

## Bilan technique de l'année 2020



Juillet 2021



Ce document est à citer sous la forme suivante :  
NICOLAS M., CECCHINI S., CROISÉ L., LAVALLEY C., MACÉ S., SCLAMEULD D., 2021 :  
RENECOFOR – Bilan technique de l'année 2020.  
Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, 26 p.



# RENECOFOR

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

## Bilan technique de l'année 2020

Auteurs : Manuel NICOLAS  
Sébastien CECCHINI  
Luc CROISÉ  
Chantal LAVALLEY  
Sébastien MACÉ  
Didier SCLAMEULD

Programme soutenu financièrement par :

- le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation,
- le ministère de la Transition écologique et solidaire,
- l'Office national des forêts.

Juillet 2021

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

1.	Rappel des missions du réseau RENECOFOR .....	1
1.1.	Historique et objectifs du réseau RENECOFOR.....	1
1.2.	Organisation du réseau RENECOFOR .....	2
1.3.	Financement et gouvernance .....	3
1.4.	Évaluation scientifique .....	3
2.	Activités de l'année 2020.....	4
2.1.	Impacts de la pandémie de Covid-19 et des mesures sanitaires d'urgence .....	4
2.2.	Réalisation du programme de mesures.....	4
2.2.1.	Fin de la campagne quinquennale d'inventaires dendrométriques.....	5
2.2.2.	Campagne quinquennale d'inventaires floristiques : reportée à 2021 .....	7
2.3.	Passation du marché d'analyse des eaux de pluie et solutions du sol .....	7
2.4.	Support pour d'autres mesures sur le terrain : suivi du microclimat.....	8
2.4.1.	Suivi du microclimat .....	8
2.4.2.	Caractérisation de la diversité des microorganismes du sol .....	9
2.5.	Réunion d'information annuelle.....	10
2.6.	Communication .....	10
3.	Initiation de la cartographie des dispositifs.....	11
3.1.	Choix de la solution Field-Map.....	11
3.2.	Prise en main de l'outil Field-Map depuis l'automne 2020 .....	13
3.3.	Précision satisfaisante des relevés cartographiques.....	13
3.4.	Un effort à poursuivre sur l'ensemble du réseau.....	15
4.	Publications écrites et communications orales.....	17
4.1.	Recensement des productions documentaires .....	17
4.2.	Revue de quelques résultats marquants publiés en 2020.....	17
4.2.1.	Quelle interaction des stress biotiques et abiotiques sur la santé des arbres ?.....	17
4.2.2.	Les dépôts d'azote : facteur important de la croissance des arbres .....	18
4.2.3.	Étudier la décomposition des matières organiques avec des sachets de thé.....	18
4.3.	Contribution de l'équipe de coordination aux valorisations externes .....	19
5.	Conclusions.....	20
6.	Bibliographie.....	23
6.1.	Publications émanant de RENECOFOR et/ou basées sur ses données .....	23
6.2.	Communications orales émanant de RENECOFOR et/ou basées sur ses données .....	25
6.3.	Autres références citées.....	25

## 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 détecter, comprendre et anticiper les effets de ces changements.

Depuis 1992, le réseau RENECOFOR observe l'évolution des écosystèmes forestiers sur 102 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 l'amélioration de modèles de recherche.

Les sites et les échantillons archivés fournissent aussi un support à des recherches qui, pour beaucoup, ne seraient pas réalisables autrement.

RENECOFOR remplit pleinement ses missions, et s'avère utile même au-delà. Il constitue un patrimoine scientifique remarquable, dont la valeur croît avec l'âge. Au total, il a permis d'alimenter plus de 200 articles scientifiques et 21 thèses de doctorat. En 2020, malgré le contexte de la pandémie de Covid-19 et les restrictions sanitaires imposées à l'échelle nationale, l'essentiel de ses activités a pu être poursuivi comme prévu. Les derniers résultats publiés illustrent encore une fois la diversité des enjeux auxquels il contribue à répondre. Ils permettent notamment de mieux comprendre les réponses des arbres au climat, aux attaques d'insecte, et aux pollutions atmosphériques. Ils permettent aussi de progresser dans la modélisation de la dynamique des matières organiques, au cœur du fonctionnement de l'écosystème, du cycle des éléments nutritifs, et du puits de carbone que constituent les forêts.

RENECOFOR est en passe d'atteindre avec succès l'horizon de 30 ans initialement dessiné. Alors que les changements environnementaux se poursuivent, se surimposent les uns aux autres et font peser des incertitudes croissantes sur l'avenir des forêts, l'observation restera une approche indispensable pour évaluer, mieux comprendre et essayer d'anticiper des phénomènes inédits. Le dispositif doit être prolongé, capitalisant ainsi sur les connaissances acquises, mais il devra s'adapter aux défis d'un suivi à très long terme (50 ans, 100 ans ou plus) et à l'évolution des questionnements sur l'avenir des forêts. Cela impliquera un renouvellement des placettes arrivant à échéance de leur récolte. Pour conserver le bénéfice des placettes amenées à être remplacées et la possibilité de les réinvestir dans plusieurs décennies, un effort de cartographie a été initié avec succès pour garder la trace précise de l'emplacement de chaque dispositif.

# 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 (Nations Unies, Convention Air), 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 ou PIC Forêt). 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 par la suite (le dernier ayant été « Forest Focus »). Il répond aussi, depuis 2018, aux obligations faites par la Directive UE 2016/2284 sur les plafonds d'émissions nationaux (NEC) de suivre les impacts des pollutions atmosphériques sur les écosystèmes naturels. Des 3 réseaux français de surveillance des forêts, 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 (dépérissement 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.

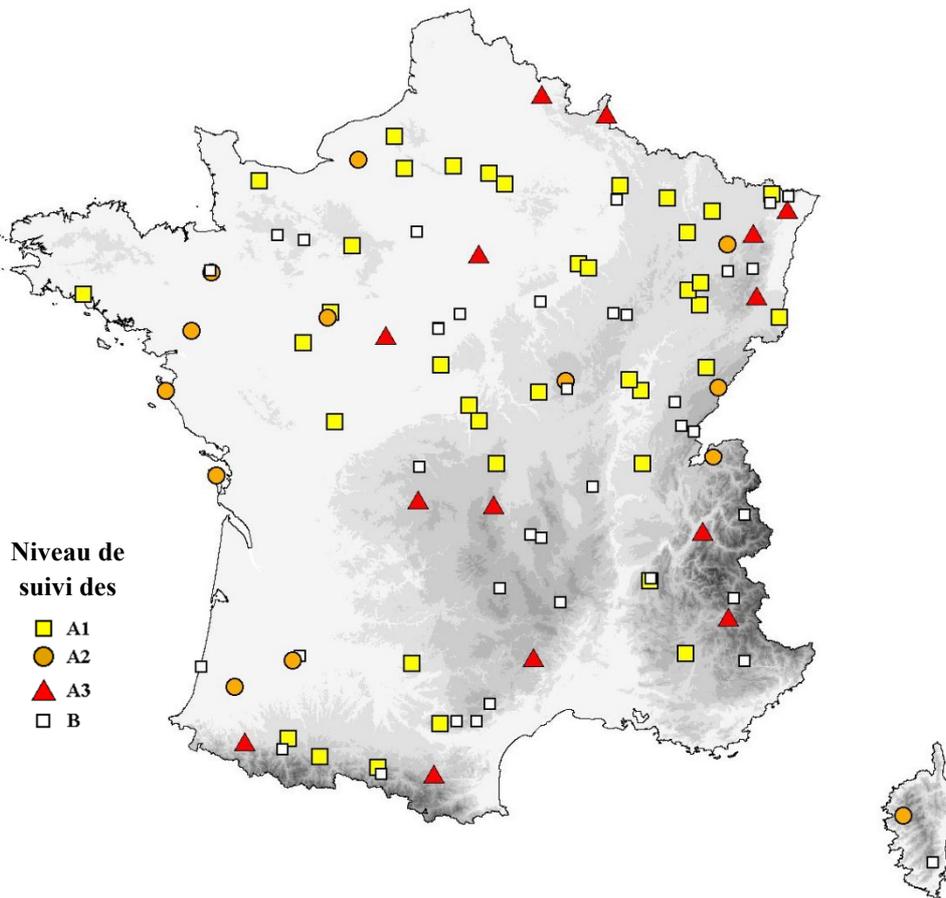
Le but principal du réseau RENECOFOR est de détecter d'éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers et de caractériser les raisons de ces changements. Ses objectifs (Biro et Landmann, 2008) sont les suivants :

- 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, notamment en relation avec les dépôts atmosphériques,
- iii.* L'évolution de la biodiversité.

**Figure 1 :** Emplacement des 102 sites du réseau RENECOFOR. *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.*



## 1.2. 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 engagements 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, INRAE...) 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, dernière année du règlement Forest Focus. Depuis 2007, le financement du réseau a été entièrement assuré par des bailleurs de fonds nationaux, à savoir en 2020 :

- l'Office national des forêts (ONF),
- le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA),
- le ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES), à la fois par sa Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (MTES-DGALN) et par sa Direction générale de l'énergie et du climat (MTES-DGEC).

En 2019, il est à noter que cette dernière a pris le relais de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), contributrice historique au financement des activités du réseau en matière de suivi impacts des pollutions atmosphériques.

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. Évaluation 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.

Le point de vue extérieur et détaillé des experts sollicités a permis, lors de ces deux évaluations, de reconnaître l'originalité et l'intérêt persistant des activités du réseau, et d'apporter des idées neuves pour son orientation. Pour plus de détails, leurs rapports sont téléchargeables sur le site Internet du réseau [www.onf.fr/renecofor](http://www.onf.fr/renecofor), à la rubrique « Qu'est-ce que RENECOFOR ? ».

## **2. Activités de l'année 2020**

### **2.1. Impacts de la pandémie de Covid-19 et des mesures sanitaires d'urgence**

L'année 2020 a été marquée par le début de la pandémie de Covid-19 et la mise en place par le Gouvernement de mesures d'urgence sanitaire qui ont fortement pesé sur l'activité économique. Deux périodes de confinement national ont notamment été décrétées en 2020, du 17 mars au 11 mai, puis du 30 octobre au 15 décembre, avec interdiction des rassemblements et incitation au télétravail, limitation des déplacements, et fermeture des commerces et activités non-essentiels.

Le réseau RENECOFOR a dû s'adapter à ces contraintes, mais a réussi malgré tout à poursuivre l'essentiel de ses activités selon le calendrier prévu. L'équipe de coordination a su mobiliser les moyens du bord pour assurer la continuité de son support malgré l'imposition soudaine du télétravail à 100 % et les multiples difficultés organisationnelles dues aux mesures sanitaires d'urgence. Sur le terrain, les agents forestiers ont eu l'autorisation au moins de se déplacer seuls dans leur secteur de travail et ont pu continuer ainsi à assurer les observations et prélèvements dont ils ont la charge pour le réseau. Et, heureusement, la campagne dendrométrique quinquennale de l'hiver 2019-2020 a pu être quasiment achevée par les correspondants territoriaux du réseau avant que le premier confinement ne les empêche de se déplacer et de mener ces inventaires avec l'aide des agents locaux. Seules deux placettes ont vu l'inventaire de leur peuplement reporté à l'hiver suivant.

En revanche, les contraintes sur les déplacements et sur le travail en équipe (même en binôme) ont empêché la tenue de la campagne d'inventaire floristique qui devait démarrer au printemps 2020 et de la réunion d'information annuelle programmée à la fin mars. Ces activités ont dû être reportées dans l'espoir qu'elles puissent être menées en 2021.

### **2.2. Réalisation du programme de mesures**

Le programme des activités continue de suivre le calendrier défini lors de la métamorphose de 2008 (Tableau 1). Hormis la campagne d'inventaire floristique et de la réunion d'information annuelle, reportées à 2021, l'ensemble des activités périodiques prévues en 2020 a donc bien été réalisé. Outre les activités récurrentes d'année en année, 2020 aura été marquée par :

- la fin de la campagne quinquennale d'inventaire dendrométriques de l'hiver 2019-2020 sur l'ensemble des 102 placettes du réseau,
- la passation en janvier 2020 du circuit logistique et des analyses des prélèvements de dépôts atmosphériques et de solutions du sol au laboratoire SGS, nouveau titulaire de ce marché renouvelé par appel d'offres en 2019,
- l'appui à plusieurs collaborations de recherche pour enrichir les connaissances acquises sur les placettes RENECOFOR, pour l'étude des effets du microclimat forestier d'une part, et pour la caractérisation de la diversité microbienne des sols par l'analyse métagénomique de prélèvements de terre et de litière.

**Tableau 1 :** Programmation des activités périodiques du réseau RENECOFOR suivant le calendrier défini lors de sa métamorphose en 2008.

Sujet/année	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Actions de fond</b>					
Evaluation des données du réseau et publications				✓	
Développement du site Web du réseau				✓	
Réunions d'information plénières					
Réunions d'information CATAENAT				Reporté	
Colloque					
Comité de pilotage scientifique				✓	
<b>Collectes de données sur tous les sites (ensemble des niveaux A1+A2+A3+B)</b>					
Echantillonnage des sols					
Observations sanitaires				✓	
Inventaire des placettes passant en éclaircie				✓	
Observations phénologiques				✓	
Maintenance des placettes				✓	
Echantillonnage foliaire					
Suivi de croissance annuel des arbres observation				✓	
Inventaire dendrométrique quinquennal					
Inventaire floristique quinquennal			intercalib.	Reporté	
<b>Collecte de données sur les 27 sites de niveau A2+A3</b>					
Mesures des dépôts atmosphériques HORS couvert uniquement				✓	
<b>Collecte de données sur les 14 sites de niveau A3</b>					
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					Test capt.

### 2.2.1. Fin de la campagne quinquennale d'inventaires dendrométriques

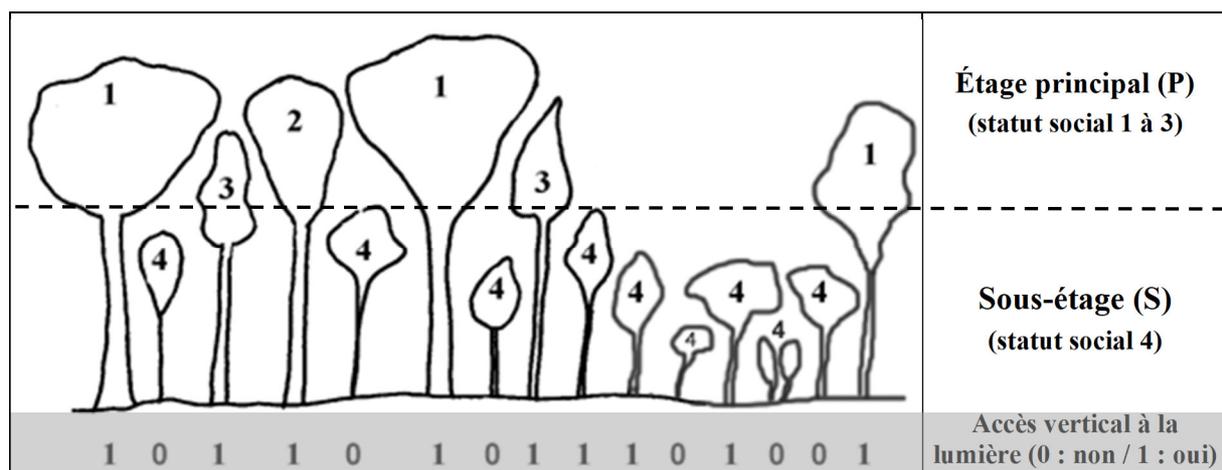
Le suivi dendrométrique concerne le peuplement délimité par les quatre angles de la zone centrale de 0,5 ha de chaque placette. Il a pour but d'évaluer l'accroissement à l'échelle du peuplement mais aussi à l'échelle de l'arbre, chaque arbre de la zone centrale dépassant 15 cm de circonférence à 1,30 m étant numéroté par une plaquette métallique depuis 2000.

La campagne de l'hiver 2019-2020 a concerné l'ensemble des 102 sites du réseau, mais sans les mesures de hauteurs (prévues seulement tous les 10 ans dans les peuplements adultes). Depuis 2014, le protocole a été révisé et complété pour pouvoir aussi inventorier les peuplements juvéniles et denses qui se sont développés après les dégâts de tempêtes (Cecchini *et al.*, 2014). Cependant, une nouvelle évolution a été apportée afin de résoudre un problème de définition de l'étage des arbres et de la rendre applicable aussi dans les peuplements mités (Cecchini *et al.*, 2019). En effet, le protocole visant à l'origine à suivre des peuplements adultes

et homogènes, un arbre était noté dans l'étage principal s'il avait un accès direct à la lumière ou si une partie de son houppier dépassait la limite inférieure de la canopée environnante. Sinon il était considéré comme faisant partie du sous-étage. Cependant, comment qualifier l'étage ainsi défini dans des trouées où des arbres petits bénéficient malgré tout d'un accès direct à la lumière ? Pour y remédier, il a été décidé de distinguer désormais l'étage d'un arbre sur le seul critère de la hauteur (selon qu'elle dépasse ou non la base des houppiers des arbres dominants et codominants), et d'évaluer séparément s'il bénéficie ou non d'un accès à la lumière (selon que la ligne verticale entre le ciel et son apex est intercepté ou non par une branche vivante d'un autre arbre) (Figure 2).

Comme lors des éditions précédentes, cette campagne a été précédée par un exercice de formation, organisé en octobre 2019 à Haguenau, pour les correspondants territoriaux qui dirigent les inventaires dendrométriques des sites RENECOFOR. Le protocole à jour y a présenté en détail, puis les participants ont été regroupés en 4 équipes pour inventorier indépendamment une même placette en Forêt de Haguenau (PS 67a), présentant un sous-étage de hêtres sous des pins sylvestres et où des trouées ont été créées justement par la tempête de 1999. Comme pour tous paramètres observés, les résultats montrent des écarts entre équipes dans l'appréciation de l'étage pour des hêtres avoisinant la base des houppiers des pins, et dans celle de l'accès à la lumière de tiges du sous-étage (dont l'identification de l'apex ne fait pas toujours consensus). Cependant le sens donné à ces paramètres ne suscite plus de cas de conscience, ce qui constitue déjà une nette amélioration.

Presque tous les inventaires de cette campagne ont pu être réalisés entre octobre 2019 et mars 2020, avant l'instauration du premier confinement national contre l'épidémie de Covid-19. Seules deux placettes ont vu l'inventaire de leur peuplement reporté à la période de dormance suivante : HET 52 (le 5 novembre 2020), et CHP 40 (le 10 février 2021).



**Figure 2 :** Nouvelle définition de l'étage et de l'accès à la lumière des arbres. *L'étage principal* comprend les arbres de statut dominant (1), codominant (2) ou dominé (3), tandis que le sous-étage correspond à un seul statut social (4).

### 2.2.2. *Campagne quinquennale d'inventaires floristiques : reportée à 2021*

La composition floristique est suivie sur les 102 sites du réseau RENECOFOR depuis 1995 suivant une périodicité quinquennale, avec l'appui d'experts botanistes majoritairement externes à l'ONF (universités, INRAE, conservatoires botaniques, bureaux d'études). Comme chaque campagne d'inventaire floristique, celle de 2020 avait été préparée un an auparavant, avec la réunion des différentes équipes de botanistes pour un exercice d'intercalibration à Fontainebleau du 2 au 4 juillet 2019, et devait débiter à partir du mois de mars pour des relevés à répéter au printemps et en été.

Les mesures sanitaires prises à partir du premier confinement décrété le 17 mars ont empêché la majorité des équipes de botanistes de se rendre comme prévu sur les placettes RENECOFOR, du fait d'interdictions complètes de déplacement par leur établissement et/ou de contraintes pratiques liées à ce contexte exceptionnel (fermeture des hôtels et restaurants, manque de véhicules pour respecter l'interdiction de covoiturage, charge de travail supplémentaire dans les universités pour la réorganisation à distance des enseignements et examens...). Puis l'incertitude pesant sur l'évolution des mesures sanitaires dans les mois suivants a conduit à reporter l'ensemble de la campagne à 2021 (relevés de printemps et d'été), en espérant qu'elle puisse alors être menée de manière homogène par les différentes équipes sur toutes les placettes. Depuis, en effet, cette campagne a pu débiter dans de bonnes conditions au printemps 2021 sur l'ensemble du territoire.

### 2.3. **Passation du marché d'analyse des eaux de pluie et solutions du sol**

Les collectes de dépôts atmosphériques et de solutions du sol sont réalisées toutes les semaines et analysées par période de 4 semaines, depuis décembre 1992, sur les placettes du sous-réseau CATAENAT. Le circuit d'acheminement de caisses de flacons et l'analyse chimique des échantillons sont délégués par l'ONF dans le cadre d'un marché renouvelé tous les 4 ans. Lors du dernier appel d'offres, le laboratoire SGS, ancien titulaire du marché de 1992 à 2010, a présenté une proposition de qualité équivalente mais plus compétitive économiquement que celle du laboratoire SOCOR, titulaire de 2011 à 2019, et a ainsi remporté le marché à compter de janvier 2020. La passation a été préparée dès l'automne 2019 et a permis d'assurer la continuité de la prestation pour le suivi des dépôts atmosphériques et des solutions du sol. Cependant, elle a nécessité plus de vigilance et d'effort que prévu.

L'acheminement des caisses de flacons, dont on pouvait espérer qu'il se poursuive sans changement puisque confié au même transporteur TNT par le nouveau titulaire, a notamment souffert d'erreurs de livraison et/ou de défauts de ramassage à l'adresse de plusieurs placettes. À cela se sont ajoutées les contraintes dues au confinement, avec la fermeture de commerces servant habituellement de relais colis. Des transporteurs et des adresses alternatifs ont donc dû être recherchés pour répondre aux cas problématiques rencontrés à chaque période de 4 semaines, avec l'aide des agents locaux et du laboratoire SGS. Aucun échantillon n'a été perdu, mais ce n'est qu'à partir du second semestre 2020 que l'organisation du circuit a pu se stabiliser et commencer à fonctionner sans encombre pour toutes les placettes concernées.

En outre, un effort particulier a été consenti au début du nouveau marché pour veiller à la continuité de la qualité des analyses d'un laboratoire à l'autre. Ainsi, lors des 3 premières périodes de prélèvements de 4 semaines, un doublon de chaque échantillon a été envoyé par SGS au laboratoire SOCOR pour qu'il répète les mêmes analyses. De plus, les deux laboratoires ont participé à l'essai inter-laboratoire organisé par le programme ICP Forests au début de l'année 2020. Ces efforts de contrôle ont permis de conforter la comparabilité des analyses pour la plupart des paramètres. Cependant ils ont aussi révélé un biais dans l'analyse du pH par SGS, qui a pu être rapidement corrigé par le remplacement de la sonde utilisée et par une procédure d'étalonnage mieux adaptée aux échantillons faiblement concentrés. Enfin, même si SGS a passé correctement l'essai ICP Forests pour tous les paramètres autres que le pH, les valeurs qu'il mesure pour l'alcalinité, le carbone organique et l'azote total présentent des incohérences plus fréquemment que cela n'était le cas avec le laboratoire SOCOR. Des améliorations techniques sont donc attendues pour ces trois paramètres, dans l'intérêt de la qualité du suivi du réseau, et dans celui du laboratoire SGS lui-même pour réduire les répétitions nécessaires à la validation des résultats de ses analyses.

#### **2.4. Support pour d'autres mesures sur le terrain : suivi du microclimat**

En plus de ses activités planifiées, le réseau RENECOFOR prête ses sites aux chercheurs qui le souhaitent pour y faire d'autres mesures, à la condition que celles-ci ne perturbent ni ses propres dispositifs ni son organisation. Les chercheurs intéressés peuvent prendre contact par email pour soumettre un projet de collaboration ([manuel.nicolas@onf.fr](mailto:manuel.nicolas@onf.fr)).

##### *2.4.1. Suivi du microclimat*

RENECOFOR sert notamment de support à l'Université de Picardie Jules Verne, depuis 2018, pour étudier la dynamique du microclimat en forêt et son impact sur la biodiversité. En effet, le réchauffement climatique mesuré par les stations météorologiques à découvert (macroclimat) ne correspond pas nécessairement au réchauffement ressenti par les organismes vivant au sein de leur habitat naturel (microclimat), car le microclimat est bien souvent découplé des fluctuations du macroclimat extérieur, ce qui est particulièrement le cas des écosystèmes forestiers tempérés (effet tampon du couvert). La question se pose donc de savoir si la tendance au réchauffement observée pour le macroclimat est également perceptible sous couvert forestier ? Si oui, cette tendance s'opère-t-elle à la même vitesse et suivant la même amplitude ? Quel impact ce pouvoir tampon du couvert forestier peut-il avoir sur l'évolution de la biodiversité ?

Un premier projet baptisé MORFO (MODélisation du Réchauffement microclimatique sous couvert FOrestier) avait permis en 2018 d'installer des sondes de température autonomes sous le couvert des arbres dans 13 sites de niveau A3, pour comparaison avec la météorologie suivie dans une clairière proche. En 2019, un financement de l'ANR a été obtenu pour un nouveau projet intitulé IMPRINT (Impacts du microclimat sur la redistribution de la biodiversité forestière en contexte de réchauffement du macroclimat), permettant le recrutement d'une doctorante, Eva Gril, et une approche étendue à un plus grand nombre de sites. En septembre 2020, ce sont les agents de 59 placettes du réseau RENECOFOR qui ont été sollicités pour

installer des sondes de température dans leur placette et dans un milieu ouvert proche, suivant un protocole clair et illustré. Plantées dans le sol, ces sondes sont conçues pour mesurer les conditions de température vécues par une petite plante herbacée typique, au niveau de ses feuilles (à 15 cm de hauteur), de ses bourgeons hivernants (à la surface du sol) et de ses racines (à 8 cm de profondeur), ainsi que l'humidité autour de ses racines. Une fois installées, ces sondes ont une autonomie de 10 ans en mémoire et en batterie et ne nécessitent aucune maintenance particulière. Après une ou deux années de mesure, il sera simplement demandé aux agents de les récupérer et de les renvoyer à Eva Gril pour en extraire les données.

#### 2.4.2. *Caractérisation de la diversité des microorganismes du sol*

Le sol abrite une extraordinaire diversité d'espèces de microorganismes, encore largement méconnue mais qui joue un rôle fondamental dans le recyclage des matières organiques, l'alimentation des arbres, et le fonctionnement de l'écosystème en général. Les résultats de l'exploration de cet univers suggèrent de plus en plus que l'identité des espèces qui composent ce cortège conditionne fortement la réponse des arbres aux changements environnementaux, leur croissance et la capacité de séquestration de carbone par la forêt. Le réseau ICP Forests avait déjà servi de support à une équipe de recherche de Londres pour évaluer la diversité des espèces de champignons mycorhiziens sur 137 placettes réparties en Europe (dont 12 placettes RENECOFOR) : les résultats publiés dans la revue *Nature* avaient montré l'impact des dépôts atmosphériques d'azote sur ce cortège de champignons symbiotiques, au détriment des espèces capables de mobiliser l'azote présent dans les matières organiques du sol, et au profit d'autres espèces moins avantageuses pour l'approvisionnement des arbres en nutriments (van der Linde *et al.*, 2018).

À leur tour, des chercheurs de l'école polytechnique de Zurich (ETH) ont sollicité le réseau ICP Forests pour caractériser la biodiversité des sols et étudier ses relations avec le fonctionnement des écosystèmes forestiers observés de longue date sur ces placettes. Leur proposition était simple : réaliser l'identification métagénomique de toutes les espèces de champignons et de bactéries, pour tous les échantillons de litière et de sol frais que les pays membres du réseau ICP Forests pourraient collecter sur leurs placettes et leur transmettre. Le réseau RENECOFOR a su répondre positivement à cette opportunité. Lors de l'été 2019, l'équipe de coordination s'est approprié le protocole requis, en se déplaçant pour réaliser ces prélèvements sur 12 premières placettes. En 2020, pour compléter l'échantillonnage, le protocole a été adapté pour permettre aux agents responsables de placettes de réaliser eux-mêmes ces prélèvements et de les envoyer par colis à l'équipe de coordination, pour centralisation et séchage standardisé avant transmission à l'ETH (Croisé *et al.*, 2020). L'opération menée en juillet et août 2020 a été un succès, puisqu'au total ce sont 100 placettes du réseau qui ont pu ainsi être échantillonnées et bénéficieront de cette caractérisation de la biodiversité de leur sol.

## **2.5. Réunion d'information annuelle**

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 2020, la réunion d'information prévue les 31 mars et 1<sup>er</sup> avril à Annecy a dû être annulée du fait du confinement national mis en place le 17 mars et restreignant au strict minimum les déplacements et rassemblements, tant professionnels que privés. Dans l'incertitude de l'évolution de ce contexte exceptionnel, il a été décidé de reporter à l'automne 2021 l'organisation de la prochaine réunion d'information, en format plénier.

## **2.6. Communication**

L'équipe de coordination RENECOFOR et les agents impliqués dans le suivi du réseau apportent régulièrement leur soutien à des actions de communication de l'ONF.

En 2020, le réseau a notamment contribué à la représentation de l'ONF au Salon de l'Agriculture, du 22 au 29 février, par la fourniture de matériels de présentation sur son stand (prélèvement de bois avec illustration de la réponse de la croissance d'un arbre aux années de sécheresse), et par l'intervention de Manuel Nicolas à un forum organisé sur les enjeux de l'adaptation des forêts.

L'équipe de coordination a également été sollicitée pour l'Agora de la forêt, programmée à Paris à l'occasion des Journées internationales de la forêt, du 20 au 22 mars. Sébastien Cecchini devait intervenir sur l'observation de l'impact du changement climatique sur le cycle saisonnier des arbres. Malheureusement, la manifestation a été annulée du fait du confinement décrété quelques jours avant, à partir du 17 mars.

### **3. Initiation de la cartographie des dispositifs**

RENECOFOR a été créé en 1992 pour une durée d'activité minimale de 30 ans. La poursuite de ses activités à plus long terme nécessitera de faire face au renouvellement d'un nombre croissant de peuplements, en prévoyant de remplacer les placettes qui ne répondent plus aux prérequis du réseau par de nouvelles placettes situées dans des conditions de peuplement adulte et homogène sur 2 ha. La gestion de ce turnover implique de concevoir une nouvelle méthodologie pour mettre en sommeil et garder la trace des placettes arrivées à la récolte finale, puis pour prospecter et installer de nouveaux sites en remplacement. C'est pourquoi, sans attendre le choix d'un scénario de poursuite du réseau par ses bailleurs de fonds (Nicolas *et al.*, 2020), il a été prévu dès 2020 d'étudier la possibilité de cartographier précisément les dispositifs et les arbres suivis au sein de chaque placette.

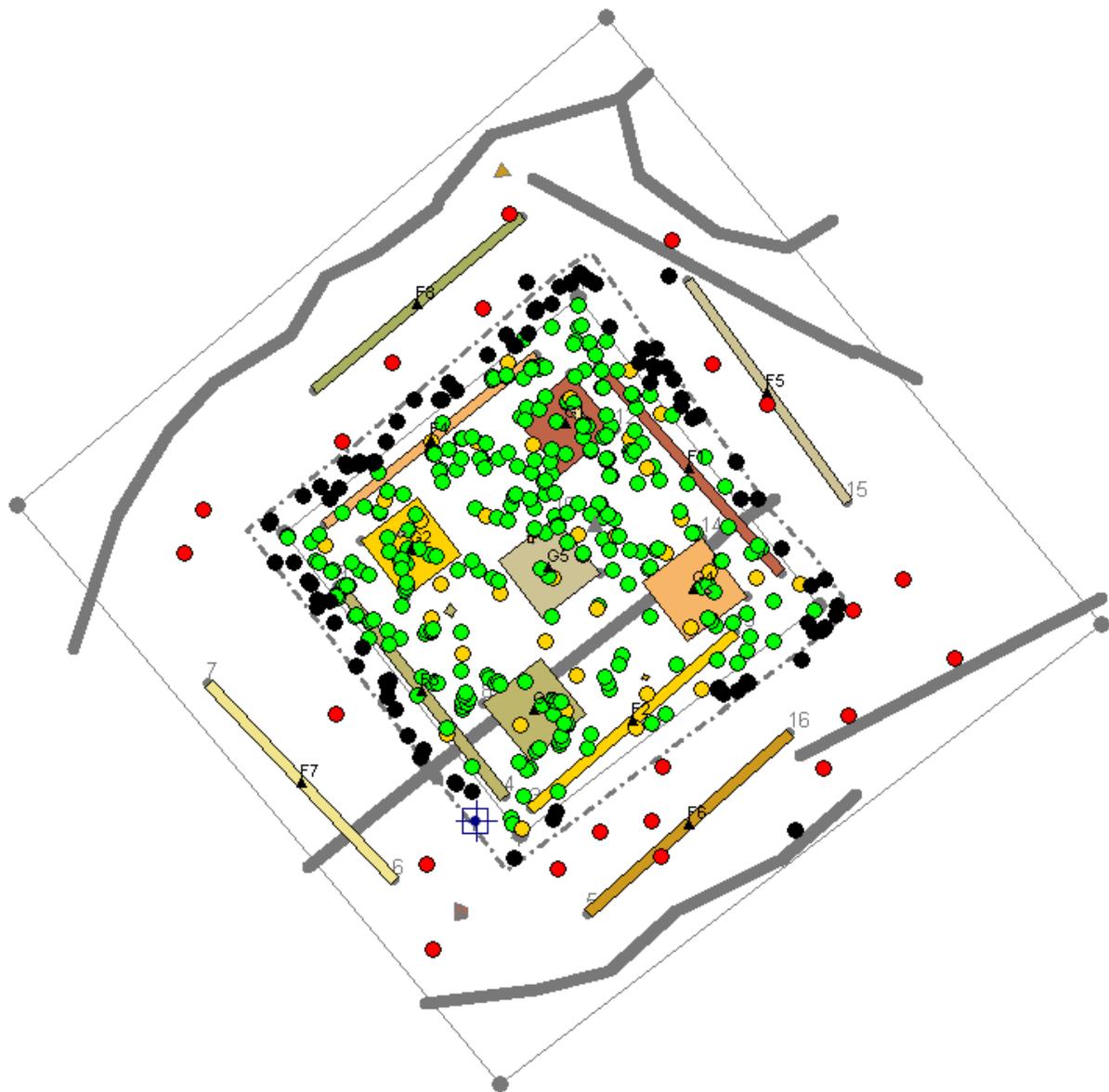
L'objectif principal est de pouvoir retrouver leur emplacement même après la destruction soudaine des piquets de repérage par une tempête, ou après des décennies de mise en sommeil d'une placette. Au passage, la réalisation de plans de localisation précis permettra de faciliter les activités courantes de maintenance et de suivi des placettes (ex : pour retrouver les tiges manquées lors d'un inventaire dendrométrique), et augmentera le potentiel de valorisation des données déjà collectées par la prise en compte de la répartition spatiale des arbres (ex : effets de la compétition entre les arbres, de l'hétérogénéité de répartition du peuplement).

#### **3.1. Choix de la solution Field-Map**

Pour répondre à ces objectifs, il faut viser une incertitude de localisation inférieure à 50 cm, ce que ne permettent pas, en forêt, même les meilleurs systèmes de positionnement par satellite disponibles sur le marché. En effet, les tests menés par le pôle RDI de l'ONF de Chambéry sur plusieurs modèles de récepteurs GNSS sous un couvert forestier mettent en évidence des écarts moyens de positionnement de l'ordre de 1,5 à 2 m au mieux, avec une durée d'acquisition de 5 minutes par point (Malabeux & Munoz, 2021 ; Munoz, 2014). Le choix s'est donc orienté vers l'acquisition de matériel de cartographie par mesure d'angle et de distance, pour positionner précisément chaque arbre ou dispositif relativement aux autres arbres et dispositifs présents au sein d'une placette. Ce type de relevé, anciennement réalisé à l'aide d'un théodolite, peut se faire aujourd'hui de manière bien plus efficace et ergonomique avec l'outil Field-Map.

Field-Map est une solution technique développée par la société tchèque IFER et adaptée particulièrement aux relevés cartographiques en forêt. Elle associe un télémètre laser (mesures de distance avec une précision de 4 cm) avec inclinomètre et un encodeur d'angles (précision de 0,05°) montés sur un trépied et connectés à une tablette permettant de piloter, d'enregistrer et de visualiser en temps réel la construction du relevé cartographique. L'acquisition de la position de chaque objet se fait par visée d'un réflecteur tenu par un autre opérateur. Pour cartographier l'ensemble des objets présents sur une placette de 2 ha, l'application permet de recouper les mesures faites depuis plusieurs stations de visée, en veillant à positionner précisément chaque nouvelle station par rapport à plusieurs objets déjà cartographiés.

**Figure 3** : Exemple de cartographie des dispositifs et des arbres sur la placette CHP 10.



- *Arbre non numéroté, de diamètre  $\geq 5$  cm dans le voisinage de la zone centrale*
- *Arbre numéroté, de diamètre  $\geq 5$  cm dans la zone centrale*
- *Arbre échantillon, dans la zone tampon*
- *Arbre observation, dans la zone centrale*
- - - *Clôture*
- *Limites de la zone centrale et de la zone tampon de la placette*
- *Cloisonnements d'exploitation et fossés de drainage*
- *Piquets d'angle de la zone centrale et de la zone tampon de la placette*
- F1-F8** *Bandes d'inventaires floristiques*
- G1-G5** *Grappes de prélèvement de sol*

### 3.2. Prise en main de l'outil Field-Map depuis l'automne 2020

Une formation a d'abord été organisée avec un représentant de la société IFER. Initialement envisagée au printemps 2020, elle a dû être reportée du fait des restrictions liées à la pandémie de covid-19, et s'est tenue finalement du 13 au 15 octobre, à Fontainebleau. Elle a été l'occasion de prendre en main l'appareillage, de paramétrer dans le logiciel Field-Map le protocole d'acquisition de données pour la cartographie d'une placette, et d'initier le relevé de la placette CPS 77. Après la formation, la finalisation de ce premier relevé en novembre 2020 a permis de terminer la prise en main de l'outil et de préciser le protocole à mettre en œuvre pour la cartographie de chaque nouvelle placette à la lumière de cette première expérience. Depuis, douze autres placettes ont pu être cartographiées entre décembre 2020 et avril 2021 : CHP 10, CHS 10, DOU 71, EPC 71, HET 65, PL 41, PM 40c, PS 41, PS 45, PS 76, PS 78, PS 89.

Les objets visés lors de la cartographie sont :

- **les limites de la placette**, incluant : les piquets matérialisant les angles de la zone centrale et de la zone tampon, et le périmètre de la clôture entourant la zone centrale,
- **les arbres** : les arbres numérotés et suivis individuellement, notamment tous ceux de plus de 5 cm de diamètre régulièrement inventoriés dans la zone centrale, ainsi que les arbres du voisinage immédiat situés entre la limite de la zone principale et la clôture,
- **les dispositifs de suivi**, dont : les bornes de géomètre délimitant les bandes d'inventaire floristique et les grappes de prélèvement de sol, les fosses de description pédologique, les différents collecteurs présents pour le réseau (dépôts atmosphériques, solutions du sol, chutes de litière) ou pour d'autres recherches qui se servent de son support,
- **les infrastructures linéaires** : routes et chemins d'exploitation, fossés de drainage.

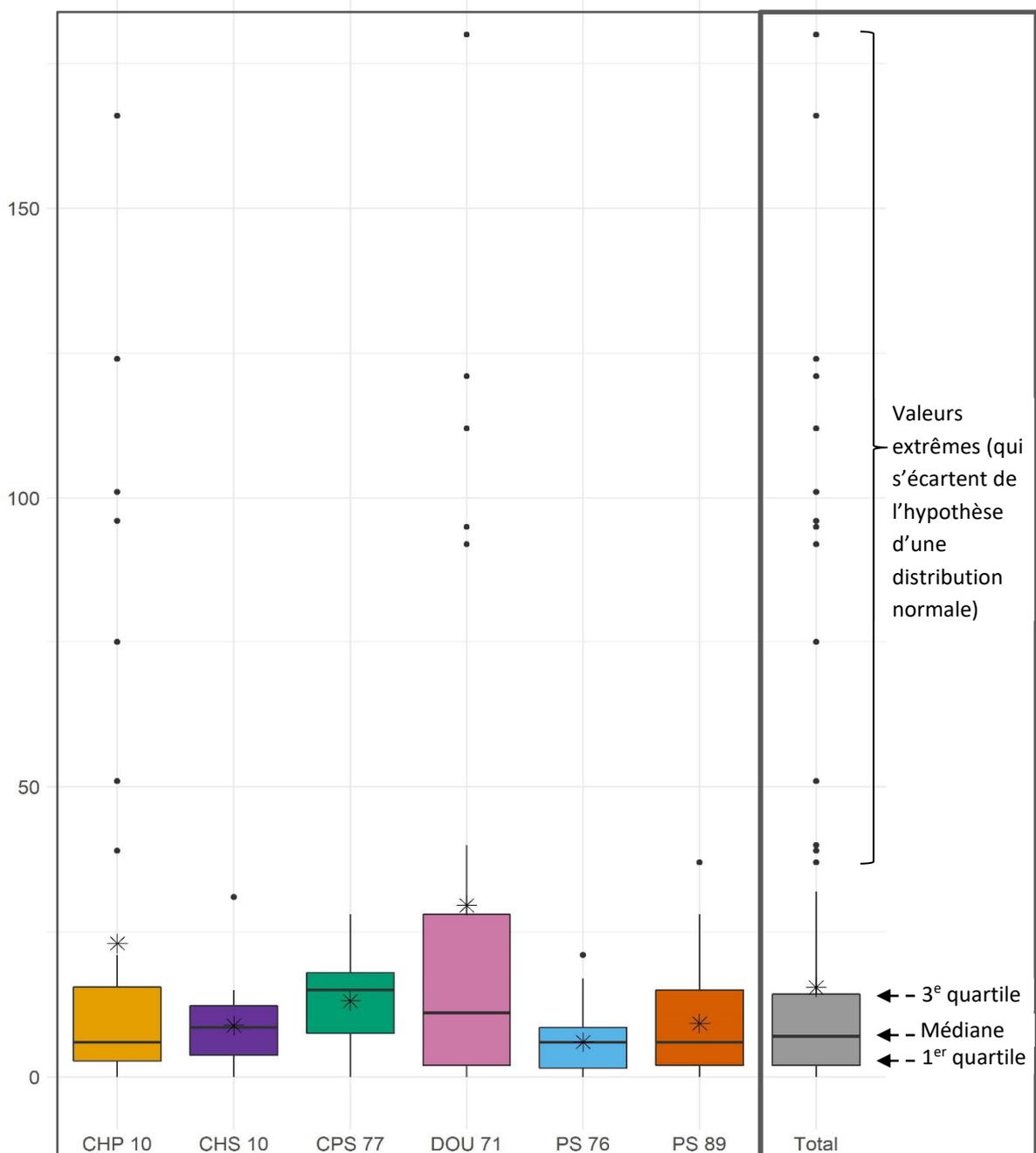
Leur relevé au sein d'une placette nécessite le travail d'une équipe de 3 personnes pendant environ 2 jours, voire 3 ou 4 jours dans des conditions difficiles (notamment selon le nombre d'arbres à cartographier et la réduction de la visibilité par le sous-bois). À l'occasion de ces relevés, les quatre angles de zone centrale sont géolocalisés avec un récepteur GNSS, afin de positionner la carte obtenue dans un référentiel de coordonnées géographiques (avec une précision espérée de l'ordre de 2 ou 3 m). De plus, les emplacements des 4 piquets d'angles de la zone centrale sont sécurisés par l'installation de bornes de géomètre, de manière à pouvoir les retrouver précisément même en cas de chute des piquets (après une tempête par exemple).

### 3.3. Précision satisfaisante des relevés cartographiques

La précision des relevés réalisés avec l'outil Field-Map a été évaluée sur 6 placettes, en comparant les distances cartographiées entre plusieurs couples de bornes de géomètres avec les valeurs de ces distances mesurées au ruban de 50 m (Lorgeau, 2021). La Figure 4 montre la distribution des écarts de distance mesurés pour chacune des placettes de mesure, et au total.

Quelques écarts apparaissent anormalement élevés (jusqu'à 180 cm), sur 2 des 6 placettes (CHP 10 et DOU 71), mais peuvent s'expliquer par des difficultés ponctuelles de mise en station de l'appareil ou de correction de pente. Dans le cas général, la précision offerte par la solution

Field-Map correspond bien aux attentes. Au total, l'erreur moyenne est de 15 cm seulement, 78 % des écarts de distance étant inférieurs à cette moyenne, et 93 % d'entre eux étant inférieurs à 50 cm. Ce constat ne diffère pas notablement d'une placette à l'autre : dans tous les cas, les écarts de distance sont en grande majorité inférieurs à 30 cm. De manière plus qualitative, cette bonne précision s'apprécie par la cohérence des cartes obtenues : par exemple, la répartition des arbres numérotés et des arbres non numérotés est généralement bien délimitée, comme prévu, par le périmètre relevé pour la zone centrale de chaque placette (cf. Figure 3).



**Figure 4 :** Écarts (en cm) entre les distances cartographiées avec Field-Map et celles mesurées au ruban de 50 m pour 168 couples de bornes de géomètre répartis au sein de 6 placettes. Les boîtes à moustaches représentent la distribution des valeurs comme indiqué pour l'effectif total, et l'astérisque figure la moyenne.

### 3.4. Un effort à poursuivre sur l'ensemble du réseau

L'effort de cartographie des dispositifs est nécessaire pour la maintenance et le fonctionnement à long terme du réseau RENECOFOR. Il va se poursuivre en priorité sur les placettes arrivant à échéance de récolte et/ou menacées par la présence de scolytes, mais c'est bien l'ensemble du réseau qui est visé dans les prochaines années.

*Télémètre laser et  
inclinomètre  
TruPulse 200X*

*Encodeur d'angles  
horizontaux MapStar  
TruAngle*

*Tablette durcie  
équipée du logiciel  
Field-Map*

*Support sur trépied  
réglable avec niveau  
à bulle*



**Illustrations** du matériel utilisé pour la cartographie des dispositifs avec le logiciel Field-Map.  
*Photographies par Sébastien Cecchini et Luc Croisé.*

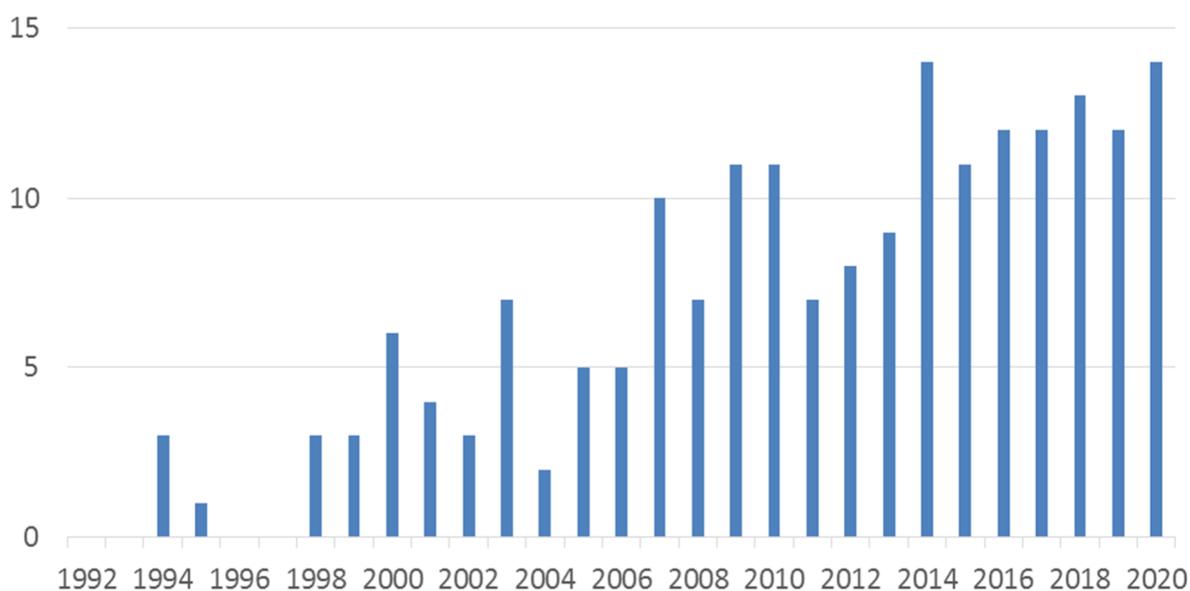
*Ci-dessus : équipements de mesure sur trépied.*

*Ci-contre : réflecteur positionné à l'aplomb d'une borne de géomètre matérialisant l'angle d'une grappe de prélèvement de sol. Le télémètre laser permettant d'acquérir la position du réflecteur jusqu'à plus de 70 m de distance, l'usage d'un talkie-walkie et le port d'un gilet fluorescent facilitent grandement la coordination entre les opérateurs.*

**Tableau 2 :** Nombre de publications et communications scientifiques nouvellement recensées en 2020 comme émanant du réseau RENECOFOR et/ou basées sur ses données. *Les articles scientifiques acceptés en 2020 mais publiés ultérieurement ne sont pas comptabilisés.*

	Documents portant sur des données de monitoring nationales uniquement	Documents portant sur des données de monitoring de plusieurs pays	Total
Présentations orales	1	1	2
Publications dans des revues à comité de lecture	9	5	14
Manuels de référence	1	1	2
Rapports scientifiques		2	2
Thèse de doctorat	1		1
Autres documents	3	1	4
<i>Total</i>	<i>15</i>	<i>10</i>	<i>25</i>

**Figure 5 :** Nombre d'articles publiés de 1992 à 2020 dans des revues scientifiques à comité de lecture, émanant du réseau RENECOFOR et/ou basés sur ses données.



## 4. Publications écrites et communications orales

### 4.1. Recensement des productions documentaires

Le Tableau 2 comptabilise par catégorie les publications et communications scientifiques nouvellement recensées en 2020 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 5). 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.

### 4.2. Revue de quelques résultats marquants publiés en 2020

#### 4.2.1. *Quelle interaction des stress biotiques et abiotiques sur la santé des arbres ?*

La santé des arbres forestiers est menacée par les changements globaux, et avec elle leur capacité à croître et à séquestrer du carbone de l'atmosphère (Ferretti *et al.*, 2021). Le déficit foliaire, principal indicateur suivi dans le cadre du programme ICP Forests, s'est dégradé significativement au cours des vingt dernières années pour la plupart des essences, en Europe (Michel *et al.*, 2020) et en France (Maaf & IGN, 2016). Comment cela va-t-il évoluer dans les prochaines décennies ? Pour pouvoir le prédire, il y a un enjeu à mieux comprendre l'influence des multiples facteurs qui affectent l'état de santé des arbres, mais peu d'études s'y sont penchées jusqu'à présent. Face au manque de travaux de recherche sur le suivi de cet indicateur sanitaire, une première initiative avait été prise par le réseau RENECOFOR pour explorer les données collectées de 1994 à 2009. Elle avait permis de mettre en évidence des premières tendances significatives (majoritairement à la dégradation) de la santé des arbres, et d'identifier les principaux facteurs associés à cette dynamique temporelle, en l'occurrence : les précipitations, la densité du peuplement et le nombre d'arbres présentant un problème sanitaire (Ferretti *et al.*, 2014).

Pour approfondir le sujet, une seconde étude a été lancée en 2017, dans le cadre d'une convention avec l'INRA Bordeaux, et a donné lieu en 2020 à la publication d'un article scientifique (Toïgo *et al.*, 2020). Elle s'est appuyée sur un jeu de données prolongé jusqu'en 2015, et a mis en œuvre une nouvelle approche d'analyse permettant d'évaluer les interactions entre les facteurs biotiques et abiotiques qui pèsent sur le déficit foliaire des chênes et des hêtres. Elle révèle des interactions significatives mais de nature différente entre les événements de sécheresse, les attaques d'insectes et la nutrition des arbres (ratio N/P). Pour les chênes sessile et pédonculé, les impacts des épisodes de sécheresse et des attaques d'insectes s'additionnent

sans que leur interaction n'induit d'impact supplémentaire sur le déficit foliaire : l'impact des attaques d'insectes apparaît similaire quelles que soient les conditions de sécheresse. Pour le hêtre en revanche, une synergie apparaît entre ces deux facteurs : les attaques d'insecte ont un impact d'autant plus important qu'elles interviennent durant un épisode de sécheresse. De la même manière, la nutrition des arbres présente une interaction synergique avec les attaques d'insectes aussi bien pour le hêtre que pour les chênes sessile et pédonculé : l'impact des attaques d'insectes sur le déficit foliaire est d'autant plus important que le ratio N/P est faible. Une hypothèse peut être que, pour subvenir à leurs besoins en azote, les insectes doivent consommer d'autant plus de feuilles que celles-ci ont une teneur relativement faible en cet élément. Ces interactions mises en évidence illustrent la complexité des phénomènes à prendre en compte pour espérer prédire l'évolution de la santé des arbres suivant l'évolution des facteurs environnementaux.

#### 4.2.2. *Les dépôts d'azote : facteur important de la croissance des arbres*

De même que leur état de santé, la croissance des arbres et des peuplements forestiers est soumise à l'influence de multiples facteurs environnementaux. Mais quelle est l'importance respective de ces facteurs, et notamment des pollutions atmosphériques telles que les retombées d'azote ou la teneur en ozone de l'air ? Pour répondre à cette question, Etzold *et al.* (2020) ont mis à profit le jeu de données sans équivalent collecté par le programme ICP Forests : quatre essences principales (épicéa, pin sylvestre, hêtre, chêne) représentées par 442 placettes réparties à travers l'Europe, avec des inventaires dendrométriques répétés de 1995 à 2010 pour évaluer l'accroissement des peuplements en volume, et de nombreuses autres variables disponibles pour prendre en compte l'effet de facteurs associés aux caractéristiques du peuplement, au climat, aux pollutions atmosphériques, et à la fertilité minérale. Les analyses ont été menées par essence, en combinant différentes approches de modélisation statistique (régressions linéaires à effets mixtes, et modèles d'équation structurelles). Les résultats font d'abord ressortir, sans surprise, les effets significatifs de la densité (positivement) et de l'âge (négativement) du peuplement sur l'accroissement. Puis les dépôts d'azote apparaissent comme le principal facteur environnemental d'influence, en particulier pour les résineux et pour le hêtre. L'azote a un effet positif sur la croissance des arbres, mais qui devient négatif au-delà d'un seuil évalué entre 24 et 31 kg/ha/an. L'influence du climat ressort également, en particulier l'effet positif de la température sur la croissance de l'épicéa, ainsi que celui des facteurs de fertilité minérale (nutrition des arbres en azote et en phosphore). En revanche, l'ozone n'apparaît dans presque aucun cas comme un facteur significatif de la croissance des arbres.

#### 4.2.3. *Étudier la décomposition des matières organiques avec des sachets de thé*

La vitesse de décomposition des matières organiques est un paramètre important du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Elle conditionne à la fois l'efficacité du recyclage des éléments nutritifs, le stockage de carbone dans les sols, et constitue un indicateur de l'activité biologique. Cependant elle pourrait être affectée par l'évolution des conditions environnementales, et par celle du climat en particulier.

C'est sur la suggestion de l'INRA Bordeaux et avec sa collaboration que le réseau RENECOFOR a participé en 2017 à l'expérimentation mondiale Tea bag index (site Internet : <http://www.teatime4science.org/>) (Nicolas *et al.*, 2018). Le principe proposé était d'utiliser des sachets de thé de marque *Lipton*, un matériel standard et facilement disponible partout dans le monde, pour évaluer la vitesse de décomposition des matières organiques dans une grande diversité de contextes écologiques. Les agents locaux avaient été sollicités, et un kit de matériel leur avait été fourni, pour mener la même expérience en même temps, de juin à septembre 2017, sur l'ensemble des placettes : déposer des sachets de thé aux propriétés contrastées (thé vert et rooibos) à la surface de la litière et dans le sol (à 8 cm de profondeur), puis les récupérer 3 mois plus tard et les retourner à l'INRA Bordeaux. L'opération s'était déroulée avec succès dans 99 des 102 placettes, avec un total de plus de 1 100 sachets de thé récupérés et traités par l'INRA (étuvage, récupération et pesée de leur contenu).

Les résultats ont été publiés en 2020 dans la revue *Ecosystems* (Fanin *et al.*, 2020). Logiquement le thé rooibos, contenant moins de nutriments et plus de composés organiques récalcitrants, s'est nettement moins décomposé en 3 mois que le thé vert, avec une perte de masse moyenne de 25,8 % et 65,4 % respectivement. La large gamme de conditions couverte par les 99 placettes a permis d'obtenir des modèles significatifs pour quantifier l'influence relative des variables liées au climat, au sol, et à l'essence principale, sur les variations de cette vitesse de décomposition. Ils nous apprennent que, si la décomposition des matières organiques les plus labiles (thé vert) est principalement influencée par le macroclimat, celle des matières organiques les plus récalcitrantes (thé rooibos) l'est principalement par les facteurs du sol. L'influence du macroclimat n'est donc pas toujours prépondérante selon la qualité des matières organiques considérées, qui ressort comme le premier facteur à prendre en compte. De plus, l'enfouissement dans le sol a conduit à une décomposition plus rapide par rapport aux sachets de thé déposés à la surface de la litière, et ce particulièrement pour le thé vert dans les environnements les plus secs, suggérant un effet important des conditions microclimatiques telles que l'humidité disponible le long du gradient vertical du sol. Ces résultats contribuent ainsi à mieux comprendre et modéliser la dynamique des matières organiques du sol selon l'évolution des conditions environnementales.

#### **4.3. 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 2020, elle a répondu à 33 demandes de données. Le programme ICP Forests a également relayé 30 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 et ses sites, à condition que les mesures envisagées ne portent pas atteinte aux missions de suivi du réseau RENECOFOR (cf. chapitre 2.4).

Le Tableau 3 liste les projets de recherche en cours en 2020 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 constitue un patrimoine d'information inédit et actif depuis 1992 pour observer les changements globaux, d'une part, et constater leurs effets sur les écosystèmes forestiers, d'autre part. En 2020, malgré les difficultés dues à la pandémie de Covid-19, il a pu poursuivre l'essentiel de ses activités comme prévu. Sa valeur continue de s'accroître au fil du temps. La production d'articles scientifiques n'a cessé de progresser : on en recense plus de 200, ainsi que 21 thèses de doctorat, couvrant une large gamme de domaines d'étude jusqu'au-delà de ses missions.

RENECOFOR est en passe d'atteindre avec succès l'horizon de 30 ans initialement dessiné. Alors que les changements environnementaux se poursuivent, se surimposent les uns aux autres et font peser des incertitudes croissantes sur l'avenir des forêts, l'observation restera une approche indispensable pour évaluer, mieux comprendre et essayer d'anticiper des phénomènes inédits. Le dispositif doit être prolongé, capitalisant ainsi sur les connaissances acquises, mais il devra s'adapter aux défis d'un suivi à très long terme (50 ans, 100 ans ou plus) et à l'évolution des questionnements sur l'avenir des forêts. Cela impliquera un renouvellement des placettes arrivant à échéance de leur récolte. Pour conserver le bénéfice des placettes amenées à être remplacées et la possibilité de les réinvestir dans plusieurs décennies, un effort de cartographie a été initié avec succès pour garder la trace précise de l'emplacement de chaque dispositif.

**Tableau 3** : Projets de recherche en cours en 2020 et auxquels l'équipe de coordination a apporté une contribution particulière

Intitulé	Financier(s)	Période	Contributions du réseau RENECOFOR
<b>Projet FoRepro</b> : Impact du changement climatique sur la reproduction et la régénération des arbres forestiers (suite du projet PotenChêne)	ANR	2019-2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Support d'étude : 12 placettes équipées pour la collecte de fleurs et de fruits sur des arbres individuels (10 chênes sessiles par placette), et installation de dendromètres électroniques</li> <li>- Participation des agents locaux au fonctionnement du dispositif</li> <li>- Test d'un protocole de suivi simplifié de fructification et de germination</li> <li>- Support d'étude : organisation de la collecte d'échantillons de sol et de litière sur l'ensemble des placettes</li> </ul>
<b>Étude</b> de l'action de la composition des microorganismes du sol sur la croissance des arbres, sous l'influence des dépôts atmosphériques, sur la base des sites ICP Forests	ETH Zurich	2019-2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Élaboration et déploiement d'un protocole applicable par les agents locaux</li> <li>- Centralisation et séchage des échantillons avant transmission à l'ETH Zurich</li> </ul>
<b>Projet AMORAD II</b> : Thèse + post-doctorat sur le comportement à long terme des retombées atmosphériques <sup>137</sup> Cs dans les forêts françaises	IRSN	2019-2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fourniture de données et d'échantillons archivés</li> <li>- Appui à l'organisation de prélèvements d'échantillons de biomasse sur les placettes CATAENAT</li> </ul>
<b>Projet Mottles</b> : Détermination de nouveaux seuils d'impact de l'ozone sur la végétation forestière	Union européenne (LIFE Environment)	2016-2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Support d'étude : 4 placettes avec historique de suivi des concentrations en ozone dans l'air et de ses impacts sur la végétation</li> <li>- Fourniture de données pour l'estimation du flux d'ozone stomatal</li> </ul>
<b>Étude</b> du cycle biogéochimique du <sup>36</sup> Cl : variations dans les dépôts atmosphériques, stocks et spéciation dans les sols d'écosystèmes naturels terrestres	EDF, ANDRA, CNRS, Université Aix Marseille	2017-2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fourniture de données et d'échantillons</li> </ul>

**Tableau 3 (suite) :** Projets de recherche en cours en 2020 et auxquels l'équipe de coordination a apporté une contribution particulière

<b>Intitulé</b>	<b>Financeur(s)</b>	<b>Période</b>	<b>Contributions du réseau RENECOFOR</b>
<b>Projet MORFO :</b> MOdélisation du Réchauffement microclimatique sous couvert FOrestier	CNRS, Université de Picardie	2018-2020	- Support d'étude : 13 placettes de niveau A3 équipées pour suivre la température de l'air sous le couvert des arbres en comparaison du suivi de leur station météorologique hors couvert - Participation des agents locaux au fonctionnement du dispositif
<b>Projet IMPRINT :</b> Impacts du microclimat sur la redistribution de la biodiversité forestière en contexte de réchauffement du macroclimat	ANR, Université de Picardie	2019-2023	- Support d'étude : 59 placettes équipées de sondes autonomes pour suivre le microclimat sous le couvert des arbres et le macroclimat hors couvert, données de suivi floristique - Participation des agents locaux au fonctionnement du dispositif
<b>Thèse de Lena Wohlgemuth :</b> Impact saisonnier de la végétation sur le dépôt atmosphérique de mercure	Université de Bâle	2018-2020	- Fourniture de données et d'échantillons
<b>Thèse de Margaux Clesse :</b> Étude multi-site de la réponse et résilience de la fertilité chimique des écosystèmes forestiers dans un contexte de changement	INRAE, ONF	2019-2022	- Fourniture de données et d'échantillons - Participation au pilotage de la thèse
<b>Observatoire des saisons :</b> guide d'observation phénologique "Les plantes au rythme des saisons"	Labex OTMed	2020-2021	- Participation aux adaptations pour des éditions en allemand puis en anglais
<b>Essai</b> de caractérisation des couleurs de référence de la sénescence foliaire	SOERE TEMPO	2020-2021	- Prélèvements et observations en forêt de Fontainebleau
<b>Étude</b> de la glomaline comme indicateur de la stabilité du carbone organique des sols	INRAE	2018-2020	- Fourniture de données et d'échantillons

## 6. Bibliographie

### 6.1. Publications émanant de RENECOFOR et/ou basées sur ses données

- Badeau V., Bonhomme M., Bonne F., Carré J., **Cecchini S.**, Chuine I., Ducatillion C., Jean F., Lebourgeois F., Kropp R., 2020. Pflanzen im Rhythmus der Jahreszeiten beobachten. Der phänologische Naturführer. Haupt Verlag, 272 p., ISBN: 978-3-258-08170-0
- Bel J., Legout A., Saint-André L., Hall S.J., Löfgren S., Laclau J.P., van der Heijden G., 2020. Conventional analysis methods underestimate the plant-available pools of calcium, magnesium and potassium in forest soils. *Scientific reports*, 10, 15703 (2020), doi: 10.1038/s41598-020-72741-w
- Cissé G., Essi M., **Nicolas M.**, Staunton S., 2020. Bradford quantification of glomalin-related soil protein in coloured extracts of forest soils. *Geoderma*, 372, 114394, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114394
- Croisé L., Nicolas M., Cecchini S., Macé S.**, 2020. RENECOFOR : Protocole expérimental. Etude de l'action des mycorhizes du sol sur la croissance des arbres, sous l'influence des dépôts atmosphériques. Version 4.0. ETH Zurich, Office National des Forêts, 16 p.
- Etzold S., Ferretti M., Reinds G.J., Solberg S., Gessler A., Waldner P., Schaub M., Simpson D., Benham S., Hansen K., Ingerslev M., Jonard M., Karlsson P.E., Lindroos A.-J., Marchetto A., Manninger M., Meesenburg H., Merilä P., Nöjd P., Rautio P., Sanders T.G.M., Seidling W., Skudnik M., Thimonier A., Verstraeten A., Vesterdal A., Vejpustkova M., De Vries W., 2020. Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests. *Forest Ecology and Management*, 458, 117762, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117762
- Fanin N., Bezaud S., Sarneel J.M., **Cecchini S., Nicolas M.**, Augusto L., 2020. Relative importance of climate, soil and plant functional traits during the early decomposition stage of standardized litter. *Ecosystems*, <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00452-z>
- Ferretti M., Fischer R., Mues V., Granke O., Lorenz M., Seidling W., **Nicolas M.**, 2020: Part II: Basic design principles for the ICP Forests Monitoring Networks. In: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 33 p + Annex
- Gauzere J., Teuf B., Davi H., Chevin L.M., Caignard T., Leys B., Delzon S., Ronce O., Chuine I., 2020. Where is the optimum? Predicting the variation of selection along climatic gradients and the adaptive value of plasticity. A case study on tree phenology. *Evolution Letters* 4-2: 109–123, doi:10.1002/evl3.160
- Hansson K., Laclau J.P., Saint-André L., Mareschal L., van der Heijden G., Nys C., **Nicolas M.**, Ranger J., Legout A., 2020. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 1: Common soil chemical analyses were poor predictors of stand productivity across a wide range of acidic forest soils. *Forest Ecology and Management*, 461, 117843, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117843

- Journé V., 2020. Influence du climat lors de l'investissement des ressources dans la reproduction chez les arbres forestiers : une approche par modélisation mécaniste. Thèse de doctorat, Université Aix Marseille, 295 p.
- Krüger I., Sanders T.G.M., Potočić N., Ukonmaanaho L., Rautio P., 2020. Increased evidence of nutrient imbalances in forest trees across Europe (ICP Forests Brief No. 4). Programme Co-ordinating Centre of ICP Forests, Thünen Institute of Forest Ecosystems. doi: 10.3220/ICP1597824383000
- Legout A., Hansson K., van der Heijden G., Laclau J.P., Mareschal L., Nys C., **Nicolas M.**, Saint-André L., Ranger J., 2020. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 2: Towards redefining the concept by untangling the role of the different components of biogeochemical cycling. *Forest Ecology and Management*, 461, 117844, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117844
- Michel A., Prescher A.K., Schwärzel K. (ed.), 2020. Forest Condition in Europe: the 2020 assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). Eberswalde: Thünen Institute, 95 p., doi: 10.3220/ICPTR1606916913000
- Moreaux V., Martel S., Bosc A., Picart D., Achat D., Moisy C., Aussenac R., Chipeaux C., Bonnefond J.M., Figuères S., Trichet P., Vezy R., Badeau V., Longdoz B., Granier A., Roupsard O., Nicolas M., Pilegaard K., Mateucci G., Jolivet C., Black A.T., Picard O., Loustau D., 2020. Energy, water and carbon exchanges in managed forest ecosystems: description, sensitivity analysis and evaluation of the INRAE GO+ model, version 3.0. *Geoscientific Model Development*, 13 (12), pp.5973-6009, doi: 10.5194/gmd-13-5973-2020
- Nicolas M., Cecchini S., Croisé L., Lavalley C., Macé S.**, 2020. RENECOFOR : bilan technique de l'année 2019. Fontainebleau : ONF. Département recherche, développement et innovation. 31 p.
- Nicolas M.**, Michel A., 2020. Addressing challenges associated with long-term forest ecosystem monitoring. In Michel A., Prescher A.K., Schwärzel K. (ed.), 2020. Forest Condition in Europe: the 2020 assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention). Eberswalde: Thünen Institute, 95 p., doi: 10.3220/ICPTR1606916913000
- Nölte A., Yousefpour R., Hanewinkel M., 2020. Changes in sessile oak (*Quercus petraea*) productivity under climate change by improved leaf phenology in the 3-PG model. *Ecological Modelling*, 438, 109285, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109285
- Penuelas J., Fernández-Martínez M., Vallicrosa H., Maspons J., Zuccarini P., Carnicer J., Sanders T.G.M., Krüger I., Obersteiner M., Janssens I.A., Ciais P., Sardans J., 2020. Increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations correlate with declining nutritional status of European forests. *Communications Biology* 3, 125. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0839-y>
- Schermer E., Bel-Venner M.C., Gaillard J.M., Dray S., Boulanger V., Le Roncé I., Oliver G., Chuine I., Delzon S., Venner S., 2020. Flower phenology as a disruptor of the fruiting dynamics in temperate oak species. *New Phytologist*, 225(3):1181-1192, <https://doi.org/10.1111/nph.16224>

- Seidling W., Hamberg L., Malis F., Salemaa M., Kutnar L., Czerepko J., Kompa T., Burianek V., Dupouey J.-L., Vodalova A., Canullo R., 2020. Comparing observer performance in vegetation records by efficiency graphs derived from rarefaction curves. *Ecological Indicators*, 109:105790, DOI:10.1016/j.ecolind.2019.105790
- SOCOR, 2020 : Bilan analyses ONF - Rapport qualité - Performances laboratoire SOCOR 2019, 59 p.
- Toïgo M., **Nicolas M.**, Jonard M., **Croisé L.**, Nageleisen L.M., Jactel H., 2020. Temporal trends in tree defoliation and response to multiple biotic and abiotic stresses. *Forest Ecology and Management*, 477, 118476, doi: 10.1016/j.foreco.2020.11847
- Van Sundert K., Radujkovic D., Cools N., De Vos N., Etzold S., Fernandez-Martinez M., Janssens I.A., Merilä P., Penuelas J., Sardans J., Stendahl J., Terrer C., Vicca S., 2020. Towards comparable assessment of the soil nutrient status across scales. Review and development of nutrient metrics. *Global Change Biology*, 26:392-409, doi: 10.1111/gcb.14802

## **6.2. Communications orales émanant de RENECOFOR et/ou basées sur ses données**

- Nicolas M.**, 2020. Overview of the QA/QC activities, suggestions for improvement in the collection of control data. Communication orale, 7 diapositives. ICP Forests, Quality Assurance Committee meeting, 25 novembre 2020.
- Nicolas M.**, 2020. Unique en son genre, et après ? Présentation du réseau RENECOFOR et de son évolution programmée. Communication orale, 23 diapositives. Séminaire OptiMix, INRAE, Nogent-sur-Vernisson.

## **6.3. Autres références citées**

- Barthod C., 1994 : Le système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. *Revue Forestière Française*, 46, 5 : 564-571.
- 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.
- Cecchini S., Croisé L., Macé S., Nicolas M., 2014 : Manuel de référence n°2 - méthodes de mesure des paramètres dendrométriques, 3ème version. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, Département recherche, développement et Innovation, 83 p.
- Cecchini S., Croisé L., Macé S., Nicolas M., 2019 : Manuel de référence n°2 - méthodes de mesure des paramètres dendrométriques, 4ème version. Éditeur : Office national des forêts, Direction forêts et risques naturels, Département recherche, développement et Innovation, 84 p.
- 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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.009>
- Ferretti M., Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., Croisé L., Frati L., Nicolas M., 2021. Tree canopy defoliation can reveal growth decline in mid-latitude temperate forests. *Ecological Indicators* 127:107749, doi:10.1016/j.ecolind.2021.107749
- 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.
- Lorgeau R., 2021 : Stage de mise en situation professionnelle dans le département Recherche, Développement et Innovation de l'ONF. Thématique : cartographie des arbres et des dispositifs d'observation au sein de placettes permanentes du réseau RENECOFOR. Rapport de stage de licence Sciences de la vie, Sorbonne Université, 13 p.
- 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.
- Malabeux L., MunozA., 2021 : Tests de récepteurs GNSS sous couvert forestier. Communication orale, 66 diapositives. Kfé R&D de l'ONF.
- Munoz A., 2014 : Le positionnement par satellite : les nouveaux récepteurs améliorent-ils les performances sous couvert forestier ? *Rendez-vous techniques*, n° 43, pp. 54-62
- Nicolas M., Cecchini S., Croisé L., Lavalley C., Macé S., 2018. *RENECOFOR : bilan technique de l'année 2017*. Fontainebleau : ONF. Département recherche, développement et innovation. 32 p.
- van der Linde S., Suz L. M., Orme C.D.L. , Cox F., Andreae H., Asi E., Atkinson B., Benham S., Carroll C., Cools N., De Vos B., Dietrich H.P., Eichhorn J., Gehrman J., Grebenc T., Gweon H.S., Hansen K., Jacob F., Kristöfel F., Lech P., Manninger M., Martin J., Meesenburg H., Merilä P., Nicolas M., Pavlenda P., Rautio P., Schaub M., Schröck H.W., Seidling W., Šrámek V., Thimonier A., Thomsen I.M., Titeux H., Vanguelova E., Verstraeten A., Vesterdal L., Waldner P., Wijk S., Zhang Y., Žlindra D., Bidartondo M.I. 2018. Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature*, vol. 558 , n° 7709 , pp. 243-248. DOI: 10.1038/s41586-018-0189-9

### **Crédit photographique (couverture)**

Sébastien Cecchini

### **Légendes des photos de la couverture**

En haut : Identification de la teinte des feuilles à l'aide de la Charte Munsell sur la placette CPS 77, dans le cadre d'un projet de création d'une palette de couleurs de référence, afin de déterminer la sénescence du foliaire depuis le sol

Au milieu : Bivouac à côté de la station météo de EPC 87 à la sortie du premier confinement en mai 2020, afin de réaliser un inventaire avant coupe, alors que les hébergements étaient fermés

En bas : Mesure des volumes des précipitations sur la placette CPS 77

**Maquette DCOM**



**Office National des Forêts**

Direction forêts et risques naturels

Réseau RENECOFOR

Site WEB : [onf.fr/renecofor](http://onf.fr/renecofor)

Boulevard de Constance - 77300 Fontainebleau

Méls : [manuel.nicolas@onf.fr](mailto:manuel.nicolas@onf.fr) ; [sebastien.cecchini@onf.fr](mailto:sebastien.cecchini@onf.fr) ; [luc.croise@onf.fr](mailto:luc.croise@onf.fr) ;  
[chantal.lavalley@onf.fr](mailto:chantal.lavalley@onf.fr) ; [sebastien.mace@onf.fr](mailto:sebastien.mace@onf.fr)