RENECOFOR) et en forme de carré (type le plus courant au plan international mais ne permettant pas d'inventaire sans piétinement). La même comparaison méthodologique avait été réalisée lors de la précédente intercalibration à Orléans en 2010 : l'agrégation des résultats des deux exercices pourrait offrir suffisamment de répétitions pour pouvoir envisager une publication.

2.2. Fonctionnement du réseau

2.2.1. Continuité de gestion de la base de données

L'un des principaux enjeux de fonctionnement en 2014 a été l'organisation de la passation de la gestion de la base de données entre Marc Lanier, son concepteur en retraite depuis le 23 décembre 2013, et Sébastien Macé, recruté en CDD de 3 ans le 25 novembre 2013. En effet, la base de données est non seulement un outil de sauvegarde mais aussi un outil de gestion courante des informations nécessaire au pilotage des dispositifs de collecte. La continuité de sa gestion est donc un enjeu central dans le fonctionnement du réseau et un renouvellement de poste 6 mois avant le départ de Marc Lanier avait été envisagé pour permettre une passation

progressive à son successeur. Malheureusement, le poste n'a pu être renouvelé qu'un mois avant son départ. Néanmoins, Marc Lanier a accepté de se constituer auto-entrepreneur pour finaliser le travail de passation en 2014 dans le cadre d'une prestation externe. L'équipe de coordination s'est également adaptée pour délester momentanément Sébastien Macé d'autres missions de son poste et lui permettre de consacrer le temps nécessaire à l'apprentissage des protocoles, du langage informatique, et à la prise en main de la base de données. Au final, la passation a été efficace et Sébastien Macé a repris l'ensemble des missions de son prédécesseur, dont la gestion et le développement de la base de données du réseau.

2.2.2. Renouvellement du marché de fonctionnement et de maintenance des stations météorologiques

Le suivi météorologique réalisé initialement sur 27 sites a été restreint à partir de 2008 à 13 sites de niveau A3. Le suivi des installations du réseau, la maintenance et l'acquisition des données font l'objet d'une sous-traitance dans le cadre d'un marché renouvelé tous les 5 ans. En 2014, un nouvel appel d'offre ouvert a été lancé par l'ONF pour la poursuite de la gestion des matériels actuellement en place (stations renouvelées en 2008). L'offre de la société Pulsonic, prestataire historique du marché, a été sélectionnée à nouveau pour 5 années à compter du 11 août 2014. Les mesures sont réalisées avec un pas de temps horaire et sont validées par Pulsonic avant d'être réceptionnées à la fin de chaque mois dans la base de données RENECOFOR. Outre la poursuite de la maintenance et du fonctionnement des stations météorologiques du réseau, le nouveau marché comprend :

- la modernisation de la station météorologique du site SP 57, avec notamment le passage de sondes analogues vers des sondes numériques tout en maintenant un système de transmission des données par carte mémoire (à défaut de couverture de télécommunication sur ce site, aucune solution technique n'était disponible lors de la modernisation de l'ensemble des stations dans le marché précédent),
- le renouvellement des composants vieillissants et menaçant de panne sur chaque station,
- la modernisation des systèmes de transmission automatique de données vers le protocole GPRS sur tous les sites où cela est possible, en réponse à l'évolution des couvertures de télécommunication, et la prise en charge des abonnements correspondants,
- la constitution d'un nouveau stock de matériel de rechange afin de pouvoir garantir la maintenance courante du réseau sur une période de 5 ans.

2.2.3. Mise en place du Comité de pilotage scientifique

Faisant suite aux recommandations de la 2^{ème} évaluation scientifique rendue le 4 novembre 2013, un Comité de pilotage scientifique a été défini pour le suivi annuel des activités du réseau RENECOFOR. Ce comité comprend à la fois des représentants des bailleurs de fonds et des experts scientifiques, suivant un document cadre discuté en 2014 en réunion du Comité scientifique de l'ONF et avec les bailleurs de fonds. Sa première réunion est prévue le 16 janvier 2015.

2.3. Communication

2.3.1. Réunion d'information annuelle du réseau

Chaque année, le réseau RENECOFOR organise une réunion d'information à destination des agents de l'ONF responsables locaux de sites et correspondants territoriaux. Cette réunion a pour but de restituer les résultats récents issus des prélèvements et observations réalisés par les agents et de discuter des questions de fonctionnement. Elle est également l'occasion de distribuer les matériels spécifiques acquis au plan national suivant les besoins de maintenance des différents sites.

En 2014, comme tous les deux ans, la réunion d'information a été restreinte aux agents des 27 sites du sous-réseau CATAENAT et a été organisée à Quillan (Aude). Outre les présentations préparées par l'équipe de coordination, deux intervenants extérieurs ont été invités :

- Yannick Agnan (ENSA Toulouse), au sujet de l'utilisation des lichens comme témoins des pollutions atmosphériques actuelles et passées (Agnan, 2013),
- Isabelle Chuine (CNRS Montpellier) au sujet de l'impact du changement climatique sur les forêts et de l'Observatoire des saisons.



Illustration : groupe de participants de la réunion d'information du réseau RENECOFOR en 2014 à Quillan (photographie par Valérie Trevedy-Bénard)

2.3.2. Communications orales extérieures

L'équipe de coordination réalise également des communications orales à destination de publics extérieurs au réseau, soit pour présenter le dispositif par exemple dans le cadre de projets de recherche, soit pour présenter des résultats particuliers (cf chapitre 6.2). Elle profite

notamment de sa représentation aux réunions du programme ICP Forests pour partager les résultats de ses analyses récentes avec ses homologues européennes.

2.3.3. *Mise à jour et amélioration du site Internet du réseau*

Le développement de la visibilité du réseau sur Internet est un levier identifié lors de sa 2^{ème} évaluation scientifique pour accroître sa valorisation scientifique (Augusto *et al.*, 2013). Deux actions d'amélioration du site Internet du réseau ont été lancées en conséquence en 2014.

- D'une part, la traduction en anglais du site Internet du réseau a été initiée, visant la communauté scientifique internationale. Bien que le site Internet de l'ONF soit présenté uniquement en français, sa conception est déjà prévue pour permettre une navigation bilingue. Il s'agit donc de traduire le contenu des pages relatives au réseau RENECOFOR et de l'insérer dans la structure du site. Le travail de traduction est sous-traité à une personne anglophone, enseignant régulièrement à un public forestier et habituée au vocabulaire du domaine.
- D'autre part, un projet a été initié pour le développement en 2015 d'un portail Internet de consultation de la documentation relative au réseau RENECOFOR (plus de 600 références recensées à ce jour). En 2008, le recensement de cette documentation avait donné lieu à l'édition à la diffusion d'un DVD intégrant un outil de recherche. Le développement d'un portail Internet devrait permettre une diffusion plus large et régulièrement mise à jour. Pour ce faire, le recensement de la documentation relative au réseau sera intégré à la base documentaire de l'ONF, développée par la société Aidel. Celle-ci sera chargée du développement et de la maintenance du portail Internet de consultation.

2.3.4. *Contribution à des actions de communication locales destinées au grand public*

L'équipe de coordination apporte son soutien à des actions de communications locales à destination du grand public, souvent à l'initiative d'agents responsables de sites :

- Participation à la réalisation d'un panneau extérieur au sujet de l'évolution des dépôts atmosphériques dans le cadre d'un sentier de découverte du massif de l'Aigoual (Gard) ;
- Support de communication pour le montage d'une exposition sur le thème de l' « eau dans tous ses états » à Bourganeuf (Creuse) les 8 et 9 novembre 2014 ;
- Rédaction de fiches de synthèse par site en support aux visites organisées par les agents locaux (Cecchini, 2014a ; 2014b).

Le réseau répond par ailleurs à des sollicitations de la presse. A l'occasion des travaux de débardage à cheval qui ont eu lieu en 2014 sur le site EPC 39a en forêt communale de La-Chaux-du-Dombief, trois journaux de la presse régionale ont notamment réalisé un reportage.

3. Travaux de valorisation des données à l'initiative du réseau

3.1. Variations spatio-temporelles des dépôts atmosphériques

Grâce à une réduction volontariste des émissions de soufre en Europe, notamment, la menace que constituent les dépôts atmosphériques (soufrés et azotés) vis-à-vis de l'acidification des sols forestiers a nettement diminué depuis la prise de conscience du phénomène des « pluies acides » dans les années 80. Leurs effets restent néanmoins importants sur la productivité des forêts et leur capacité à atténuer le changement climatique par la séquestration de CO₂ atmosphérique. Deux types de retombées ont été suivis depuis fin 1992 sur les 27 sites du sous-réseau CATAENAT :

- les dépôts totaux hors couvert représentent une part *a minima* de la pollution atmosphérique de fond (retombées à longue distance en dehors du voisinage de fortes sources d'émissions) que subissent les écosystèmes forestiers ;
- les dépôts sous couvert (pluviolessivats) comprennent en plus les aérosols captés par les houppiers des arbres mais ils intègrent aussi, pour certains éléments, la résultante de flux d'absorption et de récrétion par la canopée.

Ces suivis permettent de mettre en évidence des tendances significatives des retombées atmosphériques hors et sous couvert forestier sur une période de 20 ans. En complément, la spatialisation géostatistique répétée des dépôts hors couvert permet de distinguer les zones géographiques les plus sujettes aux pollutions atmosphériques et à leurs évolutions temporelles. Les résultats présentés contribueront au renseignement de l'édition 2015 des indicateurs de gestion durable des forêts.

3.1.1. Tendances temporelles mesurées sur les sites CATAENAT de 1993 à 2013

Le suivi des dépôts sous couvert étant restreint aux 14 sites de niveau A3 depuis 2008, l'évolution temporelle des retombées atmosphériques de 1993 à 2013 est représentée à l'aide de deux Figures (2a et 2b). La Figure 2a représente les dépôts hors couvert pour l'ensemble des 27 sites du sous-réseau CATAENAT. La Figure 2b représente les dépôts hors couvert et sous couvert pour les 14 sites de niveau A3. Dans chaque cas, les données des différents sites sont agrégées sous la forme de concentrations moyennes pondérées par la pluviométrie, indicateur synthétique proposé par Ulrich (2000). Cet indicateur permet d'illustrer l'évolution de la qualité chimique des dépôts indépendamment de la pluviométrie, tout en donnant un poids relatif plus important aux sites soumis aux plus fortes précipitations. Son évolution temporelle commentée ci-dessous est par ailleurs cohérente avec les tendances calculées à partir des données non agrégées de dépôts et de concentrations.

L'évolution la plus remarquable depuis 20 ans demeure la chute des concentrations en soufre (S-SO₄), de l'ordre de -60 % dans les dépôts hors couvert et de -75 % sous couvert. Les flux d'absorption et de récrétion de soufre par la canopée étant généralement négligeables, les dépôts sous couvert représentent dans ce cas l'ensemble des retombées atmosphériques (dépôts humides et aérosols) subis par l'écosystème. Leur chute se poursuit de manière quasi linéaire jusqu'en 2013.

De manière plus récente, l'azote minéral présente une diminution moindre mais également significative depuis les 6 dernières années de mesures. Son amplitude est de l'ordre de -30 %, aussi bien hors couvert que sous couvert. Cette diminution des concentrations en azote minéral est principalement imputable aux retombées d'ammonium, les concentrations en nitrates diminuant de manière moins nette. Cette tendance à la diminution observée au plan national, moins rapide pour l'azote que pour le soufre, est concordante avec celle observée à l'échelle européenne (Waldner *et al.*, 2014).

En cohérence avec la chute des concentrations en sulfates, le pH présente une tendance globalement à la hausse, aussi bien hors couvert que sous couvert. Une baisse du pH est observable les 2 dernières années mais pourrait être liée à des difficultés de mesure constatées pour certaines périodes de collecte : plus le pH tend vers la neutralité (5,6 pour les eaux de pluie), plus l'incertitude augmente dans les mesures.

Concernant les apports de cations nutritifs, les tendances sont moins évidentes.

- Pour le calcium, les concentrations ne présentent pas de tendance évidente dans les dépôts hors couvert mais une diminution significative dans les dépôts sous couvert. Cela pourrait être dû soit à une diminution des dépôts secs (aérosols), soit à une diminution du flux de récrétion par la canopée.
- Le potassium présente des concentrations sous couvert nettement plus élevées que dans les dépôts hors couvert, du fait d'un flux important de récrétion par la canopée. Dans les deux cas, son évolution ne révèle cependant aucune tendance significative.
- Le magnésium ne présente pas non plus d'évolution tendancielle. Hors couvert, il fluctue de manière très corrélée avec le chlorure, en cohérence avec son origine essentiellement marine.

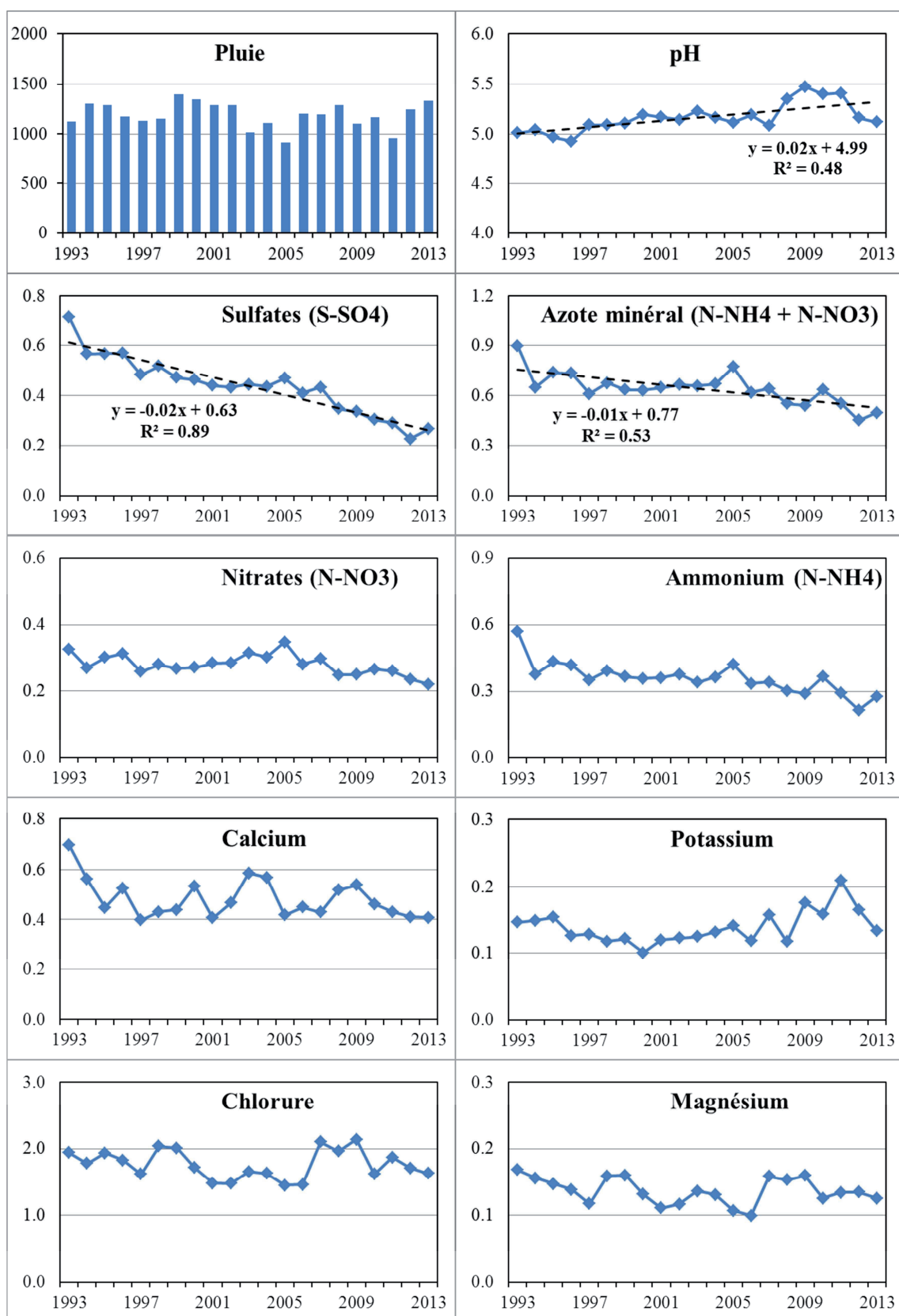


Figure 2a : Evolution de 1993 à 2013 des concentrations moyennes nationales des principaux cations et anions majeurs dans les pluies totales hors couvert forestier, pour les 27 sites du sous-réseau CATAENAT. Pluviométrie exprimée en mm, pH sans unité, concentrations en mg/L.

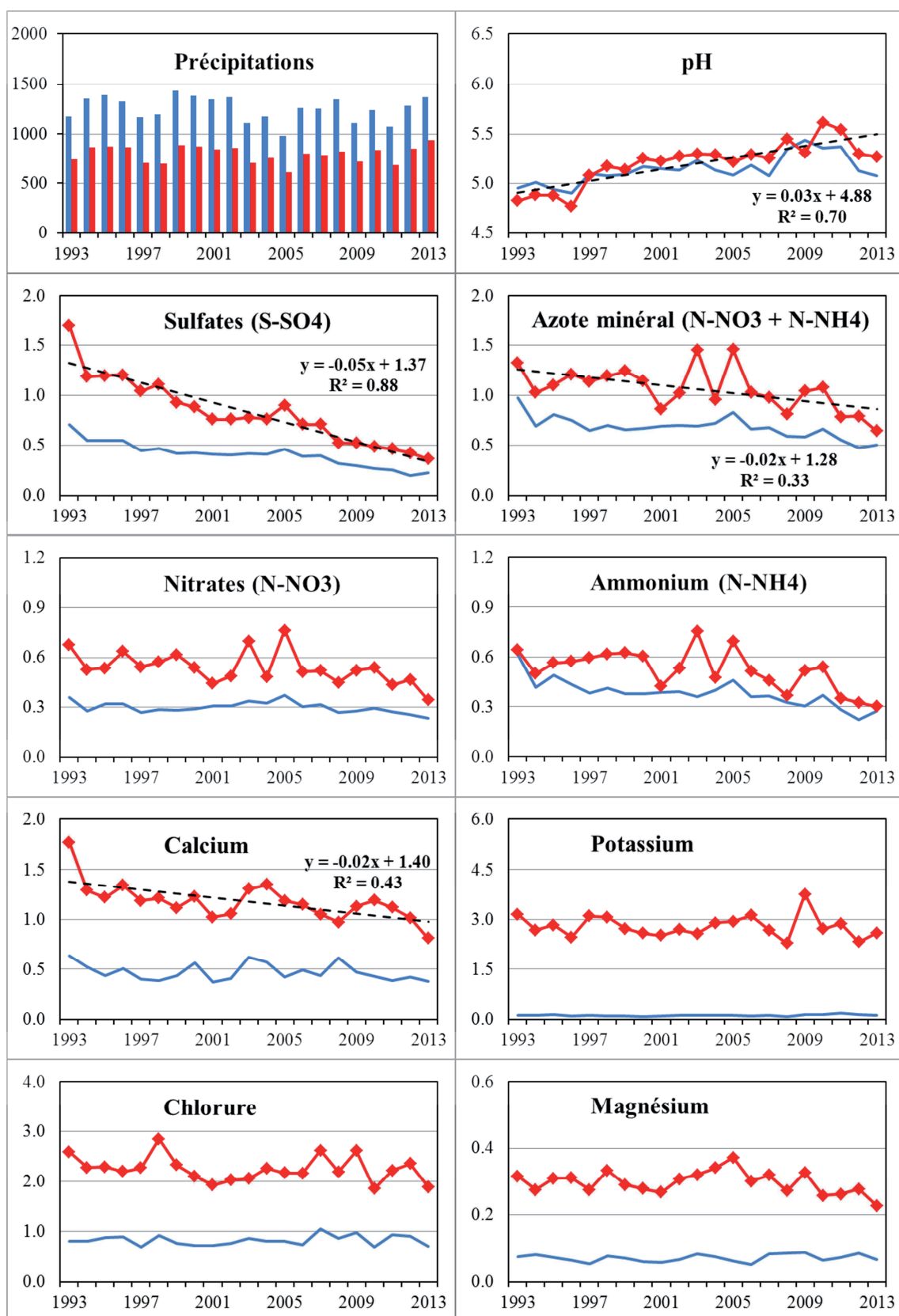


Figure 2b : Evolution de 1993 à 2013 des concentrations moyennes nationales des principaux cations et anions majeurs dans les pluies totales hors couvert forestier (en bleu) et dans les pluiolessivats collectés sous couvert forestier (en rouge), pour les 14 sites de niveau A3. Pluviométrie exprimée en mm, pH sans unité, concentrations en mg/L.

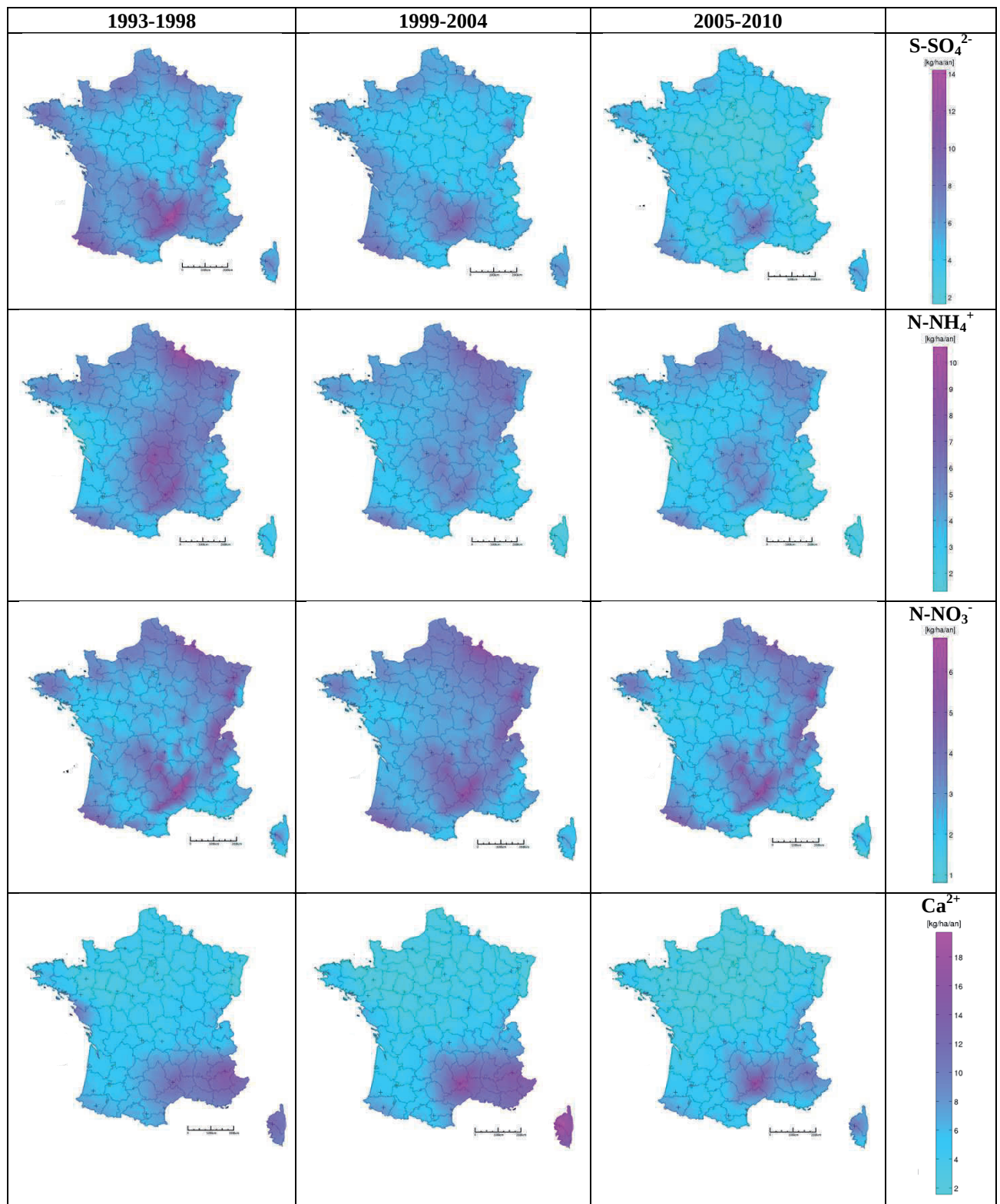


Figure 3 : Séries temporelles de cartographie des dépôts hors couvert à l'échelle nationale (en kg/ha/an) pour le soufre sous forme de sulfates (S-SO₄), l'azote sous forme d'ammonium (N-NH₄) et de nitrates (N-NO₃), et le calcium (Ca).

3.1.2. *Spatialisation dynamique des dépôts atmosphériques hors couvert*

La spatialisation des dépôts atmosphériques diffus, c'est-à-dire correspondant à une pollution de fond (en dehors du voisinage de fortes sources d'émissions), permet d'extrapoler les variations de niveaux de dépôts qui peuvent s'observer sur des sites de suivi ponctuels pour ensuite les comparer aux variations importantes de la sensibilité des écosystèmes vis-à-vis des déséquilibres nutritifs. Indépendamment des approches mécanistes telles qu'utilisées par le programme européen EMEP, Croisé et al. (2005) ont montré la possibilité de spatialiser à l'échelle de la France métropolitaine les dépôts atmosphériques totaux hors couvert mesurés sur le sous-réseau CATAENAT (soit sur 27 sites) grâce à une approche géostatistique (empirique) qui associe les données pluviométriques de plus de 2000 stations Météo-France. Cette approche, mise en œuvre avec l'entreprise Colenco, a permis de produire des cartes nationales de dépôts atmosphériques annuels, moyennés sur 6 années, d'abord sur la période de 1993-1998, et répétée ensuite sur la période de 1999-2004. L'étude réalisée par l'entreprise AF-Consult Switzerland Ltd (ex Colenco) en 2012-2013 a permis d'étendre l'approche de spatialisation géostatistique des dépôts atmosphériques hors couvert sur une période de 18 années de suivi (de 1993 à 2010), et d'y intégrer une dimension temporelle avec trois répétitions cohérentes de 6 années.

La Figure 3 montre les séries temporelles de cartes pour les dépôts atmosphériques hors couvert de soufre sous forme de sulfates ($S-SO_4$), d'azote sous forme d'ammonium ($N-NH_4$) et de nitrates ($N-NO_3$), et de calcium. Les maxima de dépôts soufrés et azotés observés sur des zones d'altitude, loin des sources d'émissions, illustrent les répercussions à longue distance des pollutions atmosphériques. La baisse des dépôts de soufre et d'ammonium est particulièrement notable sur ces zones mais le sens d'évolution est général. En revanche l'évolution des dépôts de nitrates est spatialement contrastée, augmentant sur certaines zones comme le Massif Central et baissant ailleurs. Concernant les dépôts de calcium, les cartes montrent leur prédominance en région méditerranéenne, illustrant vraisemblablement l'influence des dépôts sahariens. L'évolution temporelle des dépôts de calcium est également contrastée à l'échelle nationale.

En 2014, la validité des cartes produites a pu être testée sur un jeu de données indépendant en profitant de la mise en commun des données de surveillance des dépôts atmosphériques hors couvert dans le cadre d'un travail de thèse (Pascaud, 2013). Les stations permanentes de surveillance des dépôts atmosphériques existent en nombre limité à l'échelle de la France. Les résultats sont différents, en valeurs absolues, suivant les modalités d'échantillonnage (en « wet-only » pour les réseaux MERA et BAPMON, c'est-à-dire le dépôt humide exclusivement lié à la pluie, ou bien en « bulk » pour le réseau RENECOFOR, c'est-à-dire le dépôt total incluant des dépôts secs). Néanmoins, Aude Pascaud (2013) a montré une cohérence de variations spatiales et temporelles pour l'ensemble de ces suivis. En conséquence, à défaut d'une validation en valeurs absolues, les variations relatives présentées dans les cartes ont pu être comparées aux variations spatio-temporelles mesurées indépendamment sur les stations « wet-only » des réseaux MERA et BAPMON (ce qui représente une trentaine de points de comparaison sur l'ensemble de la période 1993-2010).

Cette comparaison montre, en ce qui concerne les variables de dépôts les plus importantes, que les variations spatio-temporelles observées sur les réseaux MERA et BAPMON sont bien reproduites par les cartes spatialisées produites à partir des données des sites RENECOFOR : N-NH₄ ($R^2=0,56$) (Figure 4), N-NO₃ ($R^2=0,66$), N-NO₃ + N-NH₄ ($R^2=0,58$), S-SO₄ ($R^2=0,47$), Ca ($R^2=0,72$). Les résultats sont également corrects pour les éléments marins Na, Cl et Mg (R^2 entre 0,38 et 0,49) à partir du moment où le site MERA de La Hague est écarté, ce qui suggère que les variations sont reproduites dans l'intérieur des terres mais que les fortes valeurs cartographiées sur le littoral charentais et vendéen s'étendraient plus largement sur les côtes. Enfin, les résultats sont moins pertinents pour H ($R^2=0,31$) et K ($R^2=0,0$), qui sont les éléments présents en plus faibles quantités et les plus sujets aux incertitudes de mesure.

En comparaison, la validité des cartes de dépôts d'azote et de soufre du programme EMEP (dry + wet, soit dépôt sec et dépôt humide) a été évaluée de la même manière au regard des variations spatio-temporelles mesurées indépendamment en France sur les 27 sites du sous-réseau CATAENAT. Les résultats sont corrects pour les dépôts hors couvert de nitrates N-NO₃ ($R^2=0,50$), mais nettement moins pour les dépôts hors couvert d'ammonium N-NH₄ ($R^2=0,17$). La mauvaise performance des cartes EMEP pour l'ammonium tient sans doute en grande partie à la surestimation du modèle dans l'Ouest de la France, où le suivi depuis 20 ans de plusieurs sites CATAENAT n'a jamais mis en évidence de forts dépôts d'ammonium malgré les émissions attribuées à l'agriculture intensive locale. Ces résultats ont fait l'objet d'une présentation lors de la dernière réunion de la Task Force du PIC Forêts (Nicolas et al., 2014b). Ils suggèrent un besoin de poursuivre des recherches sur les mécanismes de répartition des dépôts atmosphériques, en particulier pour l'ammonium. Ils montrent également l'apport original que constituent les approches géostatistiques dans la compréhension des variations spatio-temporelles des dépôts atmosphériques.

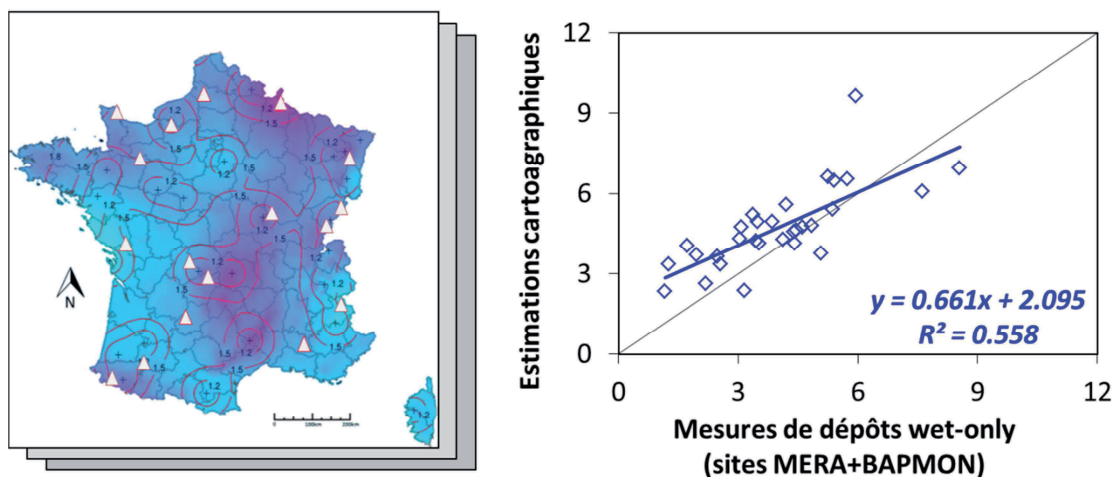


Figure 4 : Comparaison des valeurs de dépôts hors couvert totaux estimées par cartographie géostatistique à partir des sites CATAENAT aux valeurs de dépôts wet-only mesurées sur les sites des réseaux MERA et BAPMON pour l'azote sous forme d'ammonium (kg/ha/an).

3.2. Evolution temporelle des propriétés physicochimiques des sols

Contexte et problématique

Parmi les compartiments observés en réponse aux changements environnementaux, le réseau RENECOFOR suit l'évolution des propriétés physicochimiques de la litière et du sol forestier. En effet, le sol constitue le réservoir dans lequel les arbres et la végétation puisent les éléments minéraux dont ils ont besoin : l'évolution du contenu de ce réservoir est donc un indicateur d'état attendu vis-à-vis des déséquilibres nutritifs que peuvent provoquer les pollutions atmosphériques (acidification, eutrophisation). Le sol constitue également le principal réservoir de carbone organique au sein des écosystèmes terrestres : son évolution difficilement prévisible conditionne fortement le bilan carbone des écosystèmes forestiers vis-à-vis des enjeux d'atténuation des changements climatiques.

Le réseau RENECOFOR offre actuellement le seul jeu de données en France permettant d'évaluer l'évolution des propriétés des sols forestiers sur la base de mesures comparables à l'échelle nationale. Les 102 placettes du réseau, réparties sur l'ensemble de la France métropolitaine, ont fait l'objet de deux campagnes d'analyse des horizons de litière et du sol minéral (de 0 à 40 cm de profondeur), sur les périodes 1993-1995 et 2007-2012. La comparabilité temporelle des données repose sur la continuité des méthodes d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire. Les prélèvements n'ont pas été réalisés à la tarière mais sur des mini-fosses jusqu'à 40 cm de profondeur de manière à maximiser la représentativité des prélèvements jusque dans les contextes les plus caillouteux. Les variations spatiales intra-site ont été intégrées au moyen de 25 répétitions de prélèvement réparties entre 5 sous-placettes fixes (grappes), et quantifiée grâce à l'analyse d'un composite pour chacune des 5 grappes. Cette quantification a pour but de différencier de potentielles évolutions temporelles des variations spatiales intra-site. L'essentiel des analyses a été réalisé aux deux campagnes par le Laboratoire d'analyse des sols (LAS) de l'INRA Arras, accrédité par le COFRAC pour l'ensemble des méthodes employées et considéré comme laboratoire de référence au niveau européen suivant ses performances aux essais inter-laboratoires du programme *ICP Forests*. Dans le cadre du programme européen Biosoil, il est à noter que l'ensemble des pays participants devaient transmettre au LAS un doublon de 10 % de leurs échantillons de sol pour contrôler la qualité de leurs analyses chimiques.

La comparaison des résultats des deux campagnes de mesure a été menée en collaboration avec l'Université catholique de Louvain-la-Neuve (UCL), dans le cadre de conventions associant à chaque fois un comité de pilotage.

- En 2013, une première collaboration a permis d'analyser l'évolution temporelle des stocks de carbone organique des sols du réseau RENECOFOR (Jonard *et al.* 2013). Cette étude soutenue par le MAAF a répondu aux besoins de l'inventaire des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre des engagements internationaux de la France. Il s'agissait en particulier de vérifier l'hypothèse faite dans ces engagements selon laquelle les litières et sols forestiers ne seraient pas une source d'émission nette de carbone (CITEPA, 2014). Les résultats de cette étude font l'objet d'une soumission

d'article en cours dans une revue scientifique internationale. Ils ont néanmoins déjà été utilisés pour tester les simulations d'évolution des stocks de carbone des sols issues du modèle YASSO07 (Saint-André *et al.*, 2014).

- Fin 2013, une deuxième convention a été passée afin d'analyser l'évolution des autres paramètres mesurés sur les sols du réseau RENECOFOR (notamment : azote total, C/N, pH, éléments échangeables, S/T, phosphore extractible), en s'appuyant sur le recrutement d'un post-doctorant pour une durée de 10 mois (Anaïs Saenger). Au vu des résultats présentés au comité de pilotage les 13 juin et 8 octobre (Saenger *et al.*, 2014a ; 2014b), le contrat de post-doc a été prolongé de 6 mois afin d'aboutir à leur publication sous la forme d'un rapport de la série jaune RENECOFOR et d'un article dans une revue scientifique internationale.

Résumé de l'étude

En préliminaire à l'analyse de ces évolutions, il importait de déterminer s'il fallait tenir compte d'une évolution temporelle de la densité apparente du sol minéral (Saenger *et al.*, 2014b). Il s'avère que l'application de la méthode de mesure a été quelque peu différente entre les deux campagnes, le tamisage des échantillons de densité apparente ayant été réalisé majoritairement à la main (plus doucement) lors de la première campagne et de manière mécanisée lors de la deuxième campagne. En considérant l'ensemble des valeurs, les premières comparaisons ont ainsi abouti à une augmentation significative et importante de la densité apparente, qui ne peut être expliquée par une contrainte de tassement : l'augmentation aurait été plus marquée dans les couches profondes et caillouteuses, et aurait aussi valu pour les sites n'ayant subi aucun passage d'engin entre les deux campagnes. En revanche, en ne considérant que les couches tamisées de la même manière aux deux campagnes ou bien présentant moins de 5 % d'éléments grossiers (623 échantillons, soit 49 % de l'effectif total), il n'apparaît aucune évolution significative. Sur cette base, l'évolution réelle de la densité apparente a été considérée comme négligeable entre les deux campagnes de mesure et l'évolution des propriétés chimiques des sols a été analysée au regard des seules concentrations. Par ailleurs, la reproductibilité des mesures a été vérifiée pour l'essentiel des paramètres chimiques en réanalysant en aveugle une centaine d'échantillons de sol minéral archivés depuis la première campagne : seules les mesures de protons et de manganèse échangeables présentent une mauvaise reproductibilité et ne sont pas incluses dans les analyses d'évolution temporelle.

A l'échelle du réseau (i.e. en incluant les résultats de toutes les grappes de tous les sites), l'évolution des propriétés chimiques des sols a été analysée statistiquement, paramètre par paramètre et couche par couche, au moyen de régressions linéaires mixtes intégrant l'effet de la campagne de mesure (facteur à effet fixe) et l'effet de la placette (facteur aléatoire). Les paramètres chimiques étudiés ne suivant généralement pas une distribution gaussienne (distributions log-normales) ont été normalisés grâce au logarithme décimal avant ajustement des modèles. Lors de comparaisons de grands ensembles d'échantillons, comme c'est le cas ici, les tests sont surpuissants et des écarts infimes de moyenne suffisent à générer une différence statistiquement significative. Les résultats des régressions ont donc été complétés

par le calcul de la « taille de l'effet » suivant 3 indices (η^2 , d de Cohen, coefficient de corrélation de Bravais-Pearson). La même approche a été répétée en subdivisant l'ensemble des sites par catégories suivant 5 facteurs : le type d'essence (feuillu ou résineux), le niveau trophique du sol ($\text{pH H}_2\text{O} < 4.5$, compris entre 4.5 et 5.5, ou > 5.5), la texture dominante du sol (sable, limon ou argile), le régime hydrique du sol (présence ou absence de traces d'hydromorphie) et le type de climat (océanique, continental ou montagnard).

Les Tableaux 2, 3 et 4 synthétisent les évolutions observées dans la litière et le sol des sites du réseau RENECOFOR entre les deux campagnes de mesure 1993-1995 et 2007-2012 (Saenger *et al.*, 2014a). Il en ressort trois évolutions majeures.

- Les litières et les sols forestiers se sont comportés comme des puits de carbone pendant la période considérée. Les stocks de carbone organique ont augmenté de manière significative et importante (en moyenne +0,34 tC/ha/an sur l'ensemble du sol minéral et de la litière). Cette évolution est plus marquée sous résineux (+0,49 tC/ha/an) que sous feuillus (+0,19 tC/ha/an) et se produit essentiellement dans la couche minérale de surface (0-10 cm).
- Le ratio C/N a augmenté de manière significative et importante pour toutes les couches de profondeur et quel que soit le contexte. Cette évolution est liée à une augmentation moindre de l'azote total que du carbone organique en surface (litière et couche 0-10 cm du sol minéral), tandis qu'elle est liée à une baisse de l'azote total dans les couches plus profondes (couches 10-20 cm et 20-40 cm du sol minéral). Si les dépôts atmosphériques d'azote ont encore peu baissé sur la période considérée, on n'observe en tout cas pas d'accumulation globale d'azote dans les sols.
- L'acidification s'est poursuivie dans le cas des sols les plus acides ($\text{pH} < 4.5$), associant une baisse significative du pH et du taux de saturation (S/T). Malgré leur baisse constatée, il semble que les dépôts atmosphériques acidifiants sont restés trop importants en comparaison du pouvoir tampon parfois extrêmement faible des sols forestiers acides. En regardant plus en détail, il semble cependant que la baisse du taux de saturation de ces sols a été compensée par l'augmentation de l'ensemble de la capacité d'échanges cationiques et que les réserves ont augmenté pour certains éléments nutritifs comme le magnésium (élément en cause dans les symptômes de carence observés notamment dans les Vosges dans les années 1980).

Ces résultats sont assez inattendus et ne concordent pas nécessairement avec l'évolution d'autres paramètres de l'écosystème. Par exemple, les stocks de phosphore extractible des sols n'évoluent quasiment pas, en contradiction apparente avec la baisse de la nutrition foliaire en phosphore constatée à l'échelle nationale (Jonard *et al.*, 2009) et européenne (Jonard *et al.*, in press). Plus globalement, un si grand nombre d'évolutions significatives n'était pas attendu dans les sols sur un intervalle d'une quinzaine d'années. Les principaux facteurs d'explication semblent à rechercher dans la dynamique des matières organiques (évolutions prépondérantes du carbone organique et de l'azote total). Pour rappel concernant l'évolution des stocks de carbone organique des sols, l'étude précédente (Jonard *et al.*, 2013) avait déjà permis d'éliminer certaines hypothèses d'explication à partir des autres données disponibles sur le réseau RENECOFOR. L'augmentation des stocks de carbone organique ne

semble pas due au vieillissement des peuplements, puisqu'elle n'est pas significativement différente pour les sites en régénération depuis les tempêtes de 1999. Elle ne peut s'expliquer non plus par une augmentation des apports de matières organiques aériennes, les chutes de litière mesurées étant restées stables notamment sous les peuplements résineux. Cela laisse à penser à un ralentissement de la vitesse de décomposition des matières organiques des sols, ou bien encore à un déséquilibre préexistant entre les apports et les pertes de carbone des sols forestiers.

Cette étude illustre l'intérêt du monitoring face à des phénomènes complexes dont on ne maîtrise pas tous les mécanismes, ainsi que l'importance de la qualité des mesures pour assurer leur comparabilité. Les résultats contribueront au renseignement de l'édition 2015 des indicateurs de gestion durable des forêts.

Paramètres chimiques	Niveau de significativité et taille de l'effet	Pourcentage d'évolution
Ca tot	↗	+ 0,6 %
Mg tot	↗	+ 10,7 %
K tot	0	- 1,8 %
Cd	0	+ 1,7 %
Cu	0	+ 8,1 %
Ni	0	- 14,5 %
Pb	↘↘↘	- 28,7 %
Zn	↘↘	- 12,0 %
P	↗↗	+ 14,5 %
C	↗	+ 10,5 %
N	0	+ 1,1 %
C/N	↗↗	+ 8,1 %
Masse litière	0	- 1,5 %

0 Evolution non significative (seuil de significativité de 5%)

↘ Diminution significative - Taille de l'effet faible

↘↘ Diminution significative - Taille de l'effet moyen

↘↘↘ Diminution significative - Taille de l'effet fort

↗ Augmentation significative - Taille de l'effet faible

↗↗ Augmentation significative - Taille de l'effet moyen

↗↗↗ Augmentation significative - Taille de l'effet fort

Tableau 2 : Evolutions temporelles de la masse, des stocks d'éléments chimiques et du rapport C/N des couches de litière, à l'échelle de l'ensemble des sites du réseau RENECOFOR entre les campagnes de mesure 1993-1995 et 2007-2012.

Couches du sol	Paramètres chimiques											
	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Corg (g/kg)	Norg (g/kg)	C/N	P (g/kg)	ECEC (cmolc/kg)	Taux saturation (%)	Al éch. (cmolc/kg)	Ca éch. (cmolc/kg)	Mg éch. (cmolc/kg)	K éch. (cmolc/kg)
0-10 cm	↘	↘↘	↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗	↗	↗↗	↗	↗↗↗	↗↗↗
10-20 cm	0	↘	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	↘	↗↗	↗	↗↗	↘↘
20-40 cm	↗	0	↘	↘↘↘	↗↗↗	0	↗	↘	0	↗	0	0
0-40 cm	0	↘	↗↗	↘	↗↗↗	↗	↗↗	↘	↗	0	↗↗	↗↗

Tableau 3 : Evolutions temporelles des propriétés chimiques du sol minéral par couche de prélèvement systématique, à l'échelle de l'ensemble des sites du réseau RENECOFOR entre les campagnes de mesure 1993-1995 et 2007-2012 (même légende que pour le tableau 2).

Facteurs écologiques	Couches	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Corg (g/kg)	Norg (g/kg)	C/N	P (g/kg)	ECEC (cmolc/kg)	Taux saturation (%)	Al éch. (cmolc/kg)	Ca éch. (cmolc/kg)	Mg éch. (cmolc/kg)	K éch. (cmolc/kg)
Feuillus	0-10 cm	0	↘	↗↗	0	↗↗	↘	↗↗	0	↗	0	↗↗	↗↗
	10-20 cm	0	↘	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗	↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗↗	0	0	↘↘	↗↗↗	0	0	0	0	↗	0	↗↗
	0-40 cm	↗	↘	↗	↘↘	↗↗↗	↘↘	↗↗	↗	↗	0	↗	↗↗
Résineux	0-10 cm	↘↘	↘↘	↗↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗	↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗
	10-20 cm	0	0	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	↘	↗↗	↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	0	0	↘	↘↘↘	↗↗↗	0	↗	↘↘	0	↗↗	0	0
	0-40 cm	0	↘	↗	↘	↗↗↗	0	↗↗	↘	↗↗	0	↗↗	0
Climat continental	0-10 cm	↘	↘↘	↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗	0	↗	0	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	0	↘	0	↘↘	↗↗↗	0	↗	↘	↗	↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗↗	0	0	↘↘	↗↗↗	0	0	↘↘	0	↗↗	0	0
	0-40 cm	0	↘↘	↗↗	0	↗↗	↘	↗↗	↘↘	↗	↗	↗↗	↗
Climat montagnard	0-10 cm	0	0	↗↗↗	↗↗	↗↗↗	0	↗↗↗	↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	0	0	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗↗	0	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗	0	↘	↘↘↘	↗↗↗	0	0	↘	0	↗↗	0	0
	0-40 cm	0	0	↗↗	↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗↗	0	↗↗	↗↗
Climat océanique	0-10 cm	↘	↘↘	↗↗	0	↗↗	0	↗↗	0	↗	0	↗↗	↗↗
	10-20 cm	0	↘	0	↘↘	↗↗↗	0	↗	0	↗	↘	↗	↗↗
	20-40 cm	0	↘	0	↘↘↘	↗↗↗	0	↗	0	0	0	0	↗↗
	0-40 cm	0	↘↘	↗	↘↘	↗↗↗	↗	↗	↘	↗	0	↗	↗
Sols hydromorphes	0-10 cm	↘	↘↘	↗↗	0	↗↗	↘↘	↗	0	0	0	↗↗↗	↗↗
	10-20 cm	0	↘	0	↘↘↘	↗↗↗	0	0	0	0	↗	↗	↗
	20-40 cm	0	0	0	↘↘↘	↗↗↗	0	0	0	0	↗	0	↗↗
	0-40 cm	0	↘↘	0	↘↘	↗↗↗	↘↘	0	↘↘	0	↗↗	↗	0
Sols non hydromorphes	0-10 cm	0	↘	↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗↗	↗	↗↗	↗↗	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	0	↗	↗	↘↘	↗↗↗	↗	↗↗	↘	↗↗	↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗	0	0	↘↘↘	↗↗↗	0	↗	↘↘	0	↗	0	↗
	0-40 cm	0	↘	↗	↘	↗↗↗	↗	↗↗	↘	↗↗	0	↗↗	↗
Texture limoneuse	0-10 cm	0	↘	↗↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗↗	0	↗↗	0	↗↗↗	↗↗
	10-20 cm	0	0	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	↘↘	↗↗	↗↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗	0	↘	↘↘↘	↗↗↗	0	0	↘↘	0	↗↗	0	↗
	0-40 cm	0	↘	↗	↘	↗↗↗	↗	↗↗	↘↘	↗	↗	↗↗	↗
Texture argileuse	0-10 cm	↗	0	↗↗	0	↗↗↗	↘↘	↗↗	0	↗	0	↗↗	↗↗
	10-20 cm	↗↗	0	↗↗	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	0	0	0	↗↗
	20-40 cm	↗↗	↗↗	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	0	↗↗	0	↗↗
	0-40 cm	↗↗	0	↗↗	0	↗↗↗	↘↘↘	↗↗	0	0	0	0	↗↗
Texture sableuse	0-10 cm	↘↘	↘↘	↗↗	↗	↗↗	0	↗↗	↗↗	0	↗↗	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	↘	↘	0	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗	0	↗↗	↗↗
	20-40 cm	0	↘	0	↘↘↘	↗↗↗	0	0	↘	0	↘	0	0
	0-40 cm	↘	↘↘	↗↗	↘↘	↗↗↗	0	↗↗	0	↗	0	↗↗	0
Sol pH < 4,5	0-10 cm	↘↘	↘↘	↗↗	↗↗	↗↗	0	↗↗	↗	↗↗	0	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	↘	↘↘	0	↘↘↘	↗↗↗	0	↗↗	↘	↗	↘	↗↗	↗↗
	20-40 cm	0	↘	↘	↘↘↘	↗↗↗	0	↗	↘↘	↗	↘↘	0	↗
	0-40 cm	↘↘	↘	↗	↘↘	↗↗↗	↗	↗↗	↘↘	↗↗	↗	↗↗	0
Sol pH 4,5 - 5,5	0-10 cm	0	↘	↗↗↗	0	↗↗↗	0	↗↗	↗	0	↗↗	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	0	0	↗	↘	↗↗↗	0	↗	0	↗	0	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗↗	0	0	↘↘	↗↗↗	0	0	0	0	0	0	0
	0-40 cm	↗	↘	↗	0	↗↗↗	↘↘	↗	0	0	0	↗↗	↗↗
Sol pH > 5,5	0-10 cm	0	0	↗↗	0	↗↗↗	0	↗↗↗	0	0	↗↗	↗↗↗	↗↗↗
	10-20 cm	0	0	↗	0	↗↗↗	↘↘	↗↗	0	0	↗↗	↗↗	↗↗
	20-40 cm	↗↗	0	0	↘↘	↗↗	0	0	0	↘↘↘	↗	0	↗↗
	0-40 cm	↗	0	0	0	↗↗↗	0	↗↗↗	0	0	↗↗	↗↗↗	↗↗

Tableau 4 : Evolutions temporelles des propriétés chimiques du sol minéral par couche de prélèvement systématique et suivant cinq facteurs de catégorisation écologique des sites du réseau RENECOFOR, entre les campagnes de mesure 1993-1995 et 2007-2012 (même légende que pour le tableau 2).

3.3. Variations des cortèges de champignons supérieurs

Contexte et problématique

En 1996, une collaboration a été initiée avec l'Observatoire mycologique de France afin d'explorer les variations de composition des champignons supérieurs sur les sites du réseau RENECOFOR. Les champignons supérieurs représentent en effet un cortège peu connu mais intéressant de par sa diversité d'espèces (3 à 10 fois plus importante que la flore) et ses propriétés particulières dans le fonctionnement des écosystèmes (champignons saprophytes, mycorhiziens, parasites). Un premier ensemble de 12 sites a fait l'objet d'inventaires entre 1996 et 1998 (Moreau *et al.*, 2002) avant d'étendre les observations jusqu'en 2007. Au total, environ 60 placettes ont été inventoriées suivant un échantillonnage tournant prévoyant un suivi minimum de 3 années consécutives et 4 répétitions intra-annuelles par placette. De plus, deux exercices d'intercalibration ont été réalisés en 2004 (Corriol et Mayet, 2006) et 2012 afin d'évaluer les incertitudes d'observation entre mycologues sur les mêmes relevés. Cependant un long travail de mise en forme des données a été nécessaire entre 2005 et 2012 avec la contribution Jean-Luc Dupouey (INRA Nancy), en raison de l'absence de saisie uniformisée des noms d'espèces par les mycologues (réalisation d'une table de correspondances nomenclaturales) et de mauvaises manipulations détectées dans les données de 2003 et 2004 (recompilation des relevés originels de ces 2 années). Aucune reprise de relevés n'a été envisagée par le réseau RENECOFOR dans l'attente de la mise en forme et d'une première analyse de l'ensemble du jeu de données.

A la suite de leur mise en forme, l'analyse des données a d'abord été envisagée en 2012 dans le cadre d'un congé pour recherche ou conversion thématique (CRCT) demandé par Michaël Aubert, professeur à l'Université de Rouen. Malheureusement la collaboration a échoué pour des raisons internes à l'Université. Fin 2013, une nouvelle convention a été passée avec l'Université de Rouen pour l'analyse des données, en s'appuyant cette fois sur le recrutement d'un post-doctorant pour une durée de 6 mois (Benoît Richard). Son encadrement est assuré par M. Aubert et l'INRA Nancy et plusieurs mycologues sont associés dans le comité de pilotage. Les objectifs généraux sont :

1. d'étudier les variations temporelles et inter-sites des cortèges de champignons en relation avec les paramètres environnementaux et les traits de vie des espèces (ex : saprophytes/mycorhizes/parasites) ;
2. d'évaluer la faisabilité d'un suivi à long terme suivant les incertitudes d'observation et l'effort d'échantillonnage requis.

Au vu des résultats présentés au comité de pilotage le 30 juin 2014, le contrat de post-doc a été prolongé de 8 mois afin d'approfondir certaines analyses et d'aboutir à la publication de l'étude sous la forme d'un rapport de la série jaune RENECOFOR et de deux articles dans des revues scientifiques internationales. Les résultats des analyses approfondies ont été présentés au comité de pilotage le 21 novembre 2014, à mi-parcours du nouveau contrat de 8 mois. Les mois restant seront consacrés à la rédaction des publications.

Résumé de l'étude

Dans un premier temps, l'étude s'est attachée à l'analyse descriptive du jeu de données. Les espèces observées appartiennent essentiellement aux groupes des basidiomycètes (85 %) et des ascomycètes (13 %). Le jeu de données se caractérise par ailleurs par une forte proportion d'espèces observées sur un seul site (45 % pour les basidiomycètes). Le nombre total d'espèces relevées est significativement plus élevé sous feuillus que sous résineux pour un effort d'inventaire équivalent. Cela étant le nombre total d'espèces présentes sur les sites ne peut être estimé précisément car le nombre d'espèces observées ne cesse de s'accumuler avec le nombre de relevés sans atteindre d'asymptote horizontale (même dans le cas du site CHP 49 ayant fait l'objet de 31 relevés au total sur 3 ans).

L'étude s'est ensuite penchée sur l'analyse écologique des communautés, en ne retenant que les espèces de basidiomycètes observées au moins sur 2 sites. Tout d'abord les variations entre sites des cortèges d'espèces de champignons supérieurs et leurs relations avec les paramètres environnementaux ont été analysées. Les différents outils d'analyse multivariée employés (analyse factorielle des correspondances AFC et analyse canonique des correspondances CCA) aboutissent à des résultats significatifs. Les cortèges de champignons supérieurs se structurent en premier lieu suivant un axe opposant les sites feuillus et résineux (Figure 5), et non pas suivant un gradient biogéographique comme c'est le cas notamment pour la flore. Le deuxième axe de structuration mêle quant à lui les effets d'un gradient d'altitude (altitude, précipitations et température moyenne annuelles) et d'un gradient de richesse trophique du sol (pH, S/T, C/N). Les communautés ont également été analysées sous l'angle de la co-occurrence des espèces, c'est-à-dire la diversité moyenne d'espèces avec laquelle chaque espèce est relevée. Ainsi une espèce généraliste est présente aux côtés de nombreuses autres espèces variant d'un relevé à l'autre. A l'inverse une espèce spécialisée est présente aux côtés d'espèces peu nombreuses et récurrentes d'un relevé à l'autre. Les résultats obtenus montrent que les espèces saprophytes sont en moyenne plus spécialisées que les espèces ectomycorhiziennes (Figure 6).

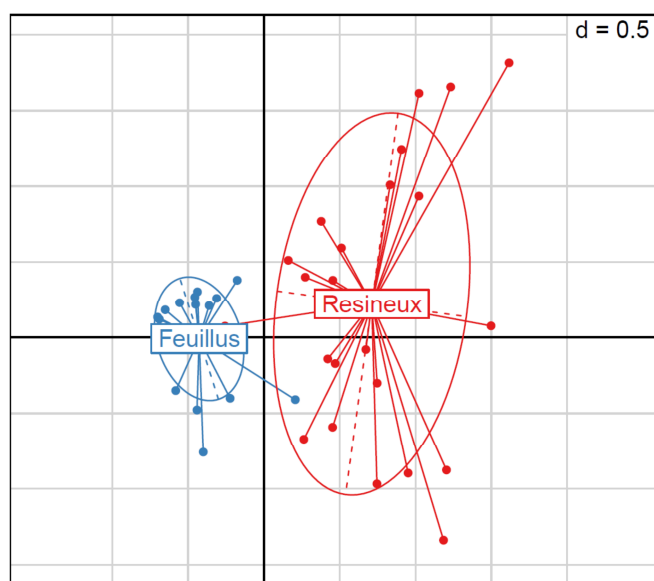


Figure 5 : Représentation des sites du réseau RENECOFOR sur les deux premiers axes de structuration des communautés de champignons supérieurs (par analyse factorielle des correspondances). Le type d'essence (Résineux/Feuillus) est le principal facteur de structuration suivant le premier axe (horizontal).

Enfin, pour évaluer la faisabilité d'un suivi à long terme, l'étude s'est intéressée au nombre de répétitions de relevés nécessaires pour pouvoir mettre en évidence les différents résultats obtenus avec l'ensemble du jeu de données.

- Tout d'abord, il s'est agi de déterminer le nombre de sites minimum à inventorier pour pouvoir mettre en évidence la structuration écologique des communautés. Pour ce faire, l'analyse multivariée des cortèges (CCA) a été répétée en tirant aléatoirement n sites, en agrégeant l'ensemble des répétitions temporelles de chaque site. Les résultats montrent que moins d'une vingtaine de sites suffit à mettre en évidence une structuration significative des cortèges ainsi qu'un effet significatif du principal facteur de structuration Feuillus/Résineux (Figure 7). En revanche, un échantillonnage de plus d'une trentaine de sites est nécessaire pour mettre en évidence un effet significatif des facteurs du second axe de structuration écologique tels que le rapport C/N du sol (Figure 7).

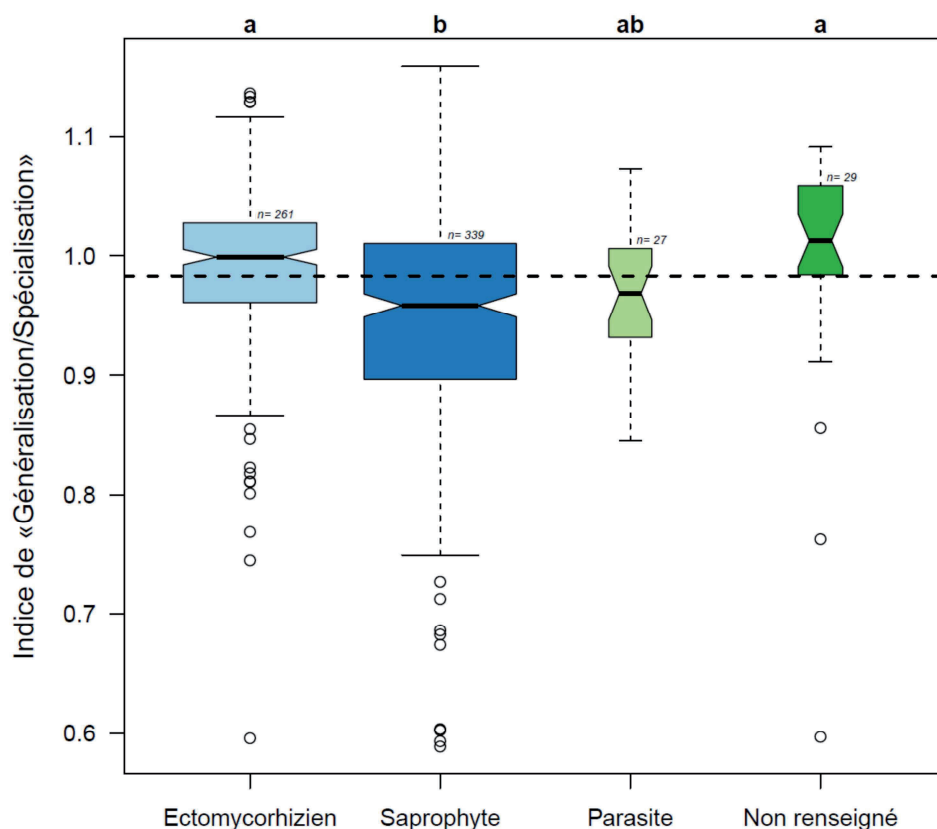


Figure 6 : Indice de spécialisation des espèces (co-occurrence) par type trophique (ectomycorhizien, saprophyte, parasite ou non renseigné). Plus l'indice est élevé, moins les espèces sont spécialistes, i.e. plus elles sont généralistes. Pour chaque type trophique, la représentation en boîtes à moustaches figure la distribution des valeurs : les quartiles inférieurs et supérieurs (définissant la longueur de la boîte), la médiane des valeurs (la ligne noire épaisse), les pattes dont la longueur s'étend jusqu'à 1.5 fois la distance interquartile, et les valeurs extrêmes (les points). Le nombre de placettes par boîte à moustaches est figuré. Les lettres au-dessus du graphe indiquent les différences significatives entre groupes trophiques (Test de Kruskal-Wallis au seuil de 5%).

- De même, le nombre nécessaire de répétitions temporelles a été évalué pour stabiliser la structure des communautés observée. Les inventaires ayant été notamment répétés 3 années successives, il apparaît que l'année de relevé n'a pas d'effet significatif sur les résultats de la structuration écologique mise en évidence par AFC.

Cette analyse méthodologique suggère que l'évolution de la structuration écologique des communautés de champignons supérieurs, suivant les principaux facteurs environnementaux de structuration, pourrait être suivie dans le temps sur la base d'un effort d'échantillonnage moindre que celui mis en œuvre de 1996 à 2007. Cependant, si l'on souhaite mieux comprendre les effets respectifs des facteurs climatiques (gradient d'altitude) et édaphiques (gradient de richesse trophique) mêlés sur l'axe 2 des analyses multivariées, il pourrait être aussi intéressant de poursuivre l'effort d'inventaire d'un plus grand nombre de sites du réseau. Suivant les moyens et les compétences disponibles, donner une suite aux inventaires de champignons supérieurs pourrait demander à choisir entre leur extension spatiale et leur suivi temporel.

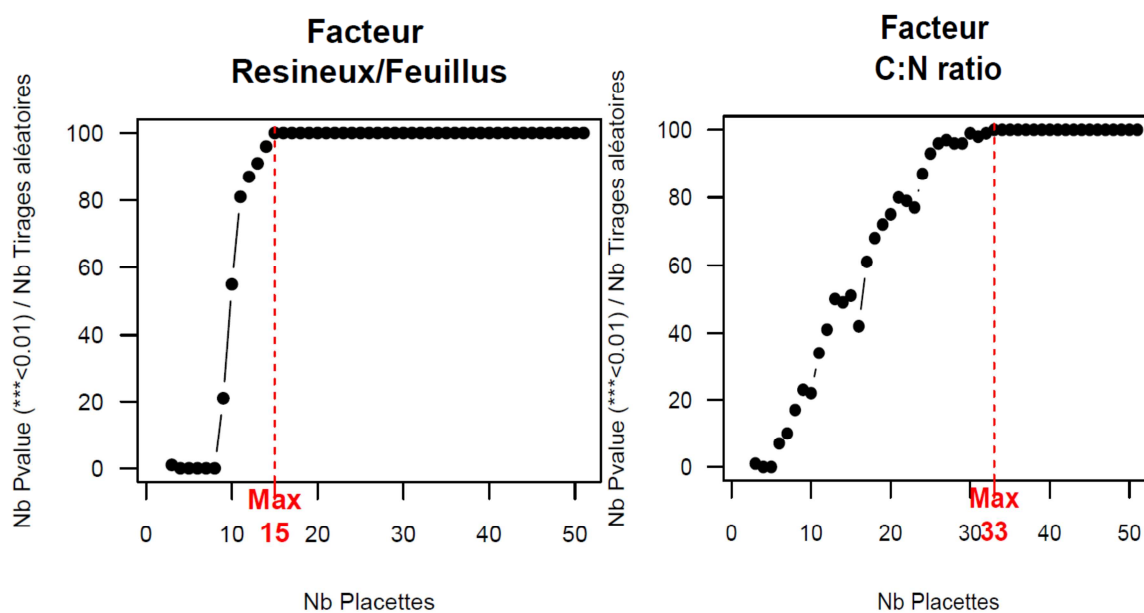


Figure 7 : Probabilité de mise en évidence d'un effet significatif du type d'essence (à gauche) et du rapport C/N du sol (à droite) dans la structuration écologique des communautés de champignons supérieurs en fonction du nombre de sites échantillonnés (CCA répétée sur tirages aléatoires de n sites parmi l'ensemble des sites, à raison de 100 tirages par effectif n). Un tirage de quinze sites suffit à mettre en évidence systématiquement l'effet du type d'essence, tandis que 33 sites sont nécessaires pour mettre en évidence systématiquement l'effet du rapport C/N du sol.

3.4. Comparaison de l'évolution mesurée des propriétés des sols à celle bioindiquée par la flore

La bio-indication par les communautés végétales est un outil fréquemment utilisé tant en recherche qu'en gestion forestière pour évaluer les variations de contexte environnemental. Les valeurs indicatrices associées à chaque espèce végétale sont calculées en s'appuyant sur le concept de niche selon lequel l'installation et la survie d'une espèce sont relativement spécifiques au milieu. La valeur indicatrice d'un site est ensuite obtenue en moyennant les valeurs indicatrices associées aux espèces végétales présentes.

La capacité bio-indicatrice des communautés végétales à travers des gradients spatiaux est largement reconnue. Elle est communément transposée aux évolutions temporelles, ce qui présuppose que la corrélation entre les paramètres du sol et les valeurs indicatrices reste valable dans le temps. Les valeurs indicatrices sont par exemple utilisées pour estimer la réponse des communautés végétales à l'eutrophisation ou à l'acidification du sol dues aux dépôts atmosphériques. Réciproquement, elles sont également utilisées pour reconstituer l'évolution temporelle de conditions environnementales à partir de relevés floristiques. Cependant, peu de travaux étayent la fiabilité de cette transposition de l'utilisation des valeurs indicatrices au domaine temporel. La répétition temporelle de mesures des propriétés physico-chimiques des sols et de relevés floristiques sur une période de 15 ans sur les 102 sites du réseau RENECOFOR offre un jeu de données inédit à l'échelle nationale pour vérifier la cohérence de la bioindication par la flore au cours du temps. L'existence d'évolutions temporelles significatives de propriétés du sol, telles que le rapport C/N, renforce d'autant plus l'intérêt du jeu de données (Saenger *et al.*, 2014a, cf chapitre 3.2).

L'étude a été confiée à Iris Le Roncé, étudiante à l'Ecole normale supérieure en stage à l'ONF pour 5 mois jusqu'en février 2015. Elle est co-encadrée par Vincent Boulanger (chargé de R&D, ONF Fontainebleau) et Manuel Nicolas (responsable du réseau RENECOFOR, ONF Fontainebleau), avec la participation de Jean-Luc Dupouey (INRA Nancy). Le plan de travail comprend :

- La correspondance taxonomique des relevés de flore du réseau RENECOFOR (nomenclature Flora europaea) avec les nomenclatures utilisées dans les bases de valeurs indicatrices d'Ellenberg, de Gégout (EcoPlant) et de Julve ;
- L'analyse des variations des valeurs bioindiquées par la flore, de leur structure de corrélation et de leur sensibilité à la méthode d'agrégation à l'échelle du relevé (ex : présence/absence vs abondance/dominance, choix des strates considérées) ;
- La comparaison des variations spatiales et temporelles des mesures des propriétés physico-chimiques des sols avec celles des valeurs correspondantes bioindiquées par la flore.

Le rendu est prévu sous la forme d'un projet d'article dans une revue scientifique internationale.

4. Contribution aux travaux de valorisation d'initiative externe

Le Tableau 5 comptabilise par catégorie les publications de l'année 2014 émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données. La valorisation du réseau repose en grande partie sur l'initiative d'utilisateurs externes, ainsi que l'illustre la liste des publications au chapitre 6.1. Les documents publiés en 2014 correspondent à des thématiques variées :

- Tendances de dépôts atmosphériques (Waldner *et al.*, 2014 ; Pascaud *et al.*, 2014), de nutrition foliaire (Jonard *et al.*, in press), d'état sanitaire (Ferretti *et al.*, 2014) ;
- Corrélations de l'état sanitaire des arbres avec la nutrition foliaire (Veresoglou *et al.*, 2014) et avec l'évolution temporelle de multiples paramètres (Ferretti *et al.*, 2014) ;
- Impact de l'ozone troposphérique sur l'état sanitaire des arbres (ACRI-ST, 2014) ;
- Variations spatiales des cortèges d'espèces ectomycorhiziennes dans les chênaies européennes en fonction notamment des dépôts azotés (Suz *et al.*, 2014) ;
- Modélisation de l'impact des dépôts atmosphériques et du changement climatique sur les cycles biogéochimiques (Gaudio *et al.*, in press),
- Modélisation de l'effet de la sylviculture sur la production forestière (Guillemot *et al.*, 2014) ;
- Confrontation de résultats de simulations d'évolution des stocks de carbone des sols aux données mesurées sur le réseau RENECOFOR (Saint-André *et al.*, 2014) ;
- Inventaire des émissions nationales de gaz à effet de serre (CITEPA, 2014) ;
- Utilisation des données météorologiques du réseau dans l'observation locale de phénomènes de glissements de terrain (ONF, 2014) ;
- Contributions au colloque REGEFOR de 2013 sur le thème « La gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ? » (Eglin *et al.*, 2014 ; Nicolas *et al.*, 2014).
- Contribution à la réflexion sur l'élaboration d'indicateurs du changement climatique en forêt dans le cadre du projet SICFOR (Asse *et al.*, 2014)

Cinq d'entre eux mettent en valeur des données des réseaux de différents pays, illustrant encore une fois l'intérêt de l'intégration à l'échelle européenne du monitoring forestier dans le cadre du programme ICP Forests.

	Documents portants sur des données de monitoring nationales uniquement	Documents portants sur des données de monitoring de plusieurs pays	Total
Publications dans des revues à comité de lecture	7	4	11
Manuels de référence	1		1
Rapports scientifiques	6	1	7
Autres documents	4		4
Total	18	5	23

Tableau 5 : Nombre de publications de l'année 2014 émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données.

L'équipe de coordination apporte son soutien aux projets de valorisation émanant d'utilisateurs externes.

- Elle met ses données à disposition gratuitement sur demande et apporte son expertise pour leur utilisation. En 2014, elle a répondu à 25 demandes de données. Le programme ICP Forests a également relayé 10 demandes faites auprès de sa base de données centralisée et concernant des données émanant du réseau RENECOFOR.
- Elle met également à disposition gratuitement ses échantillons archivés (ex : thèse de S. Negro) et ses sites (ex : projet PotenChêne), à condition que les mesures envisagées ne portent pas atteinte aux missions de suivi du réseau RENECOFOR.

Elle contribue à la construction et à la mise en œuvre de projets de recherche.

- Participation au comité de thèse de Sara Negro (le 15/04/2014 à Chambéry) sur la dynamique des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) provenant des pollutions atmosphériques.
- Participation au comité de thèse de Simon Rizzetto (le 02/12/2014 à Toulouse) sur la modélisation de l'impact du changement climatique et des dépôts atmosphériques d'azote sur les cycles biogéochimiques et la flore forestière.
- Participation au projet PotenChêne (potentiel de régénération des chênaies dans le contexte du changement climatique: quel avenir pour le masting et les consommateurs de glands ?), retenu dans le cadre du programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » (réunion de lancement le 09/10/2014 à Lyon) (projet soutenu par le Département RDI de l'ONF).
- Participation au projet ENFORME (essENces FORestières en MElange : contribution à la qualité biologique et fonctionnelle des sols), placé sur la liste complémentaire du programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » et finalement non retenu.
- Participation au projet piCaSo (pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers), dans le cadre du programme REACCTIF 2 (réunion de lancement le 26/11/2014 à Paris).
- Participation au projet INSENSE (Indicateurs de sensibilité des écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse) dans le cadre du programme REACCTIF 2 : contribution à la constitution d'une base de données de sol à partir de différentes sources de données nationales (projet soutenu par le Département RDI de l'ONF).
- Participation à la rédaction du rapport final du projet SESAME (20 ans de mesureS des retombEes AtMosphériquEs en France) dans le cadre du programme PRIMEQUAL 2 (Pascaud *et al.*, 2014).

Elle participe à la construction d'outils et d'indicateurs de suivi.

- Participation au projet PASSIFOR (Proposition d'Amélioration du Système de Suivi de la biodiversité FORestière) (Atelier les 26 et 27/08/2014 à Paris).
- Participation à la préparation de l'édition 2015 des Indicateurs de Gestion Durable des forêts françaises métropolitaine.

5. Conclusions

Le réseau RENECOFOR est un outil de suivi des écosystèmes forestiers unique en France. Son organisation basée sur la contribution d'environ 250 agents de l'ONF et de multiples partenaires externes a permis encore en 2014 de mener à bien les tâches prévues dans son calendrier d'activité. Les travaux de valorisation des données apportent des résultats inédits sur les variations spatiales et temporelles de différents paramètres de suivi des écosystèmes (dépôts atmosphériques, propriétés des sols, diversité fongique et floristique) et contribueront à accroître les potentialités d'utilisation du réseau. L'équipe de coordination veille à apporter l'appui nécessaire aux projets de valorisation émanant d'utilisateurs externes et s'attache à améliorer progressivement la visibilité du réseau sur Internet.

A la suite de sa 2^{ème} évaluation scientifique en 2013, l'avenir à court terme du réseau reste cependant suspendu à la redéfinition de ses moyens et de ses missions pour les prochaines années.

6. Bibliographie

6.1. Publications émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données en 2014

- ACRI-ST, 2014 : Impact de l'ozone et du changement climatique sur les forêts françaises et italiennes. Définition de nouveaux critères et seuils de protection des forêts méditerranéennes. Rapport du projet LIFE FO3REST, 38 p.
- Asse D., Michelot-Antalik A., Landmann G., 2014. Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt. Paris : ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt - GIP ECOFOR. Rapport final, 102 p.
- Cecchini S.**, 2014. La placette d'observation RENECOFOR en forêt de Moulière (CHS 86) : période d'observation 1992-2012. Coll. « Synthèse RENECOFOR ». Fontainebleau : ONF. Département recherche et développement. 4 p.
- Cecchini S.**, 2014. La placette d'observation RENECOFOR en forêt de Lugny (HET 21) : période d'observation 1992-2007. Coll. « Synthèse RENECOFOR ». Fontainebleau : ONF. Département recherche et développement. 4 p.
- Cecchini S., Croisé L., Macé S., Nicolas M.**, 2014 : Manuel de référence n°2 - méthodes de mesure des paramètres dendrométriques, 3ème version. Editeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, Département recherche, développement et Innovation, 83 p.
- CITEPA, 2014 : Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. 294 p. + annexes
- Eglin T., Martin M., Maurice D., **Nicolas M.**, Perrier C., Buitrago M., Landmann G., in press. Mobiliser et valoriser les données sur les sols forestiers. *Revue Forestière Française*, LXVI.
- Eglin T., Martin M., Maurice D., **Nicolas M.**, Perrier C., Buitrago M., Landmann G., 2014. Collecting and using data on forest soils. *Revue Forestière Française*, Special Issue, "REGEFOR 2013 WORKSHOPS - Is the management of forest soil fertility at a turning point?" DOI : 10.4267/2042/56274
- Ferretti M., **Nicolas M.**, Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., **Croisé L.**, Frati L., **Lanier M.**, Maccherini S., Santi E., **Ulrich E.**, 2014: Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. *Forest Ecology and management*, 311: 56-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.009>
- Gaudio N., Belyazid S., Gendre X., Mansat A., **Nicolas M.**, Rizzetto S., Sverdrup H., Probst A., in press. Combined effect of atmospheric nitrogen deposition and climate change on temperate forest soil biogeochemistry: A modeling approach. *Ecological Modelling*. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.10.002 (publié en ligne le 16/10/2014)
- Guillemot J., Delpierre N., Vallet P., François C., Martin-StPaul N.K., Soudani K., **Nicolas M.**, Badeau V., Dufrêne E., 2014 : Assessing the effects of management on forest growth across France: insights from a new functional-structural model, *Annals of Botany*, doi: 10.1093/aob/mcu059

- Jonard M., Fürst A., Verstraeten A., Thimonier A., Timmermann V., Potočić N., Waldner P., Benham S., Hansen K., Merilä P., Ponette Q., de la Cruz A.C., Roskams P., **Nicolas M., Croisé L.**, Ingerslev M., Matteucci G., Decinti B., Bascietto M., Rautio P., in press : Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12657 (publié en ligne le 21/07/2014)
- Nicolas M.**, Jolivet C., Jonard M., in press. L'apport des dispositifs de suivi vis-à-vis des enjeux de fonctionnement et de gestion des écosystèmes en relation avec les sols. *Revue Forestière Française*, LXVI.
- Nicolas M.**, Jolivet C., Jonard M., 2014. How monitoring networks contribute to the understanding and to the management of soil and forest ecosystems? *Revue Forestière Française*, Special Issue, "REGEFOR 2013 WORKSHOPS - Is the management of forest soil fertility at a turning point?" DOI : 10.4267/2042/56268
- Office national des forêts, 2014 : Suivi annuel des glissements de Boège et de la Chandouze. 11p. + annexes
- Pascaud A., Sauvage S., Wroblewski A., Coddeville P., Probst A. , Mansat A., Roustant O., **Croisé L., Nicolas M.**, Mezdoor A., 2014 : 20 ans de mesureS des retombEeS AtMosphériquEs en France (SESAME), Rapport de fin de contrat du programme PRIMEQUAL 2, Mines Douai, 117 p.
- Richard B., 2014 : RENECOFOR - Analyse des données de suivi de la flore fongique, rapport final de la convention ONF-Université de Rouen, 250 p.
- Saenger A., Jonard M., Ponette Q., **Nicolas M.**, 2014 : Détection et quantification des changements temporels des caractéristiques des sols forestiers du réseau RENECOFOR (Période 1993 – 2012), Rapport final de la convention ONF-UCL, 73 p.
- Saenger A., Jonard M., Ponette Q., **Nicolas M.**, 2014 : Evolution temporelle de la densité apparente des sols forestiers du réseau RENECOFOR, Rapport préliminaire de la convention ONF-UCL, 32 p.
- Saint-André L., **Nicolas M.**, Jonard M., Derrien D., 2014: YASSO07 applied to RENECOFOR Plots (France). Final report. 22 p.
- Suz L.M., Barsoum N., Benham S., Dietrich H.P., Fetzner K.D., Fischer R., Garcia P., Gehrman J., Kristöfel F., Manninger M., Neagu S., **Nicolas M.**, Oldenburg J., Raspe S., Sanchez G., Schröck H.W., Schubert A., Verheyen K., Verstraeten A., Bidartondo M.I., 2014. Environmental drivers of ectomycorrhizal communities in Europe's temperate oak forests. *Molecular Ecology*, 23 (22): 5628-5644 DOI: 10.1111/mec.12947
- Veresoglou S.D., Peñuelas J., Fischer R., Rautio P., Sardans J., Merilä P., Tabakovic-Tosic M., Rillig M.C., 2014: Exploring continental-scale stand health - N : P ratio relationships for European forests. *New Phytologist*, 202(2): 422-30, doi: 10.1111/nph.12665.
- Waldner P., Marchetto A., Thimonier A., Schmitt M., Rogora M., Granke O., Mues V., Hansen K., Pihl Karlsson G., Žlindra D., Clarke N., Verstraeten A., Lazdins A., Schimming C., Iacoban C., Lindroos A.J., Vanguelova E., Benham S., Meesenburg H., **Nicolas M.**, Kowalska A., Apuhtin V., Napas U., Lachmanová Z., Kristoefel F., Bleeker A., Ingerslev M., Vesterdal L., Molina J., Fischer U., 2014 : Detection of

temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. *Atmospheric Environment*, 95: 363-374, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.054

6.2. Communications orales en 2014

Nicolas M., 2014 : Résumé des apports du réseau RENECOFOR au suivi de la biodiversité. Communication orale. 8 diapositives. Atelier PASSIFOR, 27 août 2014, Paris.

Nicolas M., 2014 : Présentation du réseau RENECOFOR. Communication orale. 10 diapositives. Réunion de lancement du projet piCaSo, 26 novembre 2014, Paris.

Nicolas M., 2014 : Quelques résultats récents du réseau RENECOFOR. Communication orale. 21 diapositives. Comité de thèse de Simon Rizzetto, 2 décembre 2014, Toulouse.

Nicolas M., Jolivet C, Jonard M., 2014 : L'apport des dispositifs de suivi pour la réponse aux questions prégnantes sur les sols. Communication orale. 17 diapositives. Journées d'étude des sols, 3 juillet 2014, Chambéry.

Nicolas M., Pascaud A., **Croisé L.**, Brommundt J., Mettier R., Ammann L., Sauvage S., Mansat A., Probst A., 2014 : Estimations of N deposition impacts may be improved through deposition maps: comparing two independent approaches for mapping bulk deposition at French scale. Oral communication. 16 slides. ICP Forest Task Force meeting: 3rd Scientific conference, 27th may 2014, Athens.

6.3. Autres références citées

Agnan Y., 2013 : Bioaccumulation et bioindication par les lichens de la pollution atmosphérique actuelle et passée en métaux et en azote en France : sources, mécanismes et facteurs d'influence. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 306 p.

Augusto L., Bastien C., Dufrêne E., Farcy C., Hervé J.-C., Jactel H., Pannatier E., 2013 : 2ème Evaluation du Réseau National de suivi à long terme des ÉCOsystèmes FOREstiers (RENECOFOR), 40 p.

Barthod C., 1994 : Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Revue Forestière Française*, 46, 5 : 564-571.

Biot Y., Landmann G. 2008 : Quelles évolutions possibles pour RENECOFOR ? Une analyse basée sur les résultats d'une évaluation scientifique. *Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n°4 "15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR"* : 154-158.

Corriol G., Mayet P., 2006: RENECOFOR – suivi de la composition mycologique des placettes du réseau – synthèse de la première réunion d'intercalibration (23-25/9/2004) en vue d'un programme d'assurance qualité. *Rapport du Conservatoire botanique pyrénéen*, 23 p

Croisé L., Ulrich E., Duplat P., Jacquet O., 2005 : Two independent methods of mapping bulk deposition in France. *Atmospheric Environment*, 39 : 3923-3941.

- Jonard M., André F., Dambrine E., Ponette Q., Ulrich E., 2009: Temporal trends in the foliar nutritional status of the French, Walloon and Luxembourg broad-leaved plots of forest monitoring. *Annals of Forest Science*, 66 : DOI: 10.1051/forest/2009014.
- Jonard M., Caignet I., Ponette Q., Nicolas M., 2013 : Evolution du carbone des sols forestiers de France métropolitaine – Détection et quantification à partir des données mesurées sur le réseau RENECOFOR. Rapport final d'étude subventionnée par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 55 p + annexes de 304 p
- Landmann G., Bonneau M. (Eds.) 1995 : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains. Berlin (Allemagne), Springer - pp. 233-258 - ISBN 3-540-58874-4
- Moreau P.-A., Daillant O., Corriol G., Gueidan C., Courtecuisse R., 2002 : RENECOFOR – Inventaire des champignons supérieurs et des lichens sur 12 placettes du réseau et dans un site atelier de l'INRA/GIP ECOFOR – résultats d'un projet pilote. Editeur : Office national des forêts, Département recherche et développement, ISBN 2-84207-244-8, 146p.
- Pascaud A., 2013 : Déterminants des évolutions spatio-temporelles des retombées atmosphériques acidifiantes et eutrophisantes en France et élaboration d'un modèle de projection. Thèse de Doctorat, Mines Douai, Université Lille1, 291 p.
- Ulrich E., 2000 : RENECOFOR, 8ème bilan technique et financier et bilan des dégâts des tempêtes de décembre 1999. Editeur : Office national des forêts, Département recherche et développement, 30 p.

Crédit photographique (couverture)

Sébastien Macé (en haut à gauche), Nathalie Petrel (en haut à droite),
Valérie Trevedy-Bénard (en bas)

Légendes des photos de la couverture

En haut à gauche : Mesure de circonférence à l'occasion de l'inventaire dendrométrique
de la placette EPC 81 en novembre 2014

En haut à droite : Mesure de hauteur à l'occasion de l'inventaire dendrométrique
de la placette DOU 23 en janvier 2015

En bas : Réunion d'information pour les responsables et suppléants des placettes
de niveaux A2 et A3 (sous-réseau CATAENAT) en avril 2014 à Quillan

Exemplaires imprimés : 400

Imprimerie ONF – Fontainebleau



Direction forêts et risques naturels

Réseau RENECOFOR

Site WEB : <http://www.onf.fr/renecofofr>

Boulevard de Constance - 77300 Fontainebleau

Tél. : +33 (0) 1 60 74 92 28

Méls : manuel.nicolas@onf.fr ; luc.croise@onf.fr ; sebastien.mace@onf.fr ;
sebastien.cecchini@onf.fr ; valerie.trevedy@onf.fr