

Bilan technique de l'année 2016



Avril 2017



Ce document est à citer sous la forme suivante :
NICOLAS M., CECCHINI S., CROISE L., MACE S., 2017 : RENECOFOR – Bilan technique de l'année 2016.
Editeur : 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 2016

Auteurs : Manuel NICOLAS
Sébastien CECCHINI
Luc CROISÉ
Sébastien MACÉ

Programme soutenu financièrement par :

- le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
- le ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
- l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- l'Office national des forêts

Avril 2017

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

Sommaire

| | |
|---|----|
| Résumé..... | ii |
| 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 et gouvernance | 4 |
| 1.4. Evaluation scientifique | 4 |
| 2. Activités de l'année 2016..... | 5 |
| 2.1. Réalisation du programme de mesures..... | 5 |
| 2.2. Mise en place du suivi annuel de la croissance des arbres observation..... | 7 |
| 2.3. Fonctionnement du réseau..... | 8 |
| 2.3.1. Réflexions stratégiques..... | 8 |
| 2.3.2. Réunion d'information annuelle du réseau..... | 9 |
| 3. Evaluation de la qualité des mesures : les matériels de collecte des dépôts atmosphériques influencent-ils leur contenu chimique ? | 11 |
| 4. Valorisation du réseau RENECOFOR | 19 |
| 4.1. Recensement des productions documentaires | 19 |
| 4.2. Principaux résultats publiés | 19 |
| 4.2.1. Suivre et comparer l'évolution des dépôts atmosphériques | 19 |
| 4.2.2. Suivre la dynamique de drainage du carbone organique dissous | 20 |
| 4.2.3. Simuler les effets combinés du changement climatique et des retombées polluantes sur les écosystèmes forestiers | 20 |
| 4.2.4. Mieux connaître la disponibilité du phosphore dans les sols | 21 |
| 4.2.5. Comprendre les variations de la fructification des arbres forestiers..... | 21 |
| 4.2.6. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines | 22 |
| 4.3. Atelier autour du carbone des sols du réseau RENECOFOR..... | 23 |
| 4.4. Contribution de l'équipe de coordination aux valorisations externes | 25 |
| 5. Conclusions..... | 25 |
| 6. Bibliographie..... | 28 |
| 6.1. Publications émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données..... | 28 |
| 6.2. Communications orales en 2016 | 30 |
| 6.3. Autres références citées..... | 31 |
| 7. Annexes..... | 33 |

Résumé

Pluies acides, changement climatique, érosion de la biodiversité : depuis plusieurs décennies, les évolutions de l'environnement suscitent de vives inquiétudes pour l'avenir des forêts. Leur gestion durable nécessite de pouvoir détecter, comprendre et anticiper les effets de ces changements.

Depuis 1992, le réseau RENECOFOR observe l'évolution des écosystèmes forestiers sur une centaine de sites permanents répartis en France métropolitaine et faisant partie d'un réseau plus vaste à l'échelle européenne. La comparabilité des observations s'appuie sur des protocoles stables et adaptés à des contextes contrastés. Elle repose également sur une organisation fonctionnelle associant la contribution des agents de l'ONF présents localement à l'expertise de chercheurs et d'autres partenaires externes. Les données collectées :

- constituent une source d'information précieuse sur les variations de nombreux paramètres-clés, voire une source d'information unique à l'échelle nationale pour certains d'entre eux (ex : phénologie des arbres, nutrition foliaire),
- permettent de mettre en évidence des tendances, parfois inattendues,
- aident à comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers et leur sensibilité aux changements environnementaux, par le recoupement des paramètres observés et en servant de support au développement de modèles de recherche.

En 2016, les résultats collectés ont servi à renseigner les indicateurs de gestion durable des forêts françaises (dépôts atmosphériques, carbone et fertilité des sols, santé des arbres). Par ailleurs les articles scientifiques publiés montrent leur utilité pour identifier les facteurs d'influence et modéliser les processus régissant notamment les variations de la fructification des arbres, ou encore la dynamique du carbone dans les sols forestiers. Ils montrent aussi l'intérêt des sites et des échantillons archivés comme supports d'autres recherches, pour mieux évaluer par exemple la disponibilité du phosphore (nutriment majeur) contenu dans les sols.

En plus des activités courantes d'observation et de maintenance, le dispositif implique une démarche d'amélioration continue. Il s'agit notamment de vérifier la comparabilité des données collectées sur le long terme, ici en quantifiant expérimentalement l'influence des matériels de collecte sur la chimie des échantillons de dépôts atmosphériques. En outre, le déploiement d'un nouveau protocole a été entamé pour compléter le suivi annuel de la phénologie et de l'état de santé d'arbres-observation par un suivi annuel de leur croissance. Pour cela, des dendromètres permanents ont été installés sur les arbres-observation de 55 placettes, les autres devant suivre en 2017. Au total, ce sont plus de 3 400 arbres sur lesquels ces différents paramètres pourront être suivis conjointement, en réponse en particulier aux variations météorologiques.

En 2017, RENECOFOR aura 25 ans. Bien qu'encore très jeune au regard du cycle de vie des forêts, son ancienneté en fait déjà une chronique d'observation remarquable, qui aura permis d'acquérir de nombreuses connaissances inédites. Cependant ces connaissances révèlent aussi davantage la complexité du fonctionnement des écosystèmes et les défis scientifiques qu'il reste à relever pour pouvoir anticiper les effets des changements globaux.

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 (le dernier ayant été « Forest Focus »). Des 3 réseaux français de surveillance, qui ont été établis de manière cohérente, RENECOFOR est celui qui collecte le plus grand nombre de mesures et 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). Son programme a été prévu initialement dans une perspective minimale de 30 années de suivi.

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.

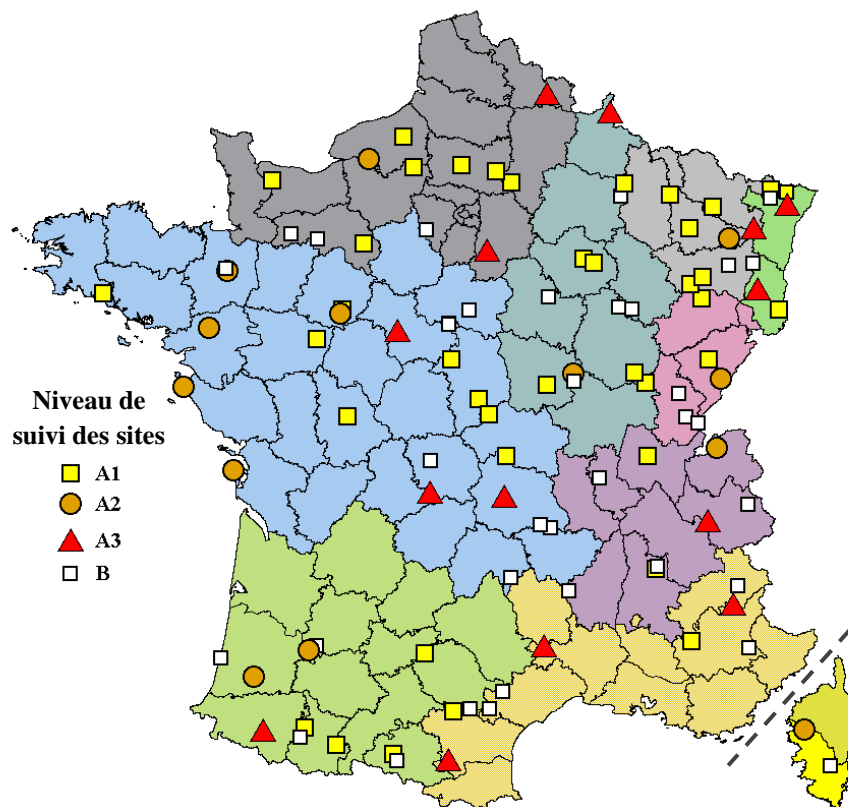


Figure 1 : Emplacement des 102 sites du réseau RENECOFOR au sein du découpage territorial de l'ONF. Le niveau des sites (4 modalités) correspond à l'intensité de leur suivi définie depuis la métamorphose du réseau en 2008. Le sous-réseau CATAENAT correspond aux sites suivis le plus intensivement, c'est-à-dire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

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

1.2. Organisation du réseau RENECOFOR

Le réseau est constitué de 102 sites permanents (Figure 1), localisés à une altitude variant de 5 à 1850 mètres et répartis de manière à représenter les principaux types de forêt de production par essence dominante (Chênes, Douglas, Epicéa, Hêtre, Mélèze, Pins et Sapin). Chaque site 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 sites parmi les 102 sites du réseau RENECOFOR (Figure 1), pour lesquelles des activités intensives de suivi de la pollution atmosphérique sont effectuées depuis 1992 :

- sur 13 sites (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 sites (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 son contrat d'objectifs et de performance. Il est coordonné au sein de son Département recherche, développement et innovation (RDI) 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 et gouvernance

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'Environnement, de l'Energie et de la Mer (MEEM) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

Depuis 2015, le réseau est accompagné dans ses orientations et dans sa valorisation par un Comité de pilotage scientifique. Ce comité comprend des représentants des bailleurs de fonds et un panel d'experts couvrant les différents domaines de compétence du réseau et représentant la diversité institutionnelle de ses partenaires scientifiques.

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 l'arrêt 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 2016

2.1. Réalisation du programme de mesures

Dans l'attente d'une nouvelle négociation entre les bailleurs de fonds du réseau RENECOFOR (ONF, MAAF, MEEM, 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 prévues en 2016 a été réalisé. Avec 2016 s'est achevée une période de 5 ans de mesure de l'ozone (mesures de concentrations dans l'air, et observation des symptômes induits sur les arbres et la végétation de lisière) initiée en 2012. En effet, depuis 2008, le suivi de l'ozone est prévu de manière intermittente, en alternant des périodes de 5 ans de mesure avec des périodes de 5 ans d'arrêt des mesures. En revanche, l'année 2016 aura marqué le début du suivi annuel de la croissance des arbres observation à l'aide de dendromètres sur 55 sites (installation à poursuivre et terminer sur l'ensemble du réseau en 2017).

| Sujet/année | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Observations |
|--|------|-------------|------|-------------|------|-------------------|
| Actions de fond | | | | | | |
| Evaluation des données du réseau et publications | | | | | | Action en continu |
| Développement du site Web du réseau | | | | | | Action en continu |
| Réunions d'information plénières | | | | | | |
| Réunions d'information CATAENAT | | | | | | |
| Colloque | | | | | | |
| Comité de pilotage scientifique | | | | | | |
| Collectes de données sur tous les sites (ensemble des niveaux A1+A2+A3+B) | | | | | | |
| Echantillonnage des sols | | | | | | |
| Observations sanitaires | | | | | | |
| Inventaire des placettes passant en éclaircie | | | | | | Action en continu |
| Observations phénologiques | | | | | | |
| Maintenance des placettes | | | | | | Action en continu |
| Echantillonnage foliaire | | 14 sites A3 | | 14 sites A3 | | |
| Suivi de croissance annuel des arbres observation | | | | 55 sites | | |
| Inventaire dendrométrique quinquennal | | | | | | |
| Inventaire floristique quinquennal | | | | | | |
| 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 | | | | | | |

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'installation de dendromètres permanents pour le suivi annuel de la croissance des arbres-observation (photographies par Luc Croisé).

En haut : pose d'un dendromètre sur le bandeau de mesure de la circonférence à 1,30 m.

Au milieu : vue sur le système de lecture d'un dendromètre (vernier). La mesure est ici de 53,52 π cm (unité équivalente au diamètre). Le protocole prévoit une décomposition en 3 étapes (au cm, au mm, puis au dixième de mm) pour éviter les erreurs de lecture et de saisie.

En bas : après installation, première lecture avec intercomparaison entre opérateurs.



2.2. Mise en place du suivi annuel de la croissance des arbres observation

Suivre et comprendre la réaction des arbres aux variations environnementales est un enjeu central pour le monitoring forestier. A la fin des années 1980, la mise en place de ce monitoring a notamment été motivée par la crainte d'un dépérissement massif des arbres sous l'effet des « pluies acides ». Et aujourd'hui encore, face à l'évolution du climat, leur capacité de résistance et d'adaptation nourrit beaucoup d'interrogations et de craintes pour l'avenir de la forêt.

Le réseau RENECOFOR contribue à ce suivi de manière originale, pour plusieurs raisons.

- Il suit la réaction des arbres à l'aune d'une diversité de paramètres, à l'échelle d'arbres individuels (état sanitaire, croissance, phénologie) et à l'échelle du peuplement (nutrition foliaire, chutes de litière, inventaires dendrométriques en plein). En effet l'adaptation des arbres aux conditions environnementales dépend de leur capacité à la fois à survivre, à croître, et à se reproduire. Et l'évaluation de ces différentes capacités peut parfois aboutir à des résultats paradoxaux, à l'image des sapins des Vosges qui, dans les années 1980, ont présenté un développement simultané de symptômes foliaires (pertes foliaires, jaunissement) et de leur croissance radiale (Becker *et al.*, 1995).
- Il permet d'observer des différences de réaction au sein du peuplement, grâce à un effectif suffisant d'arbres observés individuellement. Par exemple, les dates de débourrement puis de sénescence des feuilles, observées en détail depuis 2009 pour chacun des 36 arbres-observation de chaque placette, montrent que les individus les plus précoces tendent à rester les mêmes d'une année à l'autre, et que cette précocité peut être corrélée dans certains cas à leur croissance (Delpierre *et al.*, 2017).
- Son suivi de la réaction des arbres s'inscrit à l'échelle plus vaste de l'écosystème forestier. Cela permet notamment de rechercher les principaux facteurs corrélés à cette réaction, parmi un vaste ensemble de paramètres environnementaux. Par exemple, l'évolution temporelle du déficit foliaire des arbres a pu être reliée de manière prépondérante aux variations annuelles de facteurs hydriques et de la densité de peuplement, et aucunement à celles de la température ou encore de la nutrition foliaire (Ferretti *et al.*, 2014).

Cependant, pour évaluer la réponse des arbres aux variations climatiques, il importe que leur suivi soit mené au pas de temps annuel. C'est le cas notamment des observations sanitaires et phénologiques, réalisées ensemble sur les 36 arbres-observation désignés dans la zone centrale de chaque placette. Mais la croissance de ces arbres-observation n'a jusque-là été suivie que dans le cadre des inventaires dendrométriques en plein, c'est-à-dire tous les 5 ou 10 ans. Des prélèvements de carottes de bois ont certes permis d'étudier l'évolution annuelle de la croissance radiale (Lebourgeois, 1997 ; Mérian, 2012), mais ils ont été menés sur d'autres arbres à l'extérieur de chaque placette pour ne pas risquer d'affecter l'état de santé des arbres-observation. En outre, la mesure de la circonférence au ruban, telle que pratiquée lors des inventaires dendrométriques, s'est révélée trop peu précise pour pouvoir suivre la croissance des arbres-observation au pas de temps annuel (Cluzeau *et al.*, 1998). L'installation de dendromètres permanents doit donc enfin permettre de mesurer chaque année de manière fiable l'accroissement courant de ces arbres, en complément de leurs suivis sanitaire et phénologique.

Un dendromètre permanent est un dispositif fixe ceinturant le tronc d'un arbre et permettant de mesurer sa circonférence. Il est constitué d'une bande graduée maintenue sur le tronc par un ressort, qui lui permet de s'étendre à mesure que l'arbre grossit. Sa précision de mesure tient d'une part à son positionnement fixe, contrairement à un ruban qui doit être replacé sur le tronc à chaque répétition de mesure, et d'autre part à un système de vernier permettant une lecture au dixième de millimètre. Le modèle choisi (UMS/D1) a pour avantages (i) d'exprimer la mesure en équivalent diamètre (π cm), plus explicite pour les forestiers que la circonférence des arbres, et (ii) une capacité d'élongation suffisante pour une durée d'installation de cinq à plus de dix ans (selon la vitesse d'accroissement de l'arbre).

Avant d'être déployé sur le réseau RENECOFOR, le suivi de la croissance des arbres à l'aide de dendromètres permanents a été testé. Un protocole et un outil de saisie des mesures ont été développés dès 2012 (Macé *et al.*, 2012). Leur utilisation a été initiée la même année sur la placette CPS 77, en forêt de Fontainebleau. Le suivi mensuel des arbres-observation de cette placette a confirmé la cohérence des mesures au cours du temps, y compris pour des arbres poussant très lentement (moins d'un millimètre par an en diamètre). Cette première expérience pratique a servi à apporter quelques améliorations au protocole (Macé *et al.*, 2016).

Le déploiement actuel du dispositif vise l'ensemble des placettes du réseau, à l'exception de celles dont le peuplement est entièrement en régénération à la suite des tempêtes de 1999 ou de dégâts de scolytes. En 2016, ce sont 55 placettes qui ont été équipées. Les 40 placettes restantes le seront en 2017. Au final, ce sont environ 3 400 arbres qui seront ainsi instrumentés. Sur chaque placette, l'installation est réalisée par un membre de l'équipe de coordination du réseau, avec l'aide des agents responsable et suppléant(s). Ceux-ci sont également formés à la lecture des dendromètres par la même occasion. Après quoi, un exercice est systématiquement réalisé (sur chaque placette) pour comparer les mesures menées indépendamment par les différents opérateurs présents. Cet exercice permet de repérer d'éventuelles erreurs et d'en rechercher les causes, en revenant sur les arbres concernés. De plus, les données collectées sont saisies informatiquement de manière à constituer un ensemble conséquent à l'échelle de tout le réseau, et qui permettra d'évaluer globalement les incertitudes associées à la lecture des dendromètres, ainsi que la fréquence et l'amplitude des différents types d'erreur identifiés.

2.3. Fonctionnement du réseau

2.3.1. Réflexions stratégiques

En plus de discuter annuellement des activités du réseau RENECOFOR, le comité de pilotage scientifique l'accompagne par une réflexion sur des sujets stratégiques, que l'équipe de coordination contribue à organiser.

En 2016, un atelier de réflexion a notamment été organisé au sujet du système de gestion des données, au cœur du fonctionnement du réseau. Des solutions techniques ont été discutées pour répondre à deux enjeux soulevés lors de la 2^{ème} évaluation (Augusto *et al.*, 2013) :

- organiser le transfert de la base de données vers un outil plus actuel et plus pérenne que le logiciel Paradox utilisé depuis 1992, et ce sans interrompre les activités du réseau ;
- développer progressivement un accès libre et documenté aux données sur Internet, tout d'abord sous forme de publications (data papers), pour favoriser leur valorisation scientifique.

De tels développements demanderont un travail de longue haleine, mais réalisable par étapes.

Un autre atelier est envisagé début 2017 autour des questions de recherche actuelles concernant la biodiversité forestière, et de la manière dont le réseau peut contribuer à y répondre.

2.3.2. 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 aspects de fonctionnement. Elle est également l'occasion de distribuer les matériels spécifiques acquis au plan national suivant les besoins de maintenance des sites.



En 2016, comme tous les deux ans, la réunion d'information a été restreinte aux agents des 27 sites du sous-réseau CATAENAT. Elle s'est tenue à Dammarie-les-Lys (Seine et Marne). Outre les sujets préparés par l'équipe de coordination, des intervenants ont été invités :

- Nicolas Delpierre (Université Paris-Sud), sur la saisonnalité de la croissance du bois, ses déterminants climatiques, et les enjeux associés pour le bilan de carbone forestier,
- Iris Le Roncé (Ecole normale supérieure de Lyon), au sujet de la capacité de la composition de la flore à refléter l'évolution temporelle des propriétés des sols,
- Erwin Ulrich (ONF, ancien responsable du réseau) autour des enjeux de l'optimisation de la mécanisation forestière et des résultats obtenus en recherche et développement.



Illustration : groupe de participants de la réunion d'information du réseau RENECOFOR en 2016 à Dammarie-les-Lys (photographie par Luc Croisé)

Tableau 2 : Caractéristiques des modèles de gouttière testés.

| Type de modèle | Ancien modèle (1992-2017) | Nouveau modèle (2017-) |
|---------------------------------------|--|---|
| Fabricant | NICOLL | ICARE |
| Images |  |  |
| Longueur extérieure (cm) | 217,4 | 200 |
| Largeur extérieure (cm) | 13 | 14,7 |
| Profondeur intérieure (cm) | 10,5 | 11 |
| Surface de collecte (m ²) | 0,282 | |
| Matériau | Polychlorure de vinyle (PVC) | |

3. Evaluation de la qualité des mesures : les matériels de collecte des dépôts atmosphériques influencent-ils leur contenu chimique ?

Suivre l'évolution des écosystèmes forestiers implique de s'assurer de la collecte de données comparables sur le long terme. La qualité des données dépend, entre autres facteurs, des matériels utilisés sur le terrain. Il en va aussi bien des appareils de mesure que des matériels de collecte d'échantillons. En pratique, la perfection n'existe évidemment pas : il s'agit du moins de choisir les matériels les mieux adaptés aux besoins scientifiques, aux exigences pratiques et aux capacités budgétaires. Il importe donc d'être en mesure de considérer les difficultés pratiques et les incertitudes induites par ces matériels, lors de leur choix et jusqu'au moment d'interpréter les résultats de mesure.

Entre autres mesures, le réseau RENECOFOR suit, depuis sa création, les retombées de polluants atmosphériques subies par les écosystèmes forestiers. Pour ce faire il prélève et analyse notamment des échantillons de pluviollessivats – c'est-à-dire les précipitations ayant traversé le couvert des arbres – sur un sous-ensemble de placettes permanentes (sous-réseau CATAENAT) (Ulrich et Lanier, 1993). Au sein de chacune de ces placettes, ces précipitations sont collectées au moyen de gouttières en polychlorure de vinyle (PVC), telles que celles utilisées dans le secteur du bâtiment. Cependant leurs propriétés pour cet usage n'ont été que partiellement évaluées. La diversité des dispositifs de collecte des dépôts atmosphériques à l'échelle européenne a déjà permis la réalisation d'essais comparatifs pour évaluer les différences de quantité de dépôts collectés (Draaijers *et al.*, 2001 ; Žlindra *et al.*, 2011). Quant à l'absence d'influence du matériau (PVC) sur la chimie des solutions qui s'y écoulent, elle a pu être vérifiée pour des éléments-traces métalliques (Gandois, 2009). Mais elle n'a pas été évaluée pour les paramètres majeurs analysés couramment, ou du moins aucun test ne semble avoir été documenté à ce sujet. Or, si le choix de ces matériels lors de la création du réseau en 1992 a pu s'appuyer sur l'expérience précédente des chercheurs impliqués dans le programme DEFORPA (Landmann et Bonneau, 1995), les concentrations de plusieurs espèces chimiques ont nettement diminué depuis dans les pluviollessivats (Nicolas, 2015) : à leur niveau actuel elles pourraient être devenues sensibles à d'éventuelles contaminations – même en faibles quantités – qui pouvaient être considérées comme négligeables il y a 25 ans.

L'opportunité de tester aujourd'hui les propriétés des gouttières de collecte de pluviollessivats tient également au besoin de les remplacer par de nouveaux matériels. En effet, les gouttières en place sur le terrain datent pour beaucoup de l'installation des placettes en 1992 et deviennent vieillissantes. Certains exemplaires ont dû être remplacés à la suite de dégâts de tempêtes, de chutes de branches ou de grêle. Cependant, alors que les stocks de matériel de rechange ont été presque épuisés, le modèle utilisé jusqu'ici n'est plus disponible à la vente et aucun équivalent (gouttière de section symétrique à bords verticaux) n'a été trouvé dans le commerce. En 2014, la société ICARE (qui avait déjà conçu d'autres matériels pour le réseau RENECOFOR, comme ses collecteurs de chutes de litière) a été sollicitée pour concevoir un nouveau modèle de gouttière de collecte de pluviollessivats en PVC. La fourniture de trois prototypes de ce nouveau modèle a été l'occasion de réaliser des essais expérimentaux, en comparaison d'exemplaires restants du modèle utilisé jusqu'ici.

Illustrations de l'évaluation expérimentale de l'influence des gouttières de collecte sur la chimie des échantillons de dépôts atmosphériques (photographies par Sébastien Macé).

En haut : vue d'ensemble du dispositif du premier essai (2015). **En bas à gauche :** simulation d'un événement pluvieux sur une gouttière par pulvérisation d'une solution-test. **En bas à droite :** récupération de la solution-test aspergée à l'exutoire d'une gouttière.



Les objectifs de ces essais ont été :

- de tester les améliorations pratiques apportées au nouveau modèle (facilité et rapidité des opérations de nettoyage réalisées toutes les semaines par les agents de terrain),
- et surtout d'évaluer l'influence de ces matériels (ancien et nouveau modèles) sur le contenu chimique de précipitations simulées par l'aspersion de plusieurs solutions-test.

Le premier essai a été mené en 2015 sur les gouttières encore non usagées (trois exemplaires de chacun des deux modèles). Le second a été réalisé en 2016 sur les mêmes gouttières après 6 mois d'exposition aux pluviollessivats (délai prescrit dans le protocole avant d'entamer les premières mesures), ainsi que sur les gouttières installées environ 15 ans auparavant dans la placette CPS 77, à Fontainebleau. Chaque essai a fait l'objet d'un compte rendu (Nicolas et *al.*, 2016b ; in prep). Nous en proposons ici une synthèse.

Matériels et méthodes

Pour évaluer l'influence des gouttières sur la chimie des dépôts atmosphériques, le protocole a visé à reproduire les conditions usuelles de contact entre les gouttières et les échantillons collectés. Le principe a été de simuler un événement pluvieux en aspergeant à l'aide d'un pulvérisateur une solution-test (de composition donnée) sur chaque gouttière à tester, puis de recueillir cette solution à son exutoire, dans un flacon surmonté d'un entonnoir. Trois solutions-test ont été utilisées :

- de l'eau déminéralisée, c'est-à-dire avec des concentrations chimiques nulles (objectif : détecter d'éventuelles contaminations en condition de neutralité),
- de l'acide citrique (objectif : détecter d'éventuelles contaminations en condition proche de l'acidité maximale mesurée dans les pluviollessivats),
- de l'eau de Volvic (eau minérale naturelle de qualité chimique stable), présentant des concentrations en cations et anions non nulles et proches de celles des pluviollessivats (objectif : détecter d'éventuelles rétention d'éléments).

Au préalable, chaque solution-test a été homogénéisée et a fait l'objet de prélèvements (blancs) issus directement de son contenant d'origine, mais aussi à l'exutoire du pulvérisateur et de l'entonnoir en polyéthylène utilisés lors des manipulations. Au cours de l'essai, chaque gouttière a fait l'objet de deux aspersion successives avec chaque solution-test : la première pour rinçage, la seconde pour le recueil de l'échantillon à analyser.

Tous les échantillons recueillis ont été analysés pour l'ensemble des paramètres habituellement mesurés sur les échantillons de pluviollessivats (détail des paramètres et méthodes d'analyse dans le Tableau A1 en annexe). Ils ont été étiquetés avec des numéros aléatoires avant d'être transmis au laboratoire d'analyse (SOCOR) de manière à éviter tout biais dans leur traitement.

Quelques différences sont à noter entre les deux essais. Lors du second (2016), l'eau de Volvic n'a pas été réutilisée car aucune influence notable des gouttières n'avait été observée en 2015 sur cette solution-test. En outre, la solution d'acide citrique utilisée lors de ce second essai s'est avérée moins concentrée (pH 4,6) que lors du premier (pH 4), ce qui ne permet

malheureusement pas de comparaison directe entre les deux. Elle représente néanmoins une modalité nettement acide par rapport aux pluviollessivats collectés sur les placettes du sous-réseau CATAENAT (moins de 8 % des échantillons analysés entre 1993 et 2015 présentent un pH inférieur à 4,6).

Tableau 3 : Synthèse des changements observés dans les solutions-test après aspersion sur les gouttières en PVC, à l'état non usagé (1^{er} essai) et après 6 mois et 15 ans d'exposition sous couvert forestier (2^{ème} essai). Les indications « + » et « - » correspondent à des changements de valeur respectivement à la hausse ou à la baisse à l'exutoire des gouttières. Les indications entre parenthèses correspondent à des effets détectés mais de faible amplitude. Les cases colorées correspondent aux effets non négligeables.

| Paramètre chimique | Gouttières PVC non usagées (1 ^{er} essai) | Après 6 mois sous couvert forestier (2 ^{ème} essai) | Après 15 ans sous couvert forestier (2 ^{ème} essai) | Remarques |
|---------------------------|--|--|--|---|
| pH | + | (+) | (+) | Effet sur solution acide uniquement |
| Alcalinité totale | + | 0 | 0 | Effet sur solution acide et eau déminéralisée |
| Carbone organique dissous | - | (-) (Résultats peu concluants) | | Effet sur solution acide uniquement |
| Conductivité électrique | - | (-) | (-) | Effet sur solution acide uniquement |
| Chlorures | 0 | 0 | 0 | |
| Nitrates | 0 | 0 | 0 | |
| Sulfates | 0 | 0 | 0 | |
| Ammonium | 0 | 0 | 0 | |
| Azote total | 0 | 0 | 0 | |
| Calcium | + | (+) | (+) | Effet sur solution acide et eau déminéralisée |
| Magnesium | (+) | (+) | (+) | |
| Phosphore total | 0 | 0 | 0 | |
| Potassium | (+) | 0 | 0 | |
| Sodium | (+) | 0 | 0 | |
| Orthophosphates | 0 | 0 | 0 | |
| Aluminium | 0 | 0 | 0 | Effet de rétention non testé |
| Fer | 0 | 0 | 0 | (contamination uniquement) |
| Manganèse | 0 | (+) | (+) | |

Résultats

Le Tableau 3 synthétise les effets des gouttières constatés sur la chimie des échantillons collectés, à l'issue des deux essais. L'ensemble des résultats chiffrés est présenté en annexes (Tableaux A2 et A3). La Figure 1 illustre leur interprétation sur l'exemple du calcium mesuré dans la solution-test d'eau déminéralisée.

De manière générale, les effets sont indétectables ou d'amplitude négligeables pour la plupart des paramètres : Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, N total, P total. On remarque notamment l'absence de contamination en chlore (Cl^-), constituant majeur du PVC. En revanche, à l'état non usagé, les gouttières des deux modèles ont d'autres effets :

- une contamination en calcium non négligeable de l'eau déminéralisée (en moyenne +0,16 mg/l), et plus importante encore de l'acide citrique à pH 4 (jusqu'à +0,85 mg/l pour le nouveau modèle, soit une valeur supérieure à celle de 26 % des échantillons de pluviollessivats collectés depuis 1992),
- une certaine neutralisation de l'acidité se traduisant par une augmentation du pH de la solution-test d'acide de manière systématique (entre +0,3 et +0,5), et surtout de l'alcalinité (quasi doublement des valeurs moyennes dans la solution acide et dans l'eau déminéralisée).

Cependant ces effets s'estompent fortement après 6 mois d'exposition des gouttières aux pluviollessivats, jusqu'à devenir négligeables.

- La contamination en calcium devient quasiment indétectable par rapport à la solution-test d'eau déminéralisée, et reste à un niveau négligeable avec l'acide citrique à pH 4,6 (+0,07 mg/l au maximum).
- L'effet neutralisant n'est plus évident. Le pH 4,6 de la solution d'acide devient un peu supérieur à l'exutoire des gouttières (en moyenne +0,2) mais de manière non systématique. Et surtout, aucun effet n'est décelable sur l'alcalinité des deux solutions-test d'acide citrique et d'eau déminéralisée.

Une hypothèse d'explication pourrait être l'utilisation d'additifs dans la production du PVC des gouttières, qui peuvent comprendre des sels de carbonate de calcium. Ces sels pourraient se dissoudre sous l'effet des précipitations jusqu'à ne plus avoir d'effet après 6 mois.

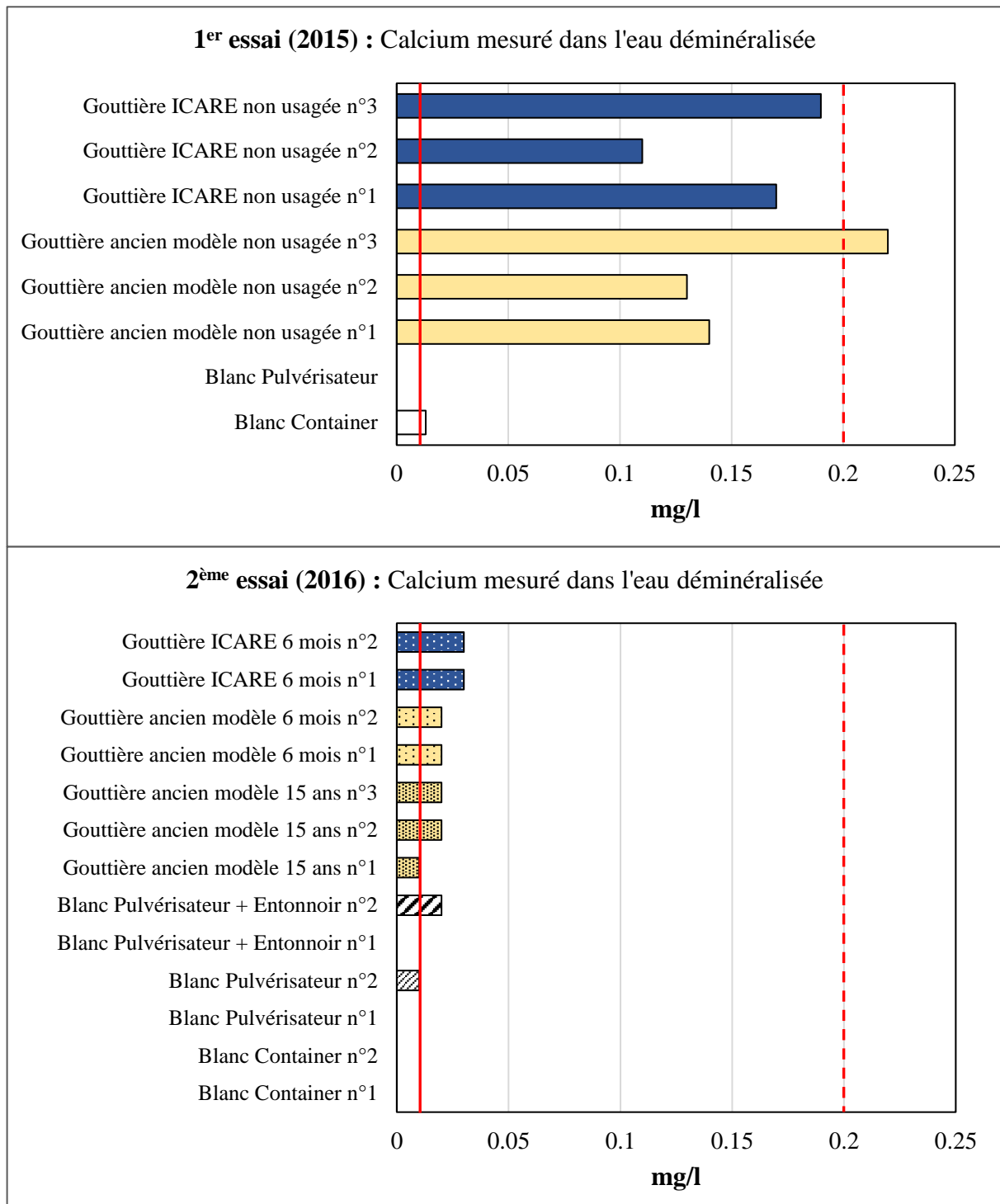
De plus, les gouttières pourraient exercer une rétention du carbone organique dissous. Le premier essai montre en effet une diminution notable de la concentration en carbone organique dissous de la solution-test d'acide citrique à pH 4. Le plus grand nombre de blancs prélevés lors du second essai permet cependant de constater que cette diminution pourrait aussi être due, au moins en partie, aux effets du pulvérisateur et de l'entonnoir en polyéthylène utilisés lors des manipulations. Cela interroge plus généralement quant à l'influence des matériaux plastiques sur le carbone organique dissous. Néanmoins, en pratique sur le terrain, il serait difficile de se passer de ces matériaux pour la collecte d'échantillons (gouttières, conduites, flacons).

Enfin, après 15 ans d'exposition sous le couvert des arbres, les gouttières en PVC ne semblent pas exercer de nouveaux effets en comparaison de celles exposées pendant 6 mois. C'est un résultat rassurant quant à l'impact du vieillissement des matériels sur les échantillons collectés.

Figure 1 : Exemple d'interprétation de l'influence des gouttières en PVC sur la concentration en calcium de l'eau déminéralisée. La ligne rouge continue indique la limite de quantification du laboratoire ; celle discontinue, la limite de quantification maximale admise par ICP Forests.

En haut : le 1^{er} essai montre que la concentration dans l'eau déminéralisée à l'issue des gouttières non usagées (quel que soit le modèle) est nettement supérieure celle des blancs, voire dépasse la limite de quantification maximale admise par ICP Forests.

En bas : à l'exutoire des gouttières installées sous couvert forestier pendant 6 mois ou 15 ans, le 2^{ème} essai montre des concentrations négligeables et proches de celles des blancs.



Conclusions

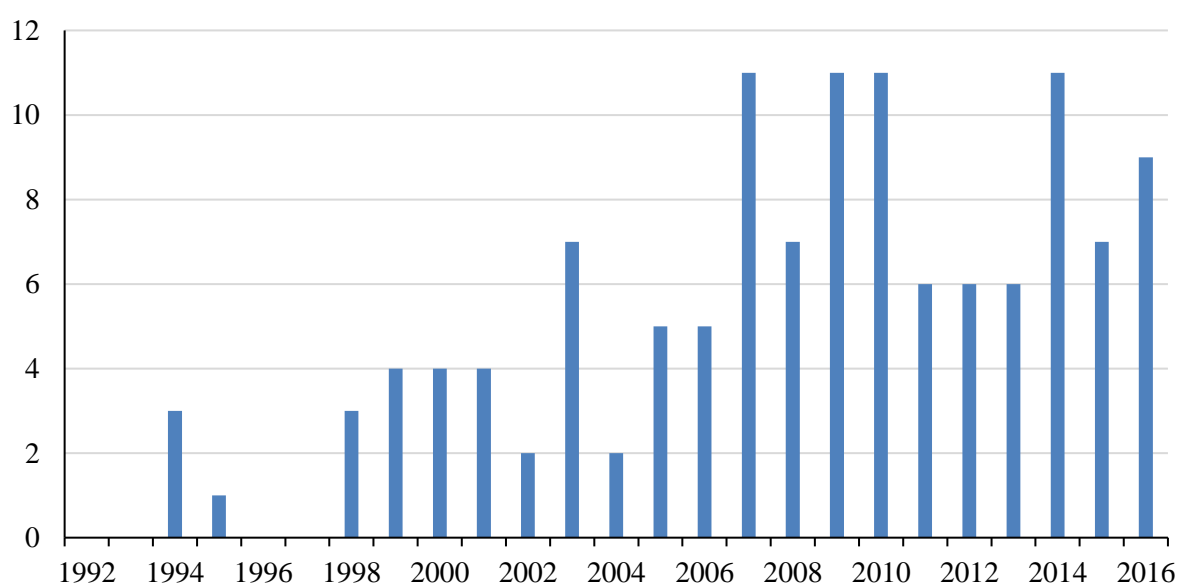
Les essais confirment que les gouttières en PVC peuvent avoir une influence sur le contenu chimique des échantillons de dépôts atmosphériques. Néanmoins, cette influence s'estompe avec le temps. Elle devient suffisamment faible après 6 mois d'exposition aux précipitations (délai prescrit dans le protocole avant les premières mesures), pour pouvoir être négligée pour l'essentiel des paramètres chimiques suivis par le réseau RENECOFOR. Seul le carbone organique dissous semble en partie retenu par les gouttières, mais cela pourrait être le cas plus généralement avec des matériels de collecte en plastique, qui sur le terrain sont difficilement remplaçables par d'autres matériaux (ex : verre). De nouveaux tests pourraient être utiles pour évaluer plus précisément l'influence de ces matériels sur ce paramètre particulier.

Au final, ces essais permettent de documenter rétrospectivement les propriétés des gouttières utilisées depuis 1992 sur le réseau RENECOFOR. Ils permettent aussi de vérifier que les nouvelles gouttières en PVC prévues pour les renouveler présentent des propriétés similaires et également acceptables vis-à-vis de la chimie des échantillons de dépôts atmosphériques.

Tableau 4 : Nombre de publications et communications scientifiques nouvellement recensées en 2016 comme émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données. Les articles scientifiques acceptés mais non encore publiés en 2016 ne sont pas comptabilisés.

| | Documents portant sur des données de monitoring nationales uniquement | Documents portant sur des données de monitoring de plusieurs pays | <i>Total</i> |
|--|--|--|--------------|
| Contributions à des indicateurs écologiques | 6 | | 6 |
| Manuels de référence | 1 | | 1 |
| Présentations lors de réunions de travail | 12 | | 12 |
| Publications dans des revues à comité de lecture | 6 | 3 | 9 |
| Rapports scientifiques | 1 | 1 | 2 |
| Autres documents | 3 | | 3 |
| <i>Total</i> | 29 | 4 | 33 |

Figure 2 : Nombre d'articles publiés de 1992 à 2016 dans des revues scientifiques à comité de lecture, émanant du réseau RENECOFOR et/ou basés sur ses données.



4. Valorisation du réseau RENECOFOR

4.1. Recensement des productions documentaires

Le Tableau 4 comptabilise par catégorie les publications et communications scientifiques nouvellement recensées en 2016 comme émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données. La valorisation du réseau repose en grande partie sur l'initiative d'utilisateurs externes, comme le montre la liste des références au chapitre 6. Certaines d'entre elles mettent en valeur des données des réseaux de différents pays, illustrant l'intérêt de l'intégration à l'échelle européenne du monitoring forestier dans le cadre du programme ICP Forests.

Le nombre d'articles publiés, d'année en année, dans des revues à comité de lecture est un indicateur de l'évolution de la valorisation scientifique du réseau (Figure 2). Il illustre les potentialités croissantes d'un tel dispositif avec le temps : tandis qu'aucun article scientifique n'a été publié les premières années, leur nombre a augmenté progressivement pendant une quinzaine d'années avant d'atteindre un rythme soutenu. Sur les 130 articles publiés dans des revues à comité de lecture depuis 1992, 40 l'ont été pendant les quinze premières années (1992-2006) et 90 pendant les dix années suivantes jusqu'en 2016.

4.2. Principaux résultats publiés

4.2.1. *Suivre et comparer l'évolution des dépôts atmosphériques*

Plusieurs des publications recensées s'intéressent aux tendances observables dans les dépôts atmosphériques en France (Coddeville *et al.*, 2016 ; Pascaud *et al.*, 2016a, 2016b). Leur originalité réside notamment dans la mise en commun des mesures réalisées indépendamment par trois réseaux : CATAENAT, MERA, BAPMON. En réponse à leurs objectifs respectifs, ces réseaux ont mis en œuvre des modes de mesure différents et non directement comparables les uns avec les autres. D'un côté, les réseaux MERA et BAPMON ont collecté sélectivement les dépôts de pluie (collecteurs wet-only ne s'ouvrant que lors de phénomènes pluvieux) afin d'alimenter des modèles de transport des polluants atmosphériques et de tenter de retracer leur trajectoire depuis leurs principales sources d'émission. De l'autre, le sous-réseau CATAENAT s'est intéressé plus simplement aux dépôts totaux (incluant les dépôts secs) pouvant se déposer sur une surface fixe (entonnoir), dans le but de quantifier l'ensemble des retombées atmosphériques subies par les forêts. Cependant, si ces types de collecte conduisent à des résultats différents en valeur absolue, les variations observées par les trois réseaux se révèlent cohérentes à la fois dans l'espace et dans le temps. Les tendances mises en évidence sur une vingtaine d'années montrent une forte baisse des dépôts de soufre, d'acidité directe, et dans une moindre mesure d'azote. Il est intéressant de noter que c'est davantage sous forme réduite (ammonium) que sous forme oxydée (nitrates) que l'azote diminue dans les retombées atmosphériques : ces résultats contrastent avec les estimations d'émissions polluantes qui ont nettement diminué sous forme oxydée et sont restées stables sous forme réduite. Ce hiatus fait écho à celui observé précédemment dans la cartographie de ces retombées atmosphériques entre les résultats de mesures spatialisés (géostatistiques) et les prédictions de dépôts issues du

modèle EMEP (Nicolas, 2015). Différentes hypothèses peuvent être avancées pour l'expliquer. Il illustre en tout cas le fait que des lacunes demeurent dans la compréhension de la dynamique des polluants dans l'atmosphère, et qu'il importe d'approfondir encore les connaissances sur ces paramètres qui affectent le fonctionnement des écosystèmes.

4.2.2. *Suivre la dynamique de drainage du carbone organique dissous*

Face aux enjeux d'atténuation du changement climatique, le devenir du carbone organique contenu dans les sols est devenu un sujet d'importance (cf. 4.3.). Dans le secteur forestier, les dispositifs de suivi mis en place en Europe sous l'égide du programme ICP Forests fournissent aujourd'hui de précieuses informations sur sa dynamique temporelle. D'une part, les mesures répétées du carbone organique contenu dans la phase solide des sols forestiers ont abouti à la publication de premiers résultats d'évolution en Allemagne (Grüneberg *et al.*, 2014) et en France (Jonard *et al.*, 2017), révélant globalement dans chaque étude une augmentation conséquente de ses stocks. Mais, d'autre part, ces dispositifs ont également suivi les concentrations en carbone organique dissous dans les eaux de drainage des sols forestiers. Camino-Serrano *et al.* (2016) ont analysé ces données à l'échelle européenne pour y rechercher là aussi une éventuelle tendance temporelle.

Les eaux de drainage des sols constituant l'une des principales sources alimentant les eaux de surface (lacs et cours d'eau étudiés dans le cadre d'autres publications), l'hypothèse de départ de cette étude était d'y observer une tendance similaire, c'est-à-dire une hausse des concentrations en carbone organique dissous. Cependant, les tendances constatées s'avèrent contrastées suivant les sites : tantôt à la hausse (35 % des sites), tantôt à la baisse (25 %), et tantôt non significatives (40 %). La répartition de ces résultats contrastés ne suit aucun gradient géographique particulier. En revanche ces tendances se révèlent sensibles à d'autres facteurs. Elles sont plus souvent positives dans le cas des sites où la productivité du peuplement est la plus faible (< 6 m³/ha/an) ou au contraire la plus élevée (> 12 m³/ha/an) que dans les cas intermédiaires. Elles sont aussi influencées à la hausse par les dépôts atmosphériques moyens de soufre (dans le cas des sols les plus acides) et d'azote, considérés indépendamment. Cependant, une approche multivariée intégrant les deux types de dépôts (Structural Equation Models) indique plutôt des effets antagonistes, positif de la part des dépôts d'azote mais négatif de la part de ceux de soufre. Une hypothèse d'explication envisagée est qu'une baisse des dépôts de soufre entraîne, dans les contextes de sol acide, une baisse du drainage d'ions aluminium qui ont tendance à rendre le carbone organique moins soluble. Quoi qu'il en soit, ces résultats suggèrent un contrôle complexe du drainage de carbone organique dissous dans les solutions des sols forestiers, impliquant à la fois l'environnement global (retombées de polluants atmosphériques) et le contexte local (acidité du sol et fertilité de la station).

4.2.3. *Simuler les effets combinés du changement climatique et des retombées polluantes sur les écosystèmes forestiers*

Les inquiétudes actuelles pour l'avenir des forêts sont liées à différents types de changements environnementaux associés aussi bien aux retombées de polluants, au climat et à la biodiversité. L'étude de chacun de ces enjeux fait appel à des domaines disciplinaires différents. Néanmoins,

il importe également de pouvoir appréhender des combinaisons d'effets sur le fonctionnement global de l'écosystème. En synthétisant l'état des connaissances de la recherche, les modèles à base de processus constituent des outils importants associant l'expertise de différents domaines disciplinaires pour tenter de simuler des trajectoires d'évolution possibles. C'est ce à quoi travaille notamment l'unité de recherche EcoLab à Toulouse, sur la base du modèle de cycles biogéochimiques ForSAFE et en le couplant à d'autres modèles. Dans une précédente publication, Gaudio *et al.* (2015) s'étaient ainsi attachés à simuler les effets combinés de scénarios de changement climatique et d'évolution des pollutions azotées sur l'équilibre des éléments nutritifs de différentes placettes du réseau RENECOFOR. Rizzetto *et al.* (2016) ont poursuivi ce travail en associant un module simulant, au-delà du cycle des nutriments, la réponse de la composition floristique. Les résultats illustrent une nouvelle fois l'importance que peuvent avoir non seulement l'évolution des retombées de polluants mais aussi le changement du climat sur l'équilibre nutritif de l'écosystème et la réponse de la flore à cet équilibre. Ils suggèrent néanmoins que la prédominance d'un des deux types de facteurs (climat vs retombées de polluants) pourrait varier suivant le site considéré.

4.2.4. *Mieux connaître la disponibilité du phosphore dans les sols*

En 2015, deux publications confirmaient à l'échelle européenne une tendance inquiétante à la dégradation de la nutrition en phosphore des arbres forestiers, au vu des résultats de suivi du contenu chimique de leurs feuilles (Jonard *et al.*, 2015 ; Talkner *et al.*, 2015). Cependant les causes de cette tendance restent à éclaircir (Nicolas *et al.*, 2016a). De leur côté, les campagnes répétées d'analyse des sols n'ont notamment pas montré d'évolution de leur contenu en phosphore (Nicolas, 2015). Néanmoins, on sait que les analyses de phosphore couramment réalisées dans les sols représentent mal la quantité de phosphore réellement disponible pour les plantes. Achat *et al.* (2016) ont utilisé un sous-ensemble des échantillons de sol archivés par le réseau RENECOFOR pour réaliser des analyses isotopiques visant à évaluer directement la disponibilité du phosphore. A partir des résultats obtenus, des relations ont pu être recherchées pour estimer cette disponibilité du phosphore en fonction des paramètres mesurés précédemment sur ces échantillons. Sans surprise, les principaux déterminants s'avèrent être les teneurs en oxydes de fer et d'aluminium, mais aussi la concentration en carbone organique. En revanche ces résultats permettent de constater de manière originale que ni le pH, ni la teneur en carbonates ne jouent un rôle notable. Par rapport à d'autres études, la diversité des contextes écologiques couverts par ce jeu de données permet aussi d'aboutir à des relations plus robustes pour estimer la biodisponibilité du phosphore, et qui pourraient servir au moins à des fins de diagnostic.

4.2.5. *Comprendre les variations de la fructification des arbres forestiers*

La reproduction des arbres forestiers est un paramètre important à considérer pour comprendre et anticiper l'impact des changements environnementaux sur les peuplements et plus largement sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers (via la chaîne trophique liée à la consommation des fruits). La mesure de la production de fruits via la collecte des chutes de litière est une information utile pour étudier la reproduction des arbres de manière quantitative. En 2016, trois études se sont penchées sur les données collectées de cette manière sur le réseau

RENECOFOR (sur toutes ses placettes jusqu'en 2007 puis uniquement sur les 14 placettes de niveau A3), et plus largement en Europe dans le cadre du programme ICP Forests.

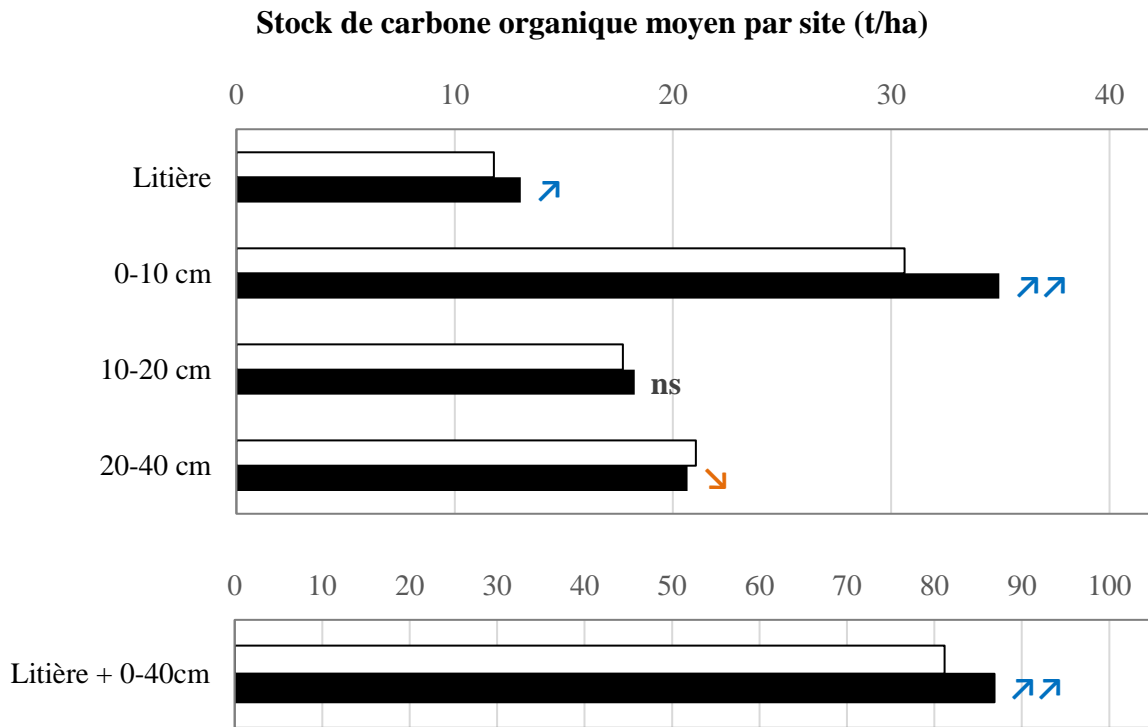
Deux articles de Fernandez-Martinez *et al.* (2016, 2017) portent sur la production de fruits à l'échelle du peuplement, en associant les données françaises avec celles d'autres pays. L'un évalue la part de la production de fruits comme représentant en moyenne entre 0,5 % et 3 % de la production photosynthétique des arbres (et jusqu'à plus de 20 % lors des plus forts épisodes de fructification). De plus il montre que la production de fruits varie d'un site à l'autre en fonction de l'essence, de la productivité du site, mais aussi de la nutrition minérale des arbres. La nutrition en azote joue un rôle négatif sur la masse de fruits produite, tandis que le phosphore et le zinc au contraire l'augmentent. Le potassium favorise sa régularité d'une année sur l'autre. L'autre article de ces auteurs s'intéresse à la variabilité temporelle et au synchronisme de la production de fruits entre sites, en observant le rôle que des facteurs climatiques peuvent y jouer. Il met notamment en avant l'influence de l'oscillation nord-atlantique sur les conditions météorologiques printanières pour expliquer le synchronisme des fructifications entre sites.

De leur côté Venner *et al.* (2016) s'intéressent à modéliser les processus régissant les phénomènes de forte fructification du chêne sessile (masting). Le modèle proposé prend en compte à la fois l'évolution des réserves nutritives des arbres disponibles pour la production de fleurs et de fruits, et la probabilité de pollinisation d'un individu par ses voisins. Il utilise les données collectées arbre par arbre dans le cadre du projet PotenChêne (voir Tableau 5), qui s'appuie notamment sur les placettes du réseau RENECOFOR. Les simulations suggèrent de manière quelque peu contrintuitive qu'une très grande efficacité de pollinisation des fleurs femelles pourrait défavoriser le synchronisme de la fructification entre individus, et donc l'occurrence de glandées massives.

4.2.6. *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines*

Les indicateurs de gestion durable des forêts visent à éclairer les décideurs publics et sont édités tous les 5 ans. Initiés dans le cadre des conférences ministérielles sur la protection des forêts en Europe, ils ont aussi été déclinés dans une version française. Dans l'édition nationale 2015 (publiée en 2016), le réseau RENECOFOR a contribué à la rédaction de 3 indicateurs sur les dépôts atmosphériques, les propriétés chimiques des sols et le déficit foliaire des arbres, ainsi qu'à la synthèse du critère 2 regroupant les indicateurs relatifs à la santé des arbres et des écosystèmes forestiers. Avec 20 ans de recul, ces indicateurs ont permis de documenter des premières tendances majeures. Certaines de ces tendances pouvaient être attendues comme la baisse des pollutions acidifiantes, et d'autres moins comme la séquestration de carbone dans les sols (Figure 3) ou encore l'absence de dépérissement massif des arbres forestiers malgré les événements climatiques (tempêtes de 1999 et 2009, sécheresse-canicule de 2003) et autres pressions observées (apparition de parasites exotiques). Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers révèle néanmoins un état de santé dégradé des essences présentes en région méditerranéenne. En plus des résultats présentés, cette édition 2015 comprend un deuxième tome de notice méthodologique, relatant pour chaque indicateur les caractéristiques techniques des données utilisées, les méthodes de calcul et les pistes d'amélioration identifiées.

Figure 3 : Les stocks de carbone des sols ont augmenté significativement entre les 2 campagnes de prélèvement menées en 1993-1995 (barres blanches) et 2007-2012 (barres noires) sur le réseau RENECOFOR. En moyenne pour les 102 sites, et en cumulant les couches prélevées (litière + sol minéral jusqu'à 40 cm de profondeur), le stock additionnel de carbone organique s'élève à 5,7 t/ha, ce qui équivaut à un accroissement annuel de 4 ‰. Cette augmentation concerne principalement la couche de surface du sol minéral, entre 0 et 10 cm de profondeur.



4.3. Atelier autour du carbone des sols du réseau RENECOFOR

Le carbone organique des sols est devenu un sujet d'intérêt politique notamment depuis la Conférence de Paris sur le Climat (COP 21, décembre 2015) et le relais de l'initiative de recherche 4 pour 1000. Cette initiative vise à promouvoir le stockage de carbone dans les sols, en mettant en avant un objectif d'accroissement annuel de 4 ‰ de leur contenu en carbone organique qui permettrait de compenser en grande partie les émissions mondiales de gaz à effet de serre. Cet objectif vise non seulement les sols agricoles, dont il contribuerait au passage à restaurer la fertilité, mais plus généralement tous les sols. Les sols forestiers sont parmi ceux qui contiennent le plus de carbone organique. Ils en contiennent aussi plus que les peuplements qu'ils supportent. Qu'ils aient tendance à séquestrer encore davantage de carbone ou au contraire à en relâcher dans l'atmosphère, leur comportement peut modifier radicalement la contribution de la forêt à l'atténuation du changement climatique. Cette dynamique reste cependant méconnue et difficile à prévoir. En France, le groupe de chercheurs CarboSMS s'est notamment constitué pour faire le point sur les connaissances actuelles et proposer des axes de recherche (Derrien *et al.*, 2016).

Dans ce contexte, le réseau RENECOFOR apporte depuis peu des résultats de mesure inédits permettant de constater la dynamique réelle des stocks de carbone d'une vaste gamme de sols (Jonard *et al.*, 2017), mais aussi un support de recherche original riche de nombreux autres paramètres de fonctionnement des écosystèmes forestiers utiles à la compréhension des processus à l'œuvre. Parmi les différents chercheurs impliqués, Lauric Cécillon (Irstea) et Pierre Barré (Ecole normale supérieure) ont pris l'initiative d'organiser un atelier de présentation et de discussion des différents travaux de recherche en cours ou en projet « autour du carbone des sols du réseau RENECOFOR ». Cet atelier s'est tenu le 1^{er} décembre 2016 à Paris. Après une introduction sur les dispositifs de suivi des écosystèmes forestiers, le programme a été divisé en quatre sessions.

- La session 1 « Métrologie des stocks de carbone des sols forestiers » a notamment permis de discuter des résultats des mesures de stocks de carbone réalisées dans les sols du réseau et qui montrent en moyenne sur 15 ans une augmentation de 0,35 tC/ha/an (soit un accroissement annuel équivalent justement au fameux objectif de 4 %) (Jonard *et al.*, 2016 ; Figure 3). La méthodologie employée y a été présentée en détail, en incluant les sources d'erreurs potentielles qui ont été identifiées à l'occasion de ce type de mesure (incertitudes et risques de biais sur le terrain et dans le traitement des échantillons) (Nicolas *et al.*, 2016c).
- La session 2 « Indicateurs de la dynamique du carbone dans les sols » a été l'occasion de découvrir et comparer les premiers résultats de différents paramètres de stabilité du carbone organique mesurés dans le cadre du projet piCaSo (voir Tableau 5) sur les échantillons de sol du réseau RENECOFOR (Soucémariadin *et al.*, 2016), et par ailleurs les études menées pour évaluer la pertinence d'un indicateur facilement mesurable proposé dans la littérature, la glomaline (Staunton, 2016).
- La session 3 « Dynamique des litières et entrées de carbone dans les sols forestiers » s'est portée sur deux expérimentations mettant à profit les placettes du réseau RENECOFOR pour observer la dynamique des litières. L'une, en place depuis 15 ans, suit la dynamique dans le sol et dans les arbres d'un isotope stable de l'azote introduit par un apport de litière de hêtre marquée (Zeller *et al.*, 2016). L'autre, en projet, mesurerait la perte de masse de sachets de thé (objet d'étude standard) enfouis dans le sol pendant une durée déterminée (expérimentation « Tea bags », cf. Tableau 5) (Augusto *et al.*, 2016).
- La session 4 « Modèles de la dynamique du carbone dans les sols forestiers » a mis en avant l'utilité des données collectées par le réseau à l'échelle de l'ensemble de l'écosystème pour tester la capacité de modèles actuels (Century, Yasso07) à reproduire la dynamique temporelle des stocks de carbone organique observée dans les sols (Mao *et al.*, 2016 ; Séréni, 2016). Globalement, des différences importantes existent entre les simulations et les résultats de mesure, illustrant l'insuffisance des connaissances actuelles pour prédire l'évolution des stocks de carbone des sols forestiers.

En perspective, il reste encore beaucoup à faire pour comprendre la dynamique du carbone des sols. Dans ce contexte, le suivi des propriétés des sols est une approche nécessaire et pertinente pour connaître leur évolution face aux enjeux liés aux changements globaux. Mais les travaux partagés illustrent aussi l'importance de cette approche pour appuyer la recherche dans la

compréhension des processus sous-jacents. Des paramètres additionnels pourraient d'ailleurs être mesurés avec intérêt sur le réseau RENECOFOR pour consolider le paramétrage des modèles ou essayer d'appréhender d'autres facteurs d'influence méconnus. Outre l'intérêt des connaissances échangées, cet atelier aura aussi contribué à fédérer un nouveau groupe de chercheurs autour d'une thématique commune, et autour du réseau.

4.4. Contribution de l'équipe de coordination aux valorisations externes

L'équipe de coordination soutient les projets de valorisation émanant d'utilisateurs externes.

- Elle met ses données à disposition gratuitement sur demande et apporte son expertise pour leur utilisation. En 2016, elle a répondu à 24 demandes de données. Le programme ICP Forests a également relayé 17 demandes faites auprès de sa base de données centralisée et concernant des données émanant du réseau RENECOFOR.
- Elle met aussi gratuitement à disposition ses échantillons archivés (ex : projet piCaSo) et ses sites (ex : projet PotenChêne), à condition que les mesures envisagées ne portent pas atteinte aux missions de suivi du réseau RENECOFOR.

Le Tableau 5 liste les projets de recherche en cours en 2016 et auxquels l'équipe de coordination a apporté une contribution particulière, soit par la mise à disposition de sites ou d'échantillons archivés, soit par un apport d'expertise (ex : participation à un comité de suivi). Il illustre une nouvelle fois la diversité des thématiques auxquelles le réseau fournit un support intéressant, jusque bien au-delà des objectifs scientifiques pour lesquels il a été initialement conçu.

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 2016 de mener à bien les tâches prévues dans son calendrier d'activités. Les travaux de valorisation des données apportent des résultats inédits 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.

L'observation des écosystèmes forestiers n'en est cependant qu'à ses débuts et a encore beaucoup à nous apprendre. Le recul actuel de 25 ans reste limité au regard du temps d'évolution de l'environnement et de la durée de révolution d'une futaie. A court terme, la poursuite du réseau RENECOFOR est confortée par son inscription au nouveau contrat d'objectifs et de performances de l'ONF pour la période 2016-2020. Son activité nécessiterait cependant de pouvoir être prévue à plus long terme.

Tableau 5 : Projets de recherche en cours en 2016 et auxquels l'équipe de coordination a apporté une contribution particulière

| Intitulé | Financeur(s) | Période | Contributions du réseau RENECOFOR |
|---|--|----------------|--|
| Projet PotenChêne : Potentiel de régénération des chênaies dans le contexte du changement climatique | Ministère de l'environnement (Appel BGF) | 2013-2017 | - Support d'étude : 12 placettes équipées pour la collecte de fleurs et de fruits sur des arbres individuels (10 chênes sessiles par placette) - Participation des agents locaux au fonctionnement du dispositif |
| Projet piCaSo : Pilotage sylvicole et contrôle pédologique des stocks de carbone des sols forestiers | ADEME (Appel REACTIF) | 2014-2017 | - Fourniture d'échantillons archivés, pour analyser la stabilité du carbone organique des sols de toutes les placettes - Fourniture de données pour tester la capacité de reproduction de la dynamique du carbone des sols avec le modèle Century |
| Projet Insensé : Indicateurs de sensibilité des écosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse | ADEME (Appel REACTIF) | 2013-2017 | - Fourniture de l'ensemble des données de sol du réseau (chimie et descriptions) pour la constitution d'une base de données regroupant un maximum de données existantes sur les sols forestiers |
| Projet Sacroboque : SAisonnalité de la CROissance du BOis chez les Chênes (QUercus) décidus | SOERE F-ORE-T | 2016-2017 | - Support d'étude : 5 placettes équipées de microdendromètres automatiques pour étudier la phénologie de la croissance du bois des chênes sessiles (10 arbres par placette) |
| Projet Nitriphyll : Etude de la nitrification dans la phyllosphère des forêts européennes (pin sylvestre et hêtre) par des approches isotopique et protéogénomique | Union européenne (H2020) | 2016-2018 | - Support d'étude : collecte ad hoc d'échantillons de pluie, de pluviollessivat, de sol et d'aiguilles de pin sur la placette PS 67a (Haguenau) |
| Projet Mottles : Détermination de nouveaux seuils d'impact de l'ozone sur la végétation forestière | Union européenne (LIFE Environment) | 2016-2020 | - Support d'étude : 4 placettes avec historique de suivi des concentrations en ozone dans l'air et de ses impacts sur la végétation - Fourniture de données pour l'estimation du flux d'ozone stomatal |

Tableau 5 (suite) : Projets de recherche en cours en 2016 et auxquels l'équipe de coordination a apporté une contribution particulière

| Intitulé | Financier(s) | Période | Contributions du réseau RENECOFOR |
|--|--|-----------|---|
| Expérience "Tea bags" : Etude du processus de décomposition des matières organiques en forêt à l'aide de sachets de thé | INRA (autofinancement) | 2016- | - Relecture et mise à l'essai d'un protocole expérimental de science participative adapté pour application sur les placettes RENECOFOR par les agents locaux |
| Thèse de Marine Roulier : Cycle biogéochimique de l'iode en écosystème forestier (projet ANR Amorad : Amélioration des MODèles de prévision de la dispersion et l'évaluation de l'impact des RADionucléides au sein de l'environnement) | ANR, IRSN, Université de Pau, ANDRA, région Aquitaine | 2016-2019 | - Fourniture d'échantillons de sol archivés - Mise à disposition de reliquats de l'ensemble des échantillons de pluie, de pluviolessivats et de solutions du sol collectés sur une année |
| Thèse de Sara Negro : Rôle des forêts dans le transfert des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) depuis l'atmosphère jusque dans les eaux souterraines | ADEME, Université de Savoie | 2013-2016 | - Fourniture d'échantillons archivés de feuillage vert (1993-2011), d'humus et de sol de 14 placettes pour analyse des HAP (polluants organiques persistants, produits de combustion) - Participation au comité de thèse |
| Thèse de Simon Rizzetto : Modélisation dynamique de la réponse de la biodiversité végétale aux charges critiques azotées pour les forêts françaises dans un contexte de changement global | ADEME | 2014-2017 | - Fourniture de données pour le paramétrage et la calibration de modèles à base de processus - Participation au comité de thèse |

6. Bibliographie

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

Publications recensées en 2016

- Achat D.L., Pousse N., **Nicolas M.**, Brédoire F., Augusto L., 2016 : Soil properties controlling inorganic phosphorus availability - Generic results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry*. 127(2):255-272 DOI 10.1007/s10533-015-0178-0
- Camino-Serrano M., Graf Pannatier E., Vicca S., Luysaert S., Jonard M., Ciais P., Guenet B., Gielen B., Peñuelas J., Sardans J., Waldner P., Etzold S., Cecchini G., Clarke N., Galic A., Gandois L., Hansen K., Johnson J., Klinck U., Lachmanova Z., Lindroos A.J., Meessenburg H., Nieminen T.M., Sanders T.G.M., Sawicka K., Seidling W., Thimonier A., Vanguelova E., Verstraeten A., Vesterdal L., Janssens I.A., 2016. Trends in soil solution dissolved organic carbon (DOC) concentrations across European forests. *Biogeosciences Discuss*, 13:5567-5585. DOI: 10.5194/bg-2015-632
- Caroulle F., **Nicolas M.**, 2016 : Déficit foliaire des principales essences forestières, pp. 116-120. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Résultats. Maaf-IGN, Paris, 343 p.
- Coddeville P., Pascaud A., Sauvage S., **Nicolas M.**, Mathias E., Probst A., 2016. Évolution des émissions, de la qualité de l'air et des dépôts atmosphériques dans les espaces ruraux, notamment forestiers. *Pollution atmosphérique, numéro spécial, septembre 2016*, 43-63
- Fernandez-Martinez M., Vicca S., Janssens I.A., Espelta J.P., Peñuelas J., 2016. The North Atlantic Oscillation synchronises fruit production in western European forests. *Ecography*, 39:1-11, doi: 10.1111/ecog.02296
- Fleck S., Cools N., De Vos B., Meessenburg H., Fischer R., 2016. The Level II aggregated forest soil condition database links soil physicochemical and hydraulic properties with long-term observations of forest condition in Europe. *Annals of Forest Science*, 73:945, doi:10.1007/s13595-016-0571-4
- Macé S.**, 2016 : RENECOFOR - Manuel de référence n° 15: Installation et utilisation des dendromètres permanents, 2ème version. Editeur : Office National des Forêts, Direction Technique et Commerciale Bois, Département Recherche et Développement, 24 p.
- Mathias E., **Nicolas M.**, 2016 : Dépôts atmosphériques en forêt, pp. 54-59. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Notice méthodologique. Caractéristiques techniques des données, méthode de calcul et pistes d'amélioration. Maaf-IGN, Paris, 231 p.
- Michel A., Seidling W. (eds.) 2016: Forest Condition in Europe, 2016 Technical Report of ICP Forests. Report under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), BFW-Dokumentation 23/2016, Vienna, 206p.

- Nicolas M.**, 2016 : Propriétés chimiques des sols forestiers, pp. 60-64. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Notice méthodologique. Caractéristiques techniques des données, méthode de calcul et pistes d'amélioration. Maaf-IGN, Paris, 231 p.
- Nicolas M., Cecchini S., Croisé L., Macé S.**, 2016 : RENECOFOR - Bilan technique de l'année 2015. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, 27 p.
- Nicolas M., Cecchini S., Croisé L., Macé S.**, 2016. Compte rendu d'essai de matériels de collecte pour le suivi de la chimie des pluviollessivats : test de deux modèles de gouttière en PVC. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, 23 p.
- Nicolas M., Mathias E.**, 2016 : Dépôts atmosphériques en forêt, pp. 100-107. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Résultats. Maaf-IGN, Paris, 343 p.
- Nicolas M., Rocquencourt A., Carouille F.**, 2016 : Synthèse du critère 2 - santé et vitalité des forêts, pp. 96-97. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Résultats. Maaf-IGN, Paris, 343 p.
- Nicolas M., Saenger A., Jonard M., Caignet I., Ponette Q., Pousse N., Slak M.-F.**, 2016 : Propriétés chimiques des sols forestiers, pp. 108-115. In : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, IGN 2016 : Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, édition 2015. Résultats. Maaf-IGN, Paris, 343 p.
- ONF, 2016. Rapport d'activité 2015. Paris, 83 p.
- Pascaud A., Sauvage S., Coddeville P., **Nicolas M., Croisé L.**, Mezdour A., Probst A., 2016. Contrasted spatial and long-term trends in precipitation chemistry and deposition fluxes at rural stations in France. *Atmospheric Environment*, 146:28-43, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.019
- Pascaud A., Sauvage S., Pagé C., Roustant O., Probst A., **Nicolas M., Croisé L.**, Mezdour A., Coddeville P., 2016 : Composition chimique des dépôts atmosphériques à l'horizon 2020-2040. *La Météorologie*, 59-65. DOI:10.4267/2042/58223
- Rizzetto S., Belyazid S., Gégout J.C., **Nicolas M.**, Alard D., Corcket E., Gaudio N., Sverdrup H., Probst A., 2016. Modelling the impact of climate change and atmospheric N deposition on French forests biodiversity. *Environmental Pollution*, 213:1016-1027, DOI: 10.1016/j.envpol.2015.12.048.
- SOCOR, 2016 : Bilan analyses ONF - Rapport qualité - Performances laboratoire SOCOR 2015, 51 p.
- Venner S., Siberchicot A., Pélisson P.F., Schermer E., Bel-Venner M.C., **Nicolas M.**, Débias F., Miele V., Sauzet S., Boulanger V., Delzon S., 2016. Fruiting strategies of perennial plants: a resource budget model to couple mast seeding to pollination efficiency and resource allocation strategies. *The American Naturalist*, 188(1):66-75, DOI: 10.1086/686684

- Delpierre N., Guillemot J., Dufrêne E., **Cecchini S.**, **Nicolas M.**, 2017. Tree phenological ranks repeat from year to year and correlate with growth in temperate deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234-235:1-10, DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.12.008
- Fernandez-Martinez M., Vicca S., Janssens I.A., Espelta J.P., Peñuelas J., 2017. The role of nutrients, productivity and climate in determining tree fruit production in European forests. *New Phytologist*, 213:669-679, doi: 10.1111/nph.14193
- Guillemot J., François C., Hmimina G., Dufrêne E., Martin-St Paul N.K., Soudani K., Marie G., Ourcival J.-M., Delpierre N., 2017. Environmental control of carbon allocation matters for modelling forest growth. *New Phytologist*. 214(1):180-193, DOI: 10.1111/nph.14320
- Jonard M., **Nicolas M.**, Coomes D.A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q., 2017. Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574:616-628, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.028

6.2. Communications orales en 2016

Communications à l'occasion de l'atelier « Autour du carbone des sols du réseau RENECOFOR », le 1^{er} décembre 2016 à Paris (Ecole normale supérieure)

- Augusto L., Bakker M., **Cecchini S.**, **Nicolas M.**, 2016. Contribution du réseau RENECOFOR à un projet participatif international sur la décomposition des végétaux. Communication orale. 11 diapositives.
- Cécillon L., 2016. Les dispositifs de suivi des écosystèmes forestiers : quelles données sur le C des sols ? Communication orale. 7 diapositives.
- Jonard M., Caignet I., Saenger A., Coomes D.A., Ponette Q., **Nicolas M.**, 2016. Evolution du C des sols forestiers de France : détection et quantification sur le réseau RENECOFOR. Communication orale. 19 diapositives.
- Mao Z., Derrien D., Didion M., Liski J., Eglin T., **Nicolas M.**, Jonard M., Saint-André L., 2016. Modeling soil organic carbon dynamics in temperate forests using Yasso07 - Case study using the French forest and carbon data at national scale. Communication orale. 20 diapositives.
- Nicolas M.**, 2016. Le Réseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FORestiers (RENECOFOR). Communication orale. 19 diapositives.
- Nicolas M.**, Jonard M., Caignet I., Saenger A., Ponette Q., 2016. Métrologie des stocks de C et N : enseignements de l'expérience de suivi des sols sur le réseau RENECOFOR. Communication orale. 25 diapositives.
- Remy A., Legout A., Pousse N., 2016. Intercalibration entre méthode d'analyse du carbone des sols forestiers à partir des données du réseau RENECOFOR. Communication orale. 4 diapositives.
- Séréni L., 2016. Modélisation des stocks de C des sols du réseau RENECOFOR avec le modèle Century. Communication orale. 24 diapositives.

- Soucémariadin L., Barré P., Mériguet J., Baudin F., Chenu C., Guenet B., **Cecchini S., Nicolas M.**, Séréni L., Savignac F., Le Vagueresse L., Bryant M., Cécillon L., 2016. Temps de résidence du C des sols du réseau RENECOFOR : approches biologique, physique, thermique et écosystémique. Communication orale. 21 diapositives.
- Staunton S., 2016. Glomaline: mythe, réalité ou piste pour comprendre et optimiser la séquestration du C dans les sols du réseau RENECOFOR. Communication orale. 22 diapositives.
- Zeller B., Derrien D., Salleles J., 2016. Dynamique du N dérivé des litières sur les hêtraies du réseau RENECOFOR. Communication orale. 14 diapositives.

Autres communications orales en 2016

- Caroulle F., 2016. Un état sanitaire sous surveillance, avec des pressions qui fluctuent. Communication orale. 8 diapositives. Colloque Les indicateurs de gestion durable (IGD) des forêts métropolitaines : retour sur 20 ans d'expérience, 30 novembre 2016, Paris.

6.3. Autres références citées

- Augusto L., Bastien C., Dufrêne E., Farcy C., Hervé J.-C., Jactel H., Pannatier E., 2013 : 2ème Evaluation du REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes 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.
- Becker M., Bert G.D., Landmann G., Lévy G., Rameau J.C., Ulrich E., 1995. Growth and decline symptoms of silver fir and Norway spruce in Northeastern France: Relation to climate, nutrition and silviculture. pp. 120-142 *In* Landmann G., Bonneau M. (Eds.) 1995. Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains. Berlin (Allemagne), Springer, ISBN 3-540-58874-4, 461 p.
- Birot 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.
- Cluzeau C., Ulrich E., Lanier M., Garnier F., 1998 : RENECOFOR - Interprétation des mesures dendrométriques de 1991 à 1995 des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 151 - 4, 309 p.
- Derrien D., Dignac M.-F., Basile Doelsch I., BAROT S., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., Freschet G. T., Garnier P., Guenet B., Hedde M., Klumpp K., Lashermes G., Maron P.-A., Nunan N., Roumet C., Barré P., 2016. Stocker du C dans les sols : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Etude et gestion des sols*, 23:193-223
- Draaijers G.P.J., Bleeker A., van der Veen D., Erisman J.W., Möls H., Fonteijn P., Geusenbrock M., 2001 : Field inter-comparison of throughfall, stemflow and precipitation measurements performed within the framework of the Pan European Intensive

- Monitoring Program of EU/ICP forests. TNO-report R 2001/140, 221 p + 13 pages d'annexes.
- Ferretti M., Nicolas M., Bacaro G., Brunialta 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, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.009
- Gandois L., 2009 : Dynamique et bilan des Eléments Traces Métalliques (ETM) dans des écosystèmes forestiers français. Modélisation, Spéciation et Charges Critiques. Thèse de doctorat ès géochimie de l'environnement, Université de Toulouse, 245 p. + annexes
- 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: 24-34
- Grüneberg E, Ziche D, Wellbrock N., 2014. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology*, 20:2644–2662, DOI: 10.1111/gcb.12558
- 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., 2015 : Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 21(1):418-430
- Landmann G., Bonneau M. (Eds.) 1995 : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains. Berlin (Allemagne), Springer, ISBN 3-540-58874-4, 461 p.
- Lebourgeois F., 1997 : RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 075 - 5, 307 p.
- Macé S., 2012 : RENECOFOR - Manuel de référence n° 15: Installation et utilisation des dendromètres permanents, 1ère version. Editeur : Office National des Forêts, Direction Technique et Commerciale Bois, Département Recherche et Développement, 23 p.
- Mérian P. 2012. Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage. Thèse de Doctorat, Nancy, AgroParisTech, 451 p.
- Nicolas M., 2015 : RENECOFOR – Bilan technique de l'année 2014. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, 35 p.
- Talkner U., Meiwes K.J., Potočić N., Seletković I., Cools N., De Vos B., Rautio P., 2015 : Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science*, 72(7):919-928, DOI 10.1007/s13595-015-0459-8
- Ulrich E., Lanier M., 1993 : RENECOFOR - Manuel de référence n°3 pour le fonctionnement du sous-réseau CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Ecosystèmes Naturels Terrestres), placette de niveau 2 et 3, deuxième version. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, 98 p.
- Žlindra D., Eler K., Hansen K., Clarke N., 2011. Report on the experimental installation of standardized throughfall collectors. Technical report Life+ QA-Depo10. Ljubljana, Slovenian Forestry Institute, ISBN : 978-961-6425-56-8, 122 p.

7. Annexes

Les Tableaux A1 à A3 complètent les informations de la partie 3 sur l'évaluation expérimentale de l'influence des gouttières de collecte sur la chimie des échantillons de pluviollessivats (dépôts atmosphériques sous couvert forestier).

Tableau A1 : Méthodes employées en laboratoire pour l'analyse des solutions-test.

| Paramètre chimique | Unité | Limite de quantification (LQ) | Méthode d'analyse | Norme d'analyse |
|--|-------|-------------------------------|--|-------------------|
| pH | | | Potentiométrie | NF T 90 008 |
| Alcalinité totale | µeq/l | | Titration (méthode Gran) | |
| Conductivité électrique à 20°C | µS/cm | 1 | Conductimétrie | NF EN ISO 27888 |
| Carbone organique dissous (COD) | mg/l | 0.5 | Analyseur élémentaire | NF EN 1484 |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | 0.1 | | |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | 0.1 | Chromatographie ionique | NF EN ISO 10304-1 |
| Orthophosphates (PO ₄ ³⁻) | mg/l | 0.4 | | |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | mg/l | 0.2 | | |
| Ammonium (NH ₄ ⁺) | mg/l | 0.01 | Analyseur en flux continu | NF EN ISO 11732 |
| Azote total (N total) | mg/l | 0.5 | Analyseur élémentaire | NF EN 12260 |
| Aluminium (Al) | mg/l | 0.01 | | |
| Calcium (Ca) | mg/l | 0.01 | | |
| Fer (Fe) | mg/l | 0.005 | | |
| Magnésium (Mg) | mg/l | 0.001 | ICP-AES : spectrométrie d'émission atomique à plasma | NF EN ISO 11885 |
| Manganèse (Mn) | mg/l | 0.001 | | |
| Phosphore total (P total) | mg/l | 0.05 | | |
| Potassium (K) | mg/l | 0.05 | | |
| Sodium (Na) | mg/l | 0.01 | | |

Tableau A2 : Résultats du 1^{er} essai : analyses chimiques à l'issue des simulations de pluie, par type de solution. LQ : limite de quantification. GA et GN : respectivement moyennes des valeurs à l'exutoire des gouttières de l'ancien modèle et du nouveau modèle. Blancs : solution-test prélevée dans le container d'origine (1), ou après passage par le pulvérisateur (2). En gras : valeurs moyennes notablement différentes de celles des blancs. Sont surlignés en couleur les moyennes correspondant à des valeurs systématiquement supérieures (orangé) ou inférieures (bleu) aux blancs pour les différentes répétitions d'un type de gouttière.

| Paramètre chimique | Unité | LQ | Acide citrique à pH 4 | | | | Eau déminéralisée | | | | Eau de Volvic | | | |
|--|-------|-------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Blanc 1 (n=1) | Blanc 2 (n=1) | GA neuves (n=3) | GN neuves (n=3) | Blanc 1 (n=1) | Blanc 2 (n=1) | GA neuves (n=3) | GN neuves (n=3) | Blanc 1 (n=1) | Blanc 2 (n=1) | GA neuves (n=3) | GN neuves (n=3) |
| pH | | | 3.9 | 4.0 | 4.4 | 4.2 | 5.5 | 5.9 | 5.9 | 5.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.9 |
| Alcalinité totale | µeq/l | | 6.0 | 5.0 | 9.0 | 8.3 | 4.0 | 8.0 | 16.3 | 13.0 | 1205.0 | 1115.0 | 1136.0 | 1125.0 |
| Conductivité électrique à 20°C | µS/cm | 1 | 37.1 | 33.1 | 16.1 | 21.5 | 1.9 | 3.0 | 3.9 | 3.3 | 199.4 | 197.0 | 199.8 | 200.5 |
| Carbone organique dissous (COD) | mg/l | 0.5 | 7.0 | 6.7 | 5.2 | 5.7 | 0.8 | 0.7 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 0.3 | 0.4 |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 15.4 | 15.6 | 15.7 | 15.8 |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.0 | 6.8 | 6.8 | 6.9 |
| Orthophosphates (PO ₄ ³⁻) | mg/l | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | mg/l | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.4 | 8.5 | 8.5 | 8.6 |
| Ammonium (NH ₄ ⁺) | mg/l | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Azote total (N total) | mg/l | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.6 |
| Aluminium (Al) | mg/l | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Calcium (Ca) | mg/l | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.39 | 0.85 | 0.01 | 0.00 | 0.16 | 0.16 | 12.30 | 12.30 | 12.50 | 12.47 |
| Fer (Fe) | mg/l | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Magnesium (Mg) | mg/l | 0.001 | 0.005 | 0.000 | 0.020 | 0.002 | 0.008 | 0.000 | 0.010 | 0.001 | 7.925 | 7.994 | 8.038 | 8.102 |
| Manganèse (Mn) | mg/l | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Phosphore total (P total) | mg/l | 0.05 | 0.24 | 0.26 | 0.23 | 0.39 | 0.14 | 0.31 | 0.26 | 0.23 | 0.31 | 0.57 | 0.36 | 0.36 |
| Potassium (K) | mg/l | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.29 | 6.30 | 6.38 | 6.40 |
| Sodium (Na) | mg/l | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.16 | 0.16 | 0.19 | 0.17 | 11.20 | 11.24 | 11.38 | 11.43 |

Tableau A3 : Résultats du 2^{ème} essai : analyses chimiques à l'issue des simulations de pluie, par type de solution. LQ : limite de quantification. GA et GN : respectivement moyennes des valeurs à l'exutoire des gouttières de l'ancien modèle et du nouveau modèle. Blancs : solution-test prélevée dans le container d'origine (1), ou après passage par le pulvérisateur (2), ou après passage par le pulvérisateur et l'entonnoir (3). En gras : valeurs moyennes notablement différentes de celles des blancs. Surlignés en couleur les moyennes correspondant à des valeurs systématiquement supérieures (orangé) ou inférieures (bleu) aux blancs pour les différentes répétitions d'un type de gouttière.

| Paramètre chimique | Unité | LQ | Acide citrique à pH 4,6 | | | | | | Eau déminéralisée | | | | | |
|--|-------|-------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Blanc 1 (n=1) | Blanc 2 (n=2) | Blanc 3 (n=2) | GA 15 ans (n=3) | GA 6 mois (n=2) | GN 6 mois (n=2) | Blanc 1 (n=1) | Blanc 2 (n=2) | Blanc 3 (n=2) | GA 15 ans (n=3) | GA 6 mois (n=2) | GN 6 mois (n=2) |
| pH | | | 4.6 | 4.6 | 4.6 | 4.8 | 4.9 | 4.7 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.6 |
| Alcalinité totale | µeq/l | | 6.0 | 4.4 | 5.3 | 4.3 | 5.5 | 6.4 | 2.5 | 3.5 | 5.5 | 4.7 | 4.4 | 4.0 |
| Conductivité électrique à 20°C | µS/cm | 1 | 10.4 | 8.5 | 8.4 | 5.9 | 6.3 | 7.3 | 2.4 | 2.3 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.3 |
| Carbone organique dissous (COD) | mg/l | 0.5 | 1.0 | 0.9 | 0.8 | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Orthophosphates (PO ₄ ³⁻) | mg/l | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | mg/l | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Ammonium (NH ₄ ⁺) | mg/l | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Azote total (N total) | mg/l | 0.5 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.6 |
| Aluminium (Al) | mg/l | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Calcium (Ca) | mg/l | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| Fer (Fe) | mg/l | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Magnesium (Mg) | mg/l | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.002 | 0.003 | 0.003 |
| Manganèse (Mn) | mg/l | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.003 | 0.003 |
| Phosphore total (P total) | mg/l | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Potassium (K) | mg/l | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Sodium (Na) | mg/l | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |

Crédit photographique (couverture)

Manuel Nicolas (en haut à gauche), Sébastien Cecchini (en haut à droite), Luc Croisé (en bas)

Légendes des photos de la couverture

En haut à gauche : Test de l'inertie chimique d'une gouttière de collecte de pluviollessivats par aspersion puis analyse d'une solution d'eau déminéralisée, en Forêt de Fontainebleau, en juillet 2016

En haut à droite : Débourrement des feuilles de hêtre

En bas : Lecture d'un dendromètre permanent dans le cadre du suivi de l'accroissement annuel des arbres sur la placette SP 39

Exemplaires imprimés : 600

Imprimerie ONF – Fontainebleau



Office National des Forêts

Direction forêts et risques naturels

Réseau RENECOFOR

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

Boulevard de Constance - 77300 Fontainebleau

Tél. : +33 (0) 1 60 74 92 28

Méls : manuel.nicolas@onf.fr ; sebastien.cecchini@onf.fr ; luc.croise@onf.fr ;
sebastien.mace@onf.fr ; chantal.lavalley@onf.fr