Office National des Forêts

RenDez-Vous techniques

N° 58-59-60 - 2018

SPÉCIAL RENECOFOR

25 ANS DE SUIVI DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS, BILAN ET PERSPECTIVES

Colloque des 11-13 octobre 2017 à Beaune

N° ISSN : 1763-6442

Directeur de publication
Albert Maillet

Rédactrice en chef
Christine Micheneau

Comité éditorial
Myriam Legay, Patrice Mengin-Lecreulx
(et autres correspondants)

Conception graphique
Agence LINÉAL

Crédit photographique
Page de couverture :
Luc Croisé, ONF

Périodicité
4 numéros ordinaires par an
(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)
Accès en ligne
http://www.onf.fr

Renseignements
ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : documentalistes @onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : Septembre 2019

4 Avant-Propos

Manuel Nicolas

Session 1

5 Ouverture du colloque

5 Introduction - Regards et attentes des bailleurs de fonds du réseau RENECOFOR
ONF, MAA, MTES, Ademe

10 Mise en perspective historique du monitoring forestier et du réseau RENECOFOR
Christian Barthod et Guy Landmann

14 Questionnements et enjeux actuels pour le monitoring forestier à l'échelle européenne
Annemarie Bastrup-Birk

18 Discussion

Session 2

20 Comment les arbres répondent-ils aux variations du climat ?

20 Introduction
Myriam Legay

23 Les réponses observées des arbres aux variations du climat (croissance, phénologie foliaire et fructification)
François Lebourgeois et Nicolas Delpierre

28 Mieux comprendre les processus d'influence du climat sur les arbres pour anticiper les effets de son évolution sur la composition et sur le fonctionnement des forêts
Xavier Morin et Isabelle Chuine

35 Utiliser les données d'observation pour tester des outils de télédétection : exemple de la détection satellitaire du débourrement et de la sénescence des feuilles
Éric Dufrêne et Kamel Soudani

39 Discussion

Session 3

43 Quel rôle joue la forêt dans la séquestration de carbone atmosphérique ?

43 Introduction
Christine Deleuze

45 Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ? Exemple du modèle CASTANEA
Éric Dufrêne

53 Le rôle de puits de carbone des sols forestiers : résultats de mesures et hypothèses explicatives
Mathieu Jonard

59 Comprendre la dynamique des matières organiques des sols, un compartiment-clé dans l'équilibre des écosystèmes forestiers
Delphine Derrien

65 Discussion

Session 4

68 Acidification et cycle des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers

68 Introduction
Laurent Saint-André

72 La réduction des émissions polluantes se répercute-t-elle pleinement dans les retombées atmosphériques de soufre et d'azote en France ?
Aude Bourin

77 Acidification et eutrophisation : vers un rétablissement de la fertilité chimique des sols forestiers ?
Quentin Ponette

84 Simuler les effets combinés de la pollution atmosphérique et du changement climatique sur les écosystèmes forestiers
Anne Probst

90 Discussion

Session 5

93 Dynamique des polluants en forêt

93 Introduction
Anne Probst

98 Quel devenir et quel impact des pollutions en métaux lourds en forêt ?
Laure Gandois

103 Mieux connaître le cycle des éléments dans les écosystèmes pour mieux évaluer les risques potentiels associés au stockage des déchets radioactifs
Yves Thiry

108 La forêt comme indicateur des polluants organiques persistants de l'atmosphère et de leur accumulation dans l'environnement : l'exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques
Jérôme Poulenard

112 Discussion

Session 6

115 Étude et suivi de la biodiversité forestière

115 Introduction
Hervé Jactel

118 Vingt ans de suivi de la flore : quels enseignements écologiques et méthodologiques ?
Jean-Luc Dupouey

123 Comment varient les communautés d'espèces de champignons ?
Benoît Richard

128 Comprendre les fortes variations des glandées et leurs effets sur la biodiversité associée
Samuel Venner

134 Discussion

Session 7

137 L'observation des forets à l'échelle pan-européenne

137 Introduction
Marco Ferretti

142 Une longue expérience de contrôle et d'amélioration de la qualité des mesures, pour un suivi des forêts comparable à l'échelle européenne
Nils König

148 Dégradation de la nutrition des arbres en phosphore : un signal confirmé à l'échelle européenne
Mathieu Jonard

153 Quelle contrainte la pollution à l'ozone fait-elle peser sur les forêts européennes, au vu des concentrations mesurées dans l'air ?
Marcus Schaub

158 Discussion

Session 8

160 Quelles perspectives pour le suivi des forêts ?

160 Introduction
Guy Landmann

162 Le point de vue de l'inventaire forestier national (IFN)
François Morneau

166 Le point de vue du Département de la Santé des Forêts (DSF)
Frédéric Delport

169 Regard sur le réseau RENECOFOR
Manuel Nicolas

172 Quels besoins et pistes d'évolution des dispositifs existants ? SOERE F-ORE-T
Laurent Saint-André

176 Quelles pourraient être les perspectives futures du monitoring forestier ? Un point de vue du PIC Forêts
Marco Feretti

178 Discussion

Clôture

182 Synthèse et remarques conclusives

Yves Birot

184 Clôture et remerciements

Manuel Nicolas et Myriam Legay

186 Glossaire*

** Tous les sigles et désignations particulières marqués d'un "*" sont explicités dans le glossaire*

25 ans, l'opportunité d'un **nouveau point d'étape**

Ce numéro spécial présente les actes du colloque organisé du 11 au 13 octobre 2017 pour les 25 ans du réseau de suivi national des écosystèmes forestiers (RENECOFOR).

En 2007, déjà, un premier colloque avait dressé un bilan très substantiel après quinze ans d'activité. Mais de nouveaux résultats ont émergé en abondance pendant les dix années suivantes et ont fourni une ample matière pour cette seconde édition. Et par nature, un dispositif de suivi tel que RENECOFOR appelle des points d'étape réguliers, pour au moins deux raisons. C'est une mission d'exploration, qui nous fait avancer vers l'inconnu, sans savoir *a priori* ce qu'il y aura à y trouver. À l'instar d'une mission d'exploration de l'espace, il convient donc de vérifier régulièrement si tout fonctionne comme prévu, d'examiner les résultats acquis, et d'en tirer des enseignements sur les phénomènes à l'œuvre dans notre environnement ainsi que sur notre capacité-même à les capter et à les expliquer. C'est un effort de long terme. Car l'évolution des écosystèmes forestiers s'étend sur des décennies voire des siècles, ce qui est considérable à l'échelle humaine. Pouvoir maintenir cet effort implique que tous les contributeurs puissent aussi juger de l'utilité de leur investissement (qu'il soit financier ou sur le terrain). Les résultats sont-ils à la hauteur des efforts ? Sont-ils à la hauteur des attentes ? Il était particulièrement important de soulever de telles questions à l'occasion de ce 25e anniversaire, à l'approche de l'horizon de 30 ans initialement envisagé pour l'activité du réseau.

Ce second colloque a donc été conçu pour répondre à trois objectifs :

1. restituer les principaux résultats obtenus pendant les dix années de 2007 à 2017 ;
2. partager la discussion de ce bilan et des perspectives de l'observation des forêts avec toutes les parties prenantes, partenaires et autres dispositifs d'observation existants ;
3. témoigner la reconnaissance de tout le travail déjà accompli et saluer l'aventure humaine que représente aussi un dispositif comme RENECOFOR.

Nous avons voulu que les actes écrits retracent aussi simplement que possible le contenu de l'ensemble des présentations orales et des discussions qui ont suivi : le sommaire reprend l'ordre des huit sessions thématiques, toutes menées en séance plénière. Mais ils ne peuvent pas rendre compte des espaces et temps d'exposition qui ont aussi pu stimuler les discussions informelles tout au long du colloque, et dont on peut simplement rappeler ici les principaux éléments :

- onze portraits de personnes ayant contribué de diverses manières à RENECOFOR ;
- l'exposition pédagogique « les plantes au rythme des saisons », développée à partir du guide éponyme pour l'observation phénologique ;
- les posters présentés par certains participants, en lien avec les thématiques du colloque ;
- la projection du film court « à l'écoute de la forêt » illustrant le suivi des placettes d'observation des écosystèmes forestiers sur le réseau suisse LWF, homologue de RENECOFOR.

Vous pouvez en avoir un aperçu, et revivre aussi les présentations orales en vidéo, sur notre site : www.onf.fr/renecofor

Bonne lecture !

Manuel NICOLAS
Responsable du réseau RENECOFOR

SESSION 1 : OUVERTURE DU COLLOQUE

© Luc Croisé, ONF

INTRODUCTION - REGARDS ET ATTENTES DES BAILLEURS DE FONDS DU RÉSEAU RENECOFOR

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS (ONF)

Albert Maillet
Directeur Forêts et Risques Naturels

Je suis très heureux d'ouvrir ce colloque anniversaire des 25 ans du réseau RENECOFOR au nom de l'Office national des forêts et au nom de son directeur général qui regrette de ne pas pouvoir y participer. Je voudrais d'abord vous dire toute la satisfaction que j'ai d'être parmi vous aujourd'hui, et qui repose sur trois constats.

Le premier constat, à voir cette salle du Palais des Congrès de Beaune bondée en dépit de sa forte capacité, c'est que l'événement est déjà un succès puisque nous sommes plus de 330 inscrits à tout ou partie de ce colloque. Et nous sommes un public très diversifié, composé de gestionnaires forestiers (ceux de l'ONF, notamment, qui ont en charge le réseau), mais également d'institutionnels, chercheurs, étudiants, représentants de structures d'enseignement, représentants d'organisations non gouvernementales, acteurs publics ou privés intéressés par le sujet, et aussi de journalistes.

Deuxième constat : on fête aujourd'hui un anniversaire particulier. Un quart de siècle, c'est un âge tout à fait respectable, surtout pour un réseau comme RENECOFOR, qui n'est pas une de ces organisations ou institutions accoutumées à célébrer des durées aussi longues. On a affaire ici à quelque chose de plus informel, un réseau multipartenaire, pluridisciplinaire, et cette longévité est d'autant plus remarquable qu'elle a été rendue possible par la participation financière d'un certain nombre de bailleurs de fonds représentés à cette tribune. Pour qui connaît le fonctionnement des budgets et des financements publics, c'est un exploit inédit d'obtenir sur une telle durée l'implication régulière de financeurs publics. Le fait que, sans base juridique de type législatif ou réglementaire, le collectif des financeurs publics soit parvenu à assurer le financement pendant 25 ans, est à ma connaissance un cas exceptionnel. Je profite donc de l'occasion pour remercier très chaleureusement ces financeurs : le ministère en charge de l'Agriculture, le ministère en charge de l'Environnement, l'Ademe, l'ONF bien sûr, et l'Union Européenne qui a participé au dispositif jusqu'en 2006.

Le troisième constat, c'est la pertinence du *timing* de cet événement. Le réseau était prévu au départ pour durer 30 ans, et ce 25e anniversaire est bien choisi, à la fois parce qu'on a un passé assez long pour pouvoir faire un retour d'expérience et un bilan circonstanciés et parce qu'on n'est pas trop près de l'échéance prévue. Il nous reste 5 ans pour en tirer tous les enseignements et pour envisager la suite de l'opération, si tant est qu'on le souhaite. En ce qui concerne l'ONF, je confirme que nous souhaitons vraiment que cette opération puisse se poursuivre au-delà de l'échéance des 30 ans.

Voilà pour les motifs de satisfaction. Nous allons découvrir en détail ce qu'est RENECOFOR (que beaucoup ici connaissent déjà parfaitement), je me contenterai donc de rappeler quelques chiffres clés pour planter le décor. Le réseau RENECOFOR a été mis en place en 1992 comme réponse de la France à des engagements internationaux sur les pluies acides, au titre de la convention de Genève sur les pollutions atmosphériques, donc dans un dispositif des Nations Unies. Il s'est ensuite enrichi progressivement par rapport à des demandes et exigences de l'Union européenne, de règlements européens. RENECOFOR a été installé dès le

départ en forêt publique, notamment en forêt domaniale, pour assurer la stabilité foncière de long terme, et c'est donc l'ONF qui a été chargé d'en assurer la gestion « quotidienne ». Il se compose de 102 sites, répartis de manière représentative sur les différents milieux forestiers français, où on observe trois grands types de sujets : sujets liés à l'atmosphère, aux sols et à la biodiversité végétale. En 25 années d'existence, il a permis de construire une base de données considérable : 80 millions d'enregistrements correspondant à plusieurs centaines d'items. Cela constitue un véritable patrimoine intellectuel à partir duquel on peut bâtir des indicateurs pour éclairer les politiques publiques (les indicateurs de gestion durable, par exemple), et où les chercheurs peuvent trouver une matière brute pour lancer des études et analyses. Ce patrimoine a aujourd'hui donné lieu à plus de 150 articles et une quinzaine de thèses.

Je tiens aussi à mettre l'accent sur le fait que ce réseau fait partie d'un ensemble, d'un continuum de dispositifs complémentaires : le réseau systématique européen de maille 16 x16 km sur la santé des forêts et les sites ateliers (une quinzaine) mis en place par les institutions de recherche travaillent sur des sujets qui peuvent dialoguer avec RENECOFOR.

L'intérêt de RENECOFOR, on l'a bien compris, c'est son caractère de très long terme, qui permet d'observer deux choses très importantes en matière de gestion forestière. La première, c'est l'effet cumulatif sur le long terme de phénomènes qui sont parfois lents à observer et à évaluer. La deuxième, ce sont les événements exceptionnels, à occurrence faible, mais qui pour les forêts (c'est-à-dire pour des milieux qui ont un cycle long) sont d'une grande importance. Ce réseau a déjà donné lieu à des résultats très intéressants que je ne vais pas évoquer ici puisque les exposés du programme vont en témoigner. Je dirai simplement qu'il est très important pour les gestionnaires forestiers, bien sûr, mais aussi pour la société toute entière. Car la forêt couvre 30 % de notre territoire national : c'est donc un élément très structurant du territoire et des paysages. Ce qui se passe en forêt concerne tout le monde parce que la forêt rend de nombreux services, directement ou indirectement, et que tout désordre en matière forestière se traduit assez vite par des difficultés plus générales pour la société toute entière.

Je termine en remerciant toutes les personnes qui ont participé à l'organisation et à la réussite de ce colloque, ainsi que toutes celles qui ont permis au réseau RENECOFOR d'avoir le succès qu'on lui connaît aujourd'hui. Le bilan de ces 25 ans est, je n'en doute pas, très élogieux et positif. Mais au-delà de son contenu technique, RENECOFOR est aussi une très belle aventure humaine : il y a dans la salle des personnes qui ont œuvré activement à la naissance du réseau et qui sont toujours fidèles au poste. Je souhaite longue vie à RENECOFOR, non seulement pour atteindre les 30 ans qui lui étaient assignés au départ, mais pour trouver un prolongement bien au-delà puisque, en matière forestière, on raisonne sur le très long terme.

Document témoignages « RENECOFOR : un observatoire scientifique, une aventure humaine », à télécharger sur onf.fr

RENECOFOR : une aventure humaine

Depuis plus de 25 ans, le réseau RENECOFOR suit l'évolution des écosystèmes forestiers en réponse aux changements environnementaux. Si le terme « réseau » renvoie à la trame cohérente de ses 102 sites d'observation permanents, il évoque aussi l'ensemble des hommes et des femmes qui concourent à sa réussite globale et à qui l'on doit la continuité et la qualité des informations recueillies.

Car, du terrain jusqu'à la publication de résultats, l'observation des écosystèmes forestiers mobilise toute une chaîne de compétences :

- des centaines de forestiers de l'ONF qui mènent nombre d'observations et de prélèvements, au même moment, sur l'ensemble des sites répartis en France ;
- mais aussi de nombreux partenaires associés pour les inventaires d'espèces et autres relevés d'expert, les analyses d'échantillons, la conception et la maintenance de matériels spécialisés, l'interprétation et la valorisation scientifique des données…
- sans oublier les personnes en charge de la coordination : animation scientifique et technique, administration des moyens, organisation logistique, gestion de la base de données, amélioration continue des protocoles…

Qui plus est, comme l'observation des écosystèmes forestiers ne prend son sens que sur le long terme, elle implique une grande constance dans la répétition fastidieuse des mesures, et donc beaucoup de patience avant que les efforts consentis ne portent leurs fruits. Elle oblige aussi parfois à se remettre en question, quand la qualité de certaines mesures se révèle insuffisante. Dans ces conditions, RENECOFOR n'aurait pu exister jusque-là sans la motivation de tous ses acteurs. C'est pourquoi il fallait aussi rendre compte de l'aventure humaine qui sous-tend l'expérience scientifique.

Des portraits et témoignages ont été recueillis et édités en amont du colloque. Onze personnes, impliquées de diverses manières, y partagent leur vécu, leurs impressions, leurs émotions. À travers ces témoignages, c'est aussi à toutes celles et ceux qui apportent ou ont apporté leur contribution que nous avons souhaité rendre hommage.

Pendant le colloque, une remise de prix officieux a aussi été organisée pour illustrer le travail remarquable qui a été accompli. Par exemple, 25 années de suivi continu des dépôts atmosphériques, ce sont près de 1 300 relevés qui ont été répétés, semaine après semaine, sur chacun des 27 sites du sous-réseau CATAENAT. Or, moins de 0,5 % de ces relevés ont été manqués par les agents en charge de ces sites, certains d'entre eux étant restés les mêmes depuis le début ! C'est la somme de tels investissements personnels qui fait la valeur de ce réseau. Puisse le travail d'observation se poursuivre avec la même énergie collective.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION (MAA)

Elisabeth Van de Maele
Cheffe du Bureau de la gestion durable de la forêt et du bois

Je suis très heureuse de représenter ici le ministère de l'Agriculture en charge des forêts, de m'inscrire dans le long terme de l'aventure RENECOFOR, et de saluer dans la salle ceux qui ont porté ce projet sur les fonts baptismaux. Quand j'ai pris la responsabilité du Bureau de la gestion durable de la forêt et du bois, il y a deux ans, j'avais déjà entendu parler du réseau RENECOFOR. Pour le ministère, le financement de réseaux d'observation à long terme est une problématique particulière ; en matière forestière, c'est un enjeu important. La question s'était donc déjà posée à l'occasion des discussions annuelles sur le financement des divers projets : RENECOFOR, ça fait combien de temps ? Eh bien oui, le ministère finance depuis 1992 car l'enjeu est bien le suivi à long terme, mais ça ne va pas de soi. Il y a un adage qui dit « pour vivre heureux, vivons cachés »… Mais pour avoir un financement des ministères, au contraire, il faut savoir faire parler de soi.

Ainsi vous savez que le réseau RENECOFOR est une source de données indispensable pour le rapport des indicateurs de gestion durable, tous les 5 ans. C'est intéressant parce que ça s'inscrit dans une perspective de long terme. Mais il faut aussi saisir les occasions plus ponctuelles. Fin 2016, par exemple, le ministre Stéphane Le Foll, qui avait lancé une grande réflexion sur les sols agricoles (l'initiative 4 pour 1000), s'est interrogé dans la foulée sur les sols forestiers. Il a demandé en urgence une note synthétique sur ce qui pourrait se passer pour les sols forestiers, leur état, etc. Après un rapide tour d'horizon, nous nous sommes adressés à l'ONF et son réseau RENECOFOR : c'est le seul qui ait pu nous fournir cette note synthétique sur l'état des sols. Autre exemple, tout récent : nous avons demandé à l'INRA une grosse étude sur les leviers de la filière forêt-bois en matière d'atténuation du changement climatique, et le constat de l'INRA c'est que le seul réseau qui puisse fournir des données de suivi temporel sur le carbone dans les sols, c'est RENECOFOR.

Le réseau RENECOFOR a donc beaucoup d'atouts, mais il faut rester vigilant : il faut être capable, chaque année, de mettre en avant les grandes questions auxquelles ce réseau peut apporter des réponses. Parce qu'en matière de financement, il ne suffit pas d'avoir conscience que le long terme est un élément fondamental de l'observation environnementale. Il faut sans cesse revenir vers les bailleurs de fonds pour expliquer l'originalité et l'enjeu du réseau en termes de contribution aux politiques publiques. C'est pourquoi je veux dire en ouverture de ce colloque que nous avons de grandes attentes.

Des attentes en particulier sur la place du réseau RENECOFOR au regard des politiques publiques. Quelle aide peut-il nous apporter pour répondre aux grands enjeux des politiques publiques ? Et comment s'articule-t-il avec les autres réseaux existants ? C'est un point sur lequel il faut être vigilant, pour la bonne utilisation de l'argent public : il faut absolument éviter les redondances, le ministère y est de plus en plus sensible. Pour défendre le réseau RENECOFOR, il faut pouvoir démontrer qu'il s'inscrit bien dans une articulation avec les autres réseaux existants pour apporter les meilleures réponses possibles. Le programme consacre d'ailleurs une session à ce thème.

Autre attente importante : la valorisation des données. C'était un point faible identifié par l'audit conduit en 2013. Le réseau RENECOFOR répond déjà au niveau national à des questions posées par les politiques, mais il ne vit vraiment que par l'implication des établissements de recherche qui valorisent ses données ; c'est là un maillon incontournable et indispensable. Mieux elles seront valorisées, plus il nous sera facile d'expliquer la valeur du réseau.

Dernière question pour le ministère, bailleur de fonds : *in fine*, quelles sont les retombées pour les gestionnaires forestiers ? C'est une question un peu difficile, peut-être, mais au final c'est ce qui nous préoccupe au niveau national, les politiques publiques ; au niveau recherche, la valorisation ; à un niveau plus terre-à-terre, les retombées pour la gestion des forêts. Jusqu'à présent le réseau RENECOFOR a parfaitement répondu à ces trois niveaux d'enjeu, et j'attends donc de ce colloque qu'il apporte peut-être de nouveaux questionnements et que, face à ces questionnements, le réseau RENECOFOR ait toute sa place.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (MTES)

Catherine Cumunel
Cheffe du Bureau de l'encadrement des impacts sur la biodiversité

C'est avec un grand intérêt que je représente le ministère de la Transition écologique et solidaire à ce colloque des 25 ans du réseau RENECOFOR. Comme le thème de cet anniversaire, mon propos se place sous l'angle du bilan et des perspectives.

Il y a 25 ans, l'ONF créait le réseau RENECOFOR dont l'objectif était de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts françaises et de répondre ainsi aux engagements internationaux de la France. Engagements souscrits à la suite de pluies acides, dans le cadre de la convention de Genève sur les pollutions transfrontalières et plus particulièrement d'une résolution qui prévoyait l'installation d'un réseau de placettes (ou sites d'observation) coordonné en Europe, pour suivre ce phénomène de maladie des forêts. L'objectif principal de ce réseau est donc de détecter les éventuels changements à long terme dans le fonctionnement d'une grande variété d'écosystèmes forestiers, pour mieux comprendre les raisons des changements.

L'incertain de l'avenir, on le sait, accentue les problèmes. Dans l'incertitude, c'est difficile de prévoir, alors même que les désordres climatiques affectent notre planète. Or, pour citer le Dalaï-Lama, « la bataille contre l'ignorance se gagne tous les jours et elle finit par ouvrir sur des perspectives insoupçonnées ». L'analyse des écosystèmes en continu, à laquelle procède RENECOFOR, permet de comprendre comment, et par quels phénomènes, ils évoluent. Le monitoring fournit des retours essentiels sur les impacts et les effets des activités humaines, de manière à pouvoir adapter nos pratiques et surtout tirer parti des écosystèmes. Et cette mission cruciale de monitoring a fait de RENECOFOR un réseau visionnaire dans la mesure où il a anticipé les besoins d'aujourd'hui.

25 ans c'est déjà une belle avancée ; mais quand on s'inscrit dans la durée, c'est encore jeune. Célébrer cet anniversaire, me semble-t-il, c'est essentiel dans la communication du réseau, à la fois en interne parce que c'est l'occasion de partager les expériences et conseils, et à

l'externe, en présentant ses activités et ses projets, parce que ça donne une base solide pour être force de propositions. Je remercie le réseau RENECOFOR de s'être donné l'occasion de cette présentation et je lui souhaite le succès qu'elle mérite.

Alors, quel regard porter sur ce réseau ? On peut dire que RENECOFOR est un des acteurs des 800 sites d'observation permanents (appelés placettes) installés dans près de 40 pays, et que c'est en France le réseau de surveillance des forêts qui relève le plus grand nombre de variables. Concrètement, il porte sur 102 sites en France pour représenter les principaux types de forêt de production qui sont gérés par l'ONF. C'est aussi un patrimoine remarquable parce qu'il s'enrichit année après année ; il est d'ailleurs source d'une bibliographie très riche de références. Il a ouvert des perspectives puisque ses travaux évoluent avec les grandes questions sur la composition chimique des sols, le changement climatique ou encore l'érosion de la biodiversité. Enfin il d'une grande rigueur dans le suivi puisqu'il recueille des données selon des protocoles standardisés, ce qui permet de dessiner des tendances sur le long terme et de mieux comprendre pour mieux anticiper les effets dus à ces évolutions.

Le réseau RENECOFOR doit aussi sa réussite au soutien de l'ONF. Tout d'abord parce que les travaux sont pilotés par l'ONF, et parce que son activité correspond à un des axes de R&D de l'ONF qui consiste à « suivre, imaginer et projeter les évolutions de l'environnement ». Enfin ses observations reposent sur une organisation fonctionnelle qui associe aux agents de l'ONF d'autres partenaires tels que des laboratoires, des universités, l'INRA, Irstea et d'autres ; c'est en ce sens une démarche collective qui a été mise en place et qui permet de renforcer les travaux voire de les valider. Bien que depuis 2007 cette surveillance ne relève plus d'une obligation communautaire, la France est restée très attachée à ce type de suivi et continue à le financer, témoignant ainsi de l'intérêt de ne pas réduire la diversité des observations. Bien sûr, le ministère de la Transition écologique souhaite le faire durer le plus longtemps possible. Cette implication réaffirme les enjeux des travaux du réseau RENECOFOR comme une approche d'observation objective, un précieux outil au service de la décision politique. Le ministère de la Transition écologique et solidaire soutient le réseau RENECOFOR de deux façons principales : tout d'abord dans le cadre du Contrat d'objectif quinquennal passé avec l'ONF, notamment pour la période 2016-2020, puis par le maintien de son financement aux côtés des autres bailleurs de fonds. Pour notre ministère, l'objectif est ambitieux : c'est celui de garder la forêt au service du citoyen, pour un avenir commun. Le réseau RENECOFOR, par la capitalisation des connaissances, ne peut qu'aider la France à consolider sa position dans cet objectif.

En conclusion : un bilan de grande qualité ; 25 ans ont permis de donner vie à RENECOFOR, qui commence à être connu. Les méthodes utilisées sont mises en œuvre avec une rigueur qui est saluée par les partenaires, ce qui a permis d'enregistrer des progrès importants dans la connaissance des écosystèmes. Au nom du ministère de la Transition écologique et solidaire, je tiens à vous féliciter et, à travers vous, l'ONF qui vous a évalué et qui continue de vous évaluer durant la période conventionnelle. Enfin je souhaite un excellent colloque à tout le monde : je remercie les intervenants, participants sans oublier les partenaires du réseau RENECOFOR, ni même l'ONF, pour leur engagement qui contribue à éclairer les décideurs politiques, donc à éclairer nos priorités.

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE (ADEME)

Laurence Galsomiès
Docteure en environnement dans le Service d'évaluation de la qualité de l'air

Nous fêtons aujourd'hui les 25 ans de RENECOFOR, mais je veux dire d'abord que l'Ademe est un partenaire de l'ONF de longue date. Notre soutien s'inscrit en effet dans des activités diverses portées par l'ONF. L'Ademe accompagne l'ONF via le Fonds chaleur au travers d'un appel à manifestation d'intérêt (AMI) DYNAMIC Bois. Le Fonds chaleur de l'Ademe permet d'abonder les investissements nécessaires en France à la mobilisation additionnelle du bois dans la filière bois, et l'AMI DYNAMIC Bois permet le développement de projets collaboratifs des acteurs de la filière bois : l'ONF fait partie des bénéficiaires de plusieurs des 43 projets sélectionnés au terme des deux éditions de cet AMI. Notamment pour les projets concernant des forêts de collectivités dont l'ONF est gestionnaire. L'Ademe accompagne aussi l'ONF dans des projets de recherche, en particulier liés à l'appel à projets REACCTIF qui permet d'améliorer les connaissances sur l'impact de prélèvements accrus du bois sur la qualité des écosystèmes forestiers, dont la qualité de leurs sols.

Et surtout, l'Ademe accompagne le fonctionnement de RENECOFOR depuis les premières heures, puisque l'Ademe était parmi les organismes fondateurs qui ont œuvré à faire éclore ce réseau en 1992. Dans les années 1980, l'Agence (qui à l'époque était l'AQA, l'Agence de la qualité de l'air) a été interpellée comme d'autres sur les conséquences pour les écosystèmes forestiers du phénomène d'acidification qui avait été constaté, dans l'Est de la France surtout, et pour les résineux notamment. Ça nous a conduits à soutenir un programme français de recherche, le programme Deforpa*, élaboré en 1984 pour étudier les causes du dépérissement des forêts, et dont les conclusions avaient recommandé la création d'un réseau de suivi intensif des écosystèmes forestiers français. Tout naturellement, nous nous sommes impliqués dans ce nouveau dispositif forestier qui a pris le nom de RENECOFOR et qui a donc planifié, à l'horizon 2022, un programme d'observations avec au moins 30 ans de suivi en milieu forestier. Concrètement, l'Ademe contribue au fonctionnement du réseau pour une partie de ses activités : celles en lien avec le suivi des dépôts atmosphériques en milieu forestier, lequel fait l'objet d'une surveillance intensive dans les placettes de niveau 3 du réseau RENECOFOR (le sous-réseau CATAENAT).

Notre soutien a représenté en moyenne par an 6 à 8 % du budget total de RENECOFOR. Cela donne le chiffre d'un million d'euros depuis le précédent événement, qui a eu lieu ici même en 2007 pour le bilan à mi-parcours (les 15 ans du réseau). J'avais déjà eu le plaisir d'ouvrir le colloque à l'époque, et j'avais cité trois éléments qui, du point de vue de l'Ademe, rendent ce réseau RENECOFOR si particulier et intéressant. D'abord c'est un réseau suffisamment important en nombre de placettes forestières pour permettre d'améliorer les connaissances sur les dépôts atmosphériques en France, en pollution de fond, et permettre ainsi une meilleure compréhension de leurs effets sur les écosystèmes. Ensuite, c'est une plateforme de collaboration inter-dispositifs, accessible à la recherche et aux équipes scientifiques ; un réseau français mais rattaché à un réseau de placettes d'observation forestière au niveau européen, dans le cadre du Programme international concerté sur les effets de la pollution de l'air sur les forêts (PIC Forêts) de la convention de Genève

sur les effets de la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance au sein des Nations Unies. C'est enfin un réseau qui démontre sa capacité pluridisciplinaire à étudier les écosystèmes forestiers français au travers de mesures, d'observations dans différents domaines comme l'air, le sol, l'écologie ou la phénologie. Ces trois aspects, pour ne citer que ceux-là, sont vraiment une grande force du réseau RENECOFOR, et pour ces raisons l'Ademe avait réaffirmé son soutien en 2007.

Aujourd'hui, l'occasion m'est donnée de rappeler qu'entre temps les missions de l'Ademe ont évolué avec la loi du 12 juillet 2010 (dite loi Grenelle 2) fixant un nouveau cadre aux missions prioritaires pour l'Ademe dans le domaine de la qualité de l'air. L'Ademe se positionne désormais sur des mesures et des plans d'action visant à préserver et améliorer la qualité de l'air en appui aux politiques publiques dans ce domaine. Et par là-même elle doit délaisser sa mission dédiée à la surveillance de la qualité de l'air et donc aux observatoires dans ce domaine. Je rappelle d'ailleurs qu'un désengagement progressif de l'Ademe avait été annoncé dès 2012 pour ses activités de surveillance de la qualité de l'air et pour son soutien aux travaux français dédiés à la convention de Genève. Le réseau RENECOFOR est concerné dans ce cadre pour les placettes CATAENAT, mais il n'est pas le seul : d'autres dispositifs, d'autres équipes de coordination le sont également. L'Ademe avait néanmoins souhaité conserver jusqu'en 2017 son implication à l'identique dans le cadre du sous-réseau CATAENAT ; en fait le budget de fonctionnement du réseau ne devrait pas être impacté en 2018, puisque nos aides couvrent encore cette période complète jusque fin 2018. Mais au-delà, à partir de 2019, l'Ademe souhaite bien évidemment qu'il soit possible au réseau RENECOFOR d'obtenir ce complément d'aide auprès de nouveaux bailleurs ou des bailleurs actuels représentés ici, en tout cas pour les missions qui sont reconnues d'intérêt général.

L'Ademe restera cependant à l'avenir un partenaire très engagé dans des actions en faveur de l'amélioration de la qualité de l'air ; toutes nos actions sont dirigées vers cela au travers des programmes que nous soutenons dans le domaine de l'air. Je cite rapidement :

- CORTEA, qui est dédié à la COnnaissance, à la Réduction à la source et au Traitement des Émissions dans l'Air ;
- PRIMEQUAL, copiloté avec le ministère de la Transition écologique et solidaire, qui est un programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air ;
- AACT-AIR qui est un programme d'aide à l'action des collectivités territoriales en faveur de l'air.

Je cite aussi nos fonds dédiés au domaine de l'air dans les territoires : le fonds Air qui cible le secteur résidentiel, et notre appel à projets AgrAir qui cible le monde agricole. Tous ces programmes ou ces fonds d'aide au travers des actions qui vont être ou sont déjà mises en œuvre vont contribuer à diminuer les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes.

Enfin je souhaite que le réseau RENECOFOR, à l'avenir, continue pleinement ses activités, en tout cas dans tout le programme qui avait été initié à l'origine de sa création. Je souhaite être invitée au prochain colloque (pour les 35 ans ?) mais bien sûr en ayant d'autres raisons d'y participer. Et pour l'immédiat je nous souhaite à toutes et tous des échanges intenses et passionnants.

Hommage à ceux qui nous ont quittés

Nous ne pouvions pas nous pencher sur le bilan de 25 ans d'activités du réseau RENECOFOR sans rendre hommage à ceux qui y ont contribué et qui nous ont quittés en cours de route. Trois d'entre eux notamment, personnages fondateurs présents lors du bilan des 15 premières années, ont manqué cette fois-ci à la tribune :

Jean-François Dobremez
(Professeur à l'Université de Savoie)

Photo : Laurence Bourjot

Maurice Bonneau
(Directeur de recherches à l'INRA)

Photo : Luc Croisé

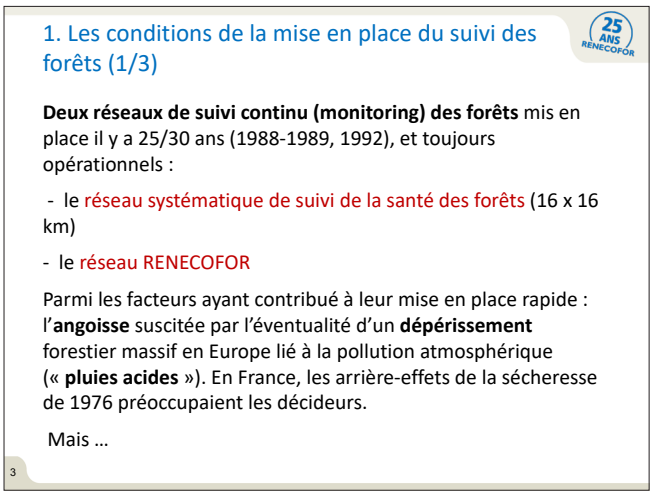
Georges Touzet
(Directeur général de l'ONF)

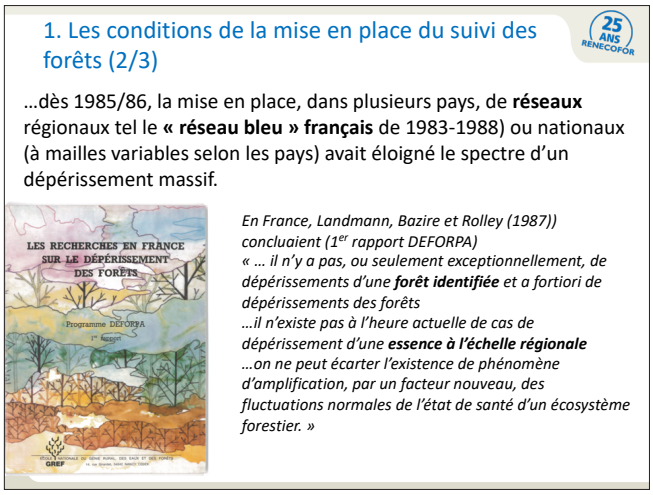
Photo : Marc Lanier

- **Jean-François Dobremez**, professeur à l'Université de Savoie et qui était partie prenante du groupe d'experts botanistes associé au réseau ;
- **Maurice Bonneau**, qui était directeur de recherches à l'INRA, responsable du projet DEFORPA* (dépérissement des forêts lié aux pollutions atmosphériques), et qui a été en quelque sorte le précurseur technique du réseau ;
- **Georges Touzet** qui avait rappelé les motivations initiales de l'ONF à porter cette initiative de suivi des écosystèmes forestiers depuis le départ, au moment où lui-même était directeur général de l'ONF.

MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE DU MONITORING FORESTIER ET DU RÉSEAU RENECOFOR

Christian Barthod
MTES, Conseil général de l'environnement et du développement durable
Guy Landmann
GIP ECOFOR, président du Comité de pilotage scientifique de RENECOFOR





Cette mise en perspective historique est proposée par deux « dinosaures » ayant participé à l'agitation intellectuelle qui a présidé à la naissance de RENECOFOR : Guy Landmann à la direction du programme Deforpa* (après M. Bonneau) puis au Département de la Santé des Forêts, et moi-même, Christian Barthod, au DSF et à la préparation des Conférences ministérielles sur la protection des forêts en Europe.

Je vais assumer les deux premières parties de l'exposé, l'historique, et Guy Landmann se chargera des deux points suivants, un peu plus réflexifs, critiques et orientés vers l'avenir.

Les conditions de la mise en place du suivi continu des forêts

Remontons le temps jusqu'au contexte très particulier du début des années 1980. À travers toute l'Europe montait une inquiétude sur l'intensité des dépérissements attribués à la pollution atmosphérique, qui a abouti à la mise en place de réseaux de suivi continu (monitoring) des forêts.

Cela s'est fait d'abord au niveau national, chacun des pays testant, adaptant la problématique de son suivi à ses propres questionnements pour l'étendre progressivement à l'ensemble de son territoire, avant que l'Union européenne ne décide, via des règlements communautaires, une homogénéisation de ces mécanismes de suivi. Ceci a conduit à mettre en place, d'une part, un réseau systématique de 16 km sur 16 km et d'autre part, dans la philosophie de ce qui avait été discuté dans le cadre du programme PIC Forêts (de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontalière), des réseaux de niveaux 2 et 3 nettement plus intensifs, appareillés lourdement. À l'époque, on se concentrait sur le dépérissement attribué à la pollution atmosphérique, le fameux débat sur les pluies acides, mais il ne faut pas oublier que bien des questions débattues dans ces années-là avaient également leur origine dans la grande sécheresse de 1976 et ses conséquences.

Durant tout le programme de recherche Deforpa*, il y a donc eu des interférences qui invitaient à remonter à des questions sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

Quand on arrive à la fin des années 1980, beaucoup de choses ont été relativisées : la disparition intégrale des forêts n'est déjà plus d'actualité, mais on reste alors avec une somme énorme de questions sur le fonctionnement et les dysfonctionnements des écosystèmes forestiers et aussi sur les informations qu'on aurait aimé avoir pour gérer la situation. Dans le débat public, le monde forestier a eu l'impression d'être mis en accusation, de ne pas avoir nécessairement tous les outils, les savoirs, toutes les connaissances pour y répondre.

1. Les conditions de la mise en place du suivi des forêts (3/3)

La mise en place de ces deux réseaux "européens" doit beaucoup à :

(i) la dynamique créée par la **première Conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe** (MCPFE) (Strasbourg, 1990).

(ii) un accord gagnant-gagnant conclu entre le **programme (ONU) de suivi des forêts européennes « PIC Forêts[1] »,** piloté par l'Allemagne, et la **Commission européenne**.

[1] *PIC Forêts : Programme international concerté sur l'évaluation et le suivi des effets de la pollution sur les forêts, crée en 1985 sous la Convention de la Commission économique pour l'Europe dans Nations Unies (CEE-NU)(dite de Genève) sur la pollution transfrontière à longue-distance (1979)*

5

2. Les conditions d'émergence du réseau RENECOFOR

Maurice BONNEAU, responsable du programme DEFORPA, a travaillé à l'émergence du réseau de suivi intensif français (RENECOFOR) en même temps qu'il s'investissait dans des groupes de travail de la Commission européenne, où se confrontaient des approches nationales parfois assez divergentes pour décliner les engagements politiques pris.

En France, la gestion de ce dispositif est confiée à l'**ONF**, **opérateur public de gestion forestière,** une option singulière en Europe, qui constitue certainement un élément de son succès

6

Ministerial Conference for the Protection of Forests in Europe
18 December 1990, Strasbourg/France

RESOLUTION S1
European Network of Permanent Sample Plots for Monitoring of Forest Ecosystems

Les engagements de la MCPFE de Strasbourg sont accessibles sur le site de Forest Europe
https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2016/11/Commitments_all.pdf

C'est dans ce contexte qu'on s'est retrouvé à devoir articuler deux grandes réponses aux questions politiques :

- d'une part les Conférences ministérielles sur la protection des forêts en Europe (MCPFE), impulsées par les ministres français et finlandais chargés des forêts ; côté français, la préparation en avait été confiée à Georges Touzet (alors directeur général de l'ONF), qui m'avait demandé de l'assister ;
- et d'autre part toute la dynamique qui était en train de se mettre en place sous le leadership allemand dans le cadre du programme PIC Forêts.

Ce qu'il faut retenir, c'est que l'ensemble de ces questions aboutissait à faire émerger une approche qui n'était plus exclusivement enracinée dans les disciplines forestières traditionnelles, mais qui interpellait le milieu de la recherche en écologie forestière.

Pour la première Conférence ministérielle, à Strasbourg, il a fallu élaborer une sorte de doctrine : il y avait la volonté politique de faire quelque chose, mais que proposer aux ministres ? Nous avons réussi à faire acter qu'on s'intéresserait à des projets concrets, qu'on se fonderait sur des questions déjà largement partagées au niveau du continent européen, qu'on privilégierait les réponses qui semblaient procéder d'une orientation commune, et qu'on n'irait pas jusqu'à des solutions de normalisation lourde. On se focaliserait sur un tronc commun tout en laissant chacun des pays l'adapter, aller plus loin, et trouver comment s'adresser à ses propres spécificités, à sa propre opinion publique, et valoriser les propositions des chercheurs.

Les conditions de l'émergence du réseau RENECOFOR

Rendons ici hommage à Maurice Bonneau, car c'est lui qui a permis à Georges Touzet et son équipe d'avancer concrètement sur la résolution S1 (les objectifs principaux des réseaux de suivi des forêts) puisqu'il avait été aux manettes du programme Deforpa*. Et aussi parce qu'il avait eu l'occasion, mieux que quiconque, de réfléchir à ce qu'il aurait fallu savoir pour gérer de façon plus fluide, moins conflictuelle, plus rationnelle, l'ensemble des questions qui étaient adressées au monde forestier. Il avait un cran d'avance en matière de réflexion, et le niveau politique lui a fourni une opportunité pour passer à l'acte : il était en mesure de faire des propositions.

Restait la question de l'organisme support. En France, c'est l'Office national des forêts qui a été choisi pour le réseau de suivi intensif : une solution dont on est très content *a posteriori*, mais que la très grande majorité des pays européens n'a pas retenue. L'ONF a dû s'engager dans une direction très nouvelle pour lui et il a remarquablement bien réagi.

Je termine cet historique en rappelant les 4 objectifs fixés par la résolution S1 de la première MCPFE, à Strasbourg en 1990 :

1. recueillir des informations approfondies sur l'évolution des écosystèmes forestiers, en prenant en compte à la fois l'historique, les variations de vitalité des forêts, les conditions stationnelles et les événements climatiques ;
2. chercher à établir des corrélations entre la variation des facteurs d'environnement et la réaction des écosystèmes forestiers ;
3. déterminer les niveaux de charge critique en polluants par type d'écosystème forestier ;
4. permettre de comprendre le fonctionnement des écosystèmes et interpréter les résultats, notamment ceux du réseau européen élémentaire 16 km x 16 km.

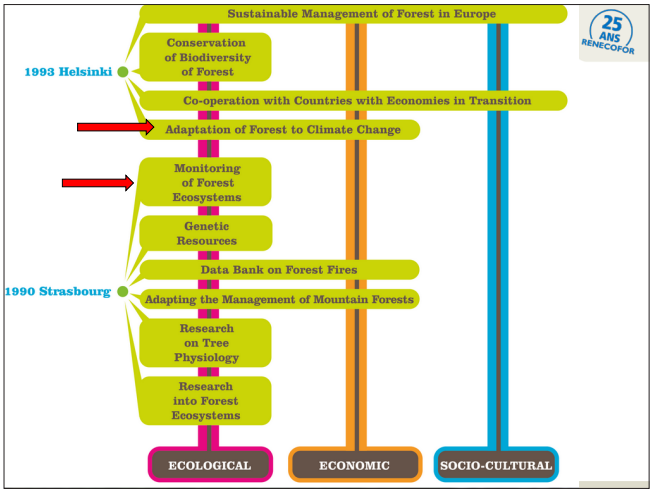
On verra que certaines questions sont totalement d'actualité et que d'autres nécessitent d'être reformulées.

3. Ce qui a changé en 25 ans (1/5))

Enormément de choses !

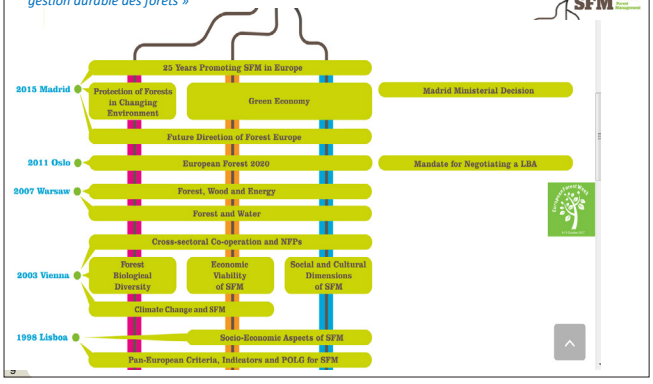
De **nouvelles préoccupations environnementales** : changement climatique, carbone, biodiversité, services écosystémiques,... attirent attention & financements. L'attention portée à l'impact de la pollution atmosphérique diffuse sur les écosystèmes a fortement baisse.

« Forest Europe » (MCPFE) (7ème à Madrid, 2015) porte des préoccupations moins concrètes que les 1ères conférences européennes (système d'indicateurs de gestion, (Cf. the State of Europe's Forest, instance mondiale de gouvernance de la forêt)



3. Ce qui a changé (3/5)

MAAF (2015) *« 25 ans après Strasbourg, FOREST EUROPE a atteint son objectif de devenir une plate-forme de dialogue politique de haut niveau sur les défis et enjeux forestiers et de promouvoir les concepts et outils de la gestion durable des forêts »*



3. Ce qui a changé en 25 ans (4/5)

Commission européenne : **20 ans de soutien** au suivi de Niveaux 1 et 2. *"Règl. (EEC) No. 3528/86 sur la protection des forêts de la Communauté contre la pollution atmosphérique"*: 1986-2002, *Règl. Forest Focus*: 2003-2006 (*Life+ Futmon 2007-2011*). Porte à présent des questions plus stratégiques et plus sensibles : dispositifs FLEGT et REDD,...

FLEGT (EU) *Forest Law Enforcement, Governance and Trade*
REDD (EU) *Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation*

Centre Commun de Recherche (CCR) de la Cion n'a pas endossé pleinement, en matière de suivi continu des forêts, le rôle central qui lui semblait promis.

PIC Forêts : **toujours très actif après 33 ans d'activités**. La grande majorité des pays européens continue à mettre en œuvre les approches de niveau 1 et 2 et à les financer. Capacité à porter *seul* des inflexions de fond ?

Ce qui a changé en 25 ans

En 25 ans les choses ont beaucoup changé. De nouvelles préoccupations environnementales sont maintenant au premier plan : le changement climatique mais aussi le carbone, la biodiversité, les services écosystémiques et quelques autres ; c'est ce qui attire l'attention et les financements publics. De fait, l'impact de la pollution atmosphérique diffuse sur les écosystèmes, qui était le sujet n° 1, est nettement en retrait.
Au niveau du processus MCPFE, qui est devenu *Forest Europe*, les conférences se sont succédé depuis celle de Strasbourg, la dernière (7e) ayant eu lieu à Madrid en 2015. On constate depuis quelques temps que les sujets discutés sont moins concrets que ceux qui ont boosté l'émergence des réseaux en 1990 ou 93. *Forest Europe* est motivé par des questions d'une autre envergure ou en tout cas d'une autre nature, comme l'idée de faire émerger une instance mondiale de gouvernance de la forêt.

Cette évolution s'illustre dans ces deux diapos qui rappellent les sujets qui ont été traités dans ces conférences ministérielles.
À Strasbourg en 1990, un certain nombre de sujets dont le monitoring des écosystèmes forestiers qui a fait l'objet de la résolution S1 (flèche rouge) mais aussi d'autres dossiers, notamment en matière de génétique avec le projet Euforgen (qui existe toujours). Une bonne partie des sujets portés à l'époque sont toujours très présents.
À Helsinki en 1993, il y a eu d'autres sujets dont, déjà, l'adaptation des forêts au changement climatique (2e flèche rouge) ; j'y reviendrai.

Mais progressivement, les sujets sont plus transversaux, c'est-à-dire qu'ils traitent à la fois de questions techniques et de questions plutôt de gouvernance, des questions plus politiques. Je ne vais pas détailler tous les thèmes qui ont émergé au cours des 20 dernières années, des thèmes qui sont un peu moins concrets et dont le progrès est plus difficile à tracer. En 2015, le représentant du ministère français de l'Agriculture à cette conférence a mentionné que c'était devenu une plateforme de dialogue politique de haut niveau sur les défis et les enjeux forestiers, mais de fait les objectifs et la nature des projets discutés ont également évolué.

Ce qui a changé aussi, c'est le rôle de la Commission européenne, dont le soutien financier pendant 20 ans a été tout à fait essentiel pour faire émerger ces projets européens. Au départ, c'était l'Europe des 12, des 15, etc. mais du coup ça a entrainé dès le début tous les pays d'Europe centrale, ce qui a été un aspect très important. Pour diverses raisons, ce soutien n'existe plus depuis 2006 mais on va voir (sessions 7 et 8) que le PIC Forêts *(ICP Forests)* est toujours actif en tant que programme de l'ONU et, contrairement à ce qu'on aurait pu craindre, la majorité des pays ont continué ces activités de monitoring. La grande différence c'est que le système n'est pas autant « porté » qu'il mériterait de l'être, au niveau financier mais aussi politique.

Remarquons au passage que le Centre Commun de Recherche de la Commission, qui a semblé un moment devoir se saisir de l'aspect technique de tout ce monitoring, n'est pas devenu le centre commun de suivi du monitoring, en tout cas pas du type de monitoring dont on parle ici.

3. Ce qui a changé en 25 ans (5/5)

AEE, l'Agence européenne de l'environnement voit ses prérogatives s'étendre progressivement.

Au niveau français, le suivi forestier s'est étoffé :

(i) le potentiel de l'inventaire forestier dans le domaine de l'écologie a fortement augmenté, avec l'adoption d'un nouveau protocole d'inventaire, et le développement d'une communauté de recherche valorisant ses données,

(ii) des site-ateliers de suivi (très) intensif à partir de 1995 au sein des établissements de recherche, pour atteindre 18 sites (SOERE FORET).

(+ dispositifs expérimentaux divers)

4. Focus : changement climatique et suivi continu des forêts (1/2)

Changement climatique : pas un sujet nouveau !

• **1990**, 1ère conf. MCPFE (Strasbourg) – enjeux listés : *pollution atmosphérique, incendies de forêts, réchauffement du climat, grands accidents climatiques, érosion des sols, ravageurs et pathogènes, dégâts de gibier, sur- et sous-exploitation, et interactions*.

•**1993** 2ème conf. MCPFE (Helsinki), engagement (H4) des Etats et UE « *à évaluer, développer et coordonner les dispositifs de suivi pour qu'ils appréhendent mieux les variations spatiales à large échelle et les dynamiques d'altération pouvant résulter du changement climatique en forêt.* ».

Résolution H4 : trop tard, trop tôt ?!

4. Focus : changement climatique et suivi continu des forêts (2/2)

Cet enjeu majeur doit-il conduire à modifier les suivis en forêt, en particulier pour RENECOFOR, pour les 30 prochaines années ?

Explorer de nombreuses pistes/modalités : stations prises en compte (conditions limites en bordure de niches ?), régimes sylvicoles appliqués,...

Réfléchir aux options de transition vers « RENECOFOR 2 » (au fur et à mesure du renouvellement des placettes, autres ?)

Tirer davantage partie des complémentarités avec les autres outils.

Un travail pour le COPILS RENECOFOR et au-delà.

Des leviers à identifier et des synergies à mettre à œuvre au niveau européen !

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

ECOFOR
ECOSYSTEMES FORESTIERS

25 ANS RENECOFOR

Merci de votre attention !

Ce qui a changé enfin, en positif cette fois, c'est que l'Agence européenne de l'environnement a vu petit à petit ses prérogatives s'étendre.

Au niveau français, le potentiel de l'inventaire forestier est beaucoup plus important qu'il y a une trentaine d'années : avec le changement de méthode, le développement des études autour des données d'inventaire révèle qu'il y a là un outil fantastique. Par ailleurs les sites atelier se sont développés depuis 1995, et sont en quelque sorte le niveau 3 du PIC Forêts bien que ça n'ait jamais été formalisé complètement. Ce sont des sites d'observation un peu comme les sites RENECOFOR, mais beaucoup plus lourdement instrumentés, et qui sont pris en charge par la recherche et non par un organisme comme l'ONF. À cela s'ajoutent des dispositifs expérimentaux nombreux et très divers en forêt, qui ne relèvent pas du suivi temporel mais qui, s'ils sont maintenus assez longtemps, peuvent fournir des données extrêmement utiles, même en termes de développement des écosystèmes.

Et le changement climatique ?

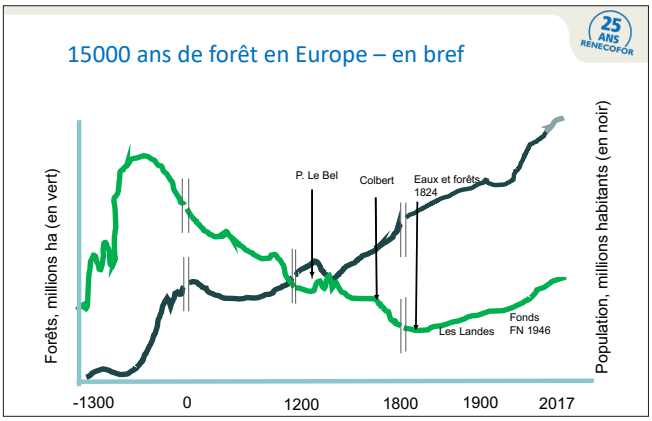
On l'oublie peut-être, mais à la Conférence ministérielle de Strasbourg en 1990, le réchauffement climatique figurait déjà en 3e position parmi les enjeux listés, avec les grands accidents climatiques. C'était déjà dans les esprits, mais de là à pouvoir bien le prendre en compte dans les dispositifs ?
En 1993, la 4e résolution d'Helsinki porte sur ce sujet ; les pays de l'Union européenne ont pris l'engagement (que la France, en des circonstances fortuites, n'a pas signé…), d'évaluer, développer et coordonner les dispositifs de suivi pour qu'ils appréhendent mieux les effets du changement climatique.
On est assez étonné *a posteriori* de la pertinence de cet engagement. Mais ça venait un peu tard par rapport à RENECOFOR et ses homologues qui venaient juste d'être créés, et peut-être aussi trop tôt parce qu'en matière de connaissance scientifique du phénomène du changement climatique on n'avait pas les idées dont on dispose maintenant.

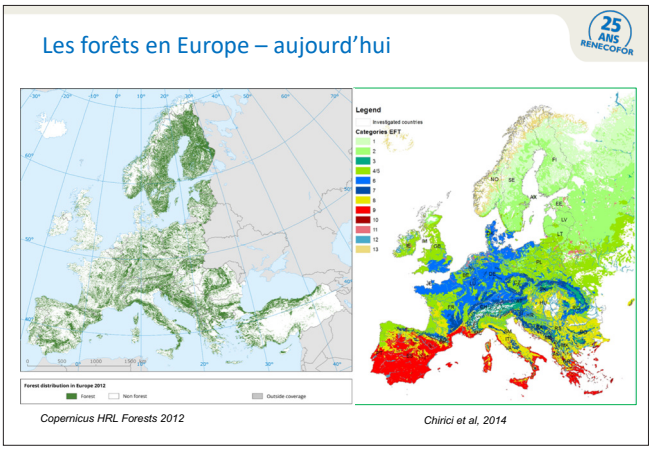
Le changement climatique est un sujet extrêmement prégnant ; doit-il conduire à modifier les suivis actuels ? C'est une question qui se pose maintenant, pour le long terme. On peut déjà identifier diverses pistes à explorer. Par exemple, RENECOFOR c'est 102 placettes disposées dans des conditions stationnelles « moyennes » ou en tout cas pas extrêmes ; or dans des situations extrêmes on aurait peut-être un signal différent. De la même façon, le régime sylvicole est « moyen », dans l'ordre de ce que fait l'ONF en général : il pourrait être intéressant d'avoir une action plus forte ou au contraire des peuplements sans sylviculture. On peut réfléchir à une transition vers un « RENECOFOR-2 », qui peut se faire de différentes façons, par exemple en recrutant des placettes qui auraient fait leur temps pour les reconvertir dans un dispositif parallèle mais qui ferait un tout avec le RENECOFOR actuel. Il y a aussi les outils que j'ai évoqués, qui fournissent des informations, et dont il faut tenir compte. C'est donc un travail pour le Comité de pilotage dont le réseau s'est doté, et que j'ai le plaisir de présider : on va s'y atteler avec tous ceux qui ont des idées, des connaissances, des avis…

Enfin l'avenir de RENECOFOR passe par l'Europe, c'est presque sûr : on n'imagine pas pouvoir faire quelque chose de marquant, de très fort en termes d'évolution du réseau, sans le niveau européen. La présence de quelques représentants de l'instance européenne est une occasion d'en discuter.

QUESTIONNEMENTS ET ENJEUX ACTUELS POUR LE MONITORING FORESTIER À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

Annemarie Bastrup-Birk
Agence Européenne de l'Environnement





Légende de la carte de droite :

1 Forêt boréale
2 Forêt hémiboréale et forêt némorale de conifères ou mixte
3 Forêt de conifères alpins
4/5 Forêt de chênes ou de chênes et bouleaux sur sols oligotrophes / Forêt de feuillus sur sols mésotrophes
6 Forêt de hêtres
7 Forêt de hêtres de montagne
8 Forêt de feuillus termophiles
9 Forêt de feuillus à feuillage persistant
10 Forêts de conifères des régions méditerranéennes, anatoliennes et macaronésiennes
11 Forêt de zones humides
12 Forêt alluviale et ripisylve
13 Forêt non-riveraine d'aulne, de bouleau ou de tremble

Je représente ici l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) mais, ayant aussi participé au réseau du PIC Forêts au Danemark, je me reconnais bien dans les discussions organisées pour le 25e anniversaire du réseau RENECOFOR et j'ai plaisir à y participer.
L'AEE est une agence de l'Union européenne dont la mission consiste à fournir des informations fiables et indépendantes sur l'environnement. L'AEE entend soutenir le développement durable en contribuant à apporter des améliorations significatives et mesurables à l'environnement européen en fournissant, en temps voulu, des informations ciblées, pertinentes et fiables aux décideurs politiques et au public.

Dans ce cadre, je vais tenter de partager avec vous quelques questionnements et enjeux actuels sur le monitoring forestier à l'échelle européenne.
Je donnerai d'abord un aperçu général sur les forêts en Europe, ce qu'elles nous apportent, les menaces et les pressions qui pèsent sur ces forêts, et ce que nous appelons les 5 grands impacts ; ensuite viendra une discussion sur les questionnements et les enjeux actuels, et leurs implications pour le monitoring forestier actuel, mais au niveau européen.

Quelle forêt avons-nous en Europe ?

Jetons un coup d'œil rétrospectif sur l'évolution de la forêt en Europe depuis 3 000 ans environ avec cette figure qui souligne la relation entre l'évolution de la population (en noir) et celle de la superficie des forêts (en vert). C'est illustré ici par la forêt française, mais ailleurs la situation est assez similaire. On observe une relation très étroite qui commence avec l'augmentation de la population et des défrichements, au fur et à mesure qu'on a besoin de la forêt pour l'alimentation, le chauffage, la construction, etc. Mais on voit aussi et surtout que dernièrement, à partir des années 1850, la superficie des forêts augmente grâce aux mesures d'administration et de protection des forêts. Ça s'est esquissé à partir de Philippe le Bel, avec la première administration forestière, mais ça se manifeste actuellement (depuis le 19e siècle) avec le souci de protection des forêts et toutes les lois qui concourent à cette protection.

Regardons maintenant ce que représente la forêt en Europe aujourd'hui. On voit sur la carte de gauche un paysage couvert à 40% en moyenne par les forêts, mais avec une grande disparité entre pays. Elles abondent surtout dans les pays scandinaves et dans certains pays du centre de l'Europe (en Slovénie) où elles occupent plus de 60 % du territoire.
À l'échelle européenne, la forêt couvre en tout à peu près 186 millions d'hectares : par sa simple présence physique, la forêt a donc une grande importance sur le territoire, mais avec une grande diversité de formations forestières. On voit sur la carte de droite comment elles se répartissent, selon une classification européenne en 14 catégories (la 14e étant les forêts plantées qui n'apparaissent pas ici) : au Nord, les forêts boréale et hémi-boréale, côté atlantique c'est plutôt les forêts de hêtre, en montagne les forêts de hêtre de montagne et celles de conifères alpins, il y a les forêts de la zone méditerranéenne, etc. Rien de nouveau pour vous, en

France, où sont représentés la plupart des types de forêt. Mais outre la diversité des types biogéographiques, il faut ajouter toute l'histoire de la forêt, l'histoire de la gestion, l'histoire des traditions, qui bien sûr ont aussi des effets sur ce qu'est la forêt aujourd'hui.

Que nous apportent les forêts ?

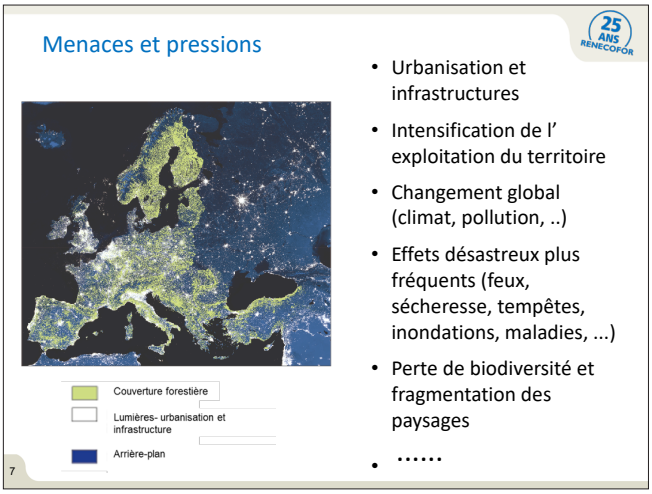
La forêt nous apporte beaucoup de choses, à commencer par le bois. Quand on pense forêt on pense bois : le bois rond qui sert notamment à la construction et au chauffage, avec tous les emplois liés à cette production. Cependant il y a un intérêt croissant pour les produits et services écosystémiques forestiers, même si ça ne se traduit pas encore tellement en termes d'emplois et de rémunération : séquestration du carbone, purification de l'eau mais aussi tout ce qui est récréation, tourisme, et jusqu'au calme et à la spiritualité que l'on va rechercher en forêt. Le tout étant, bien sûr, conditionné par l'état de l'écosystème, de la biodiversité.

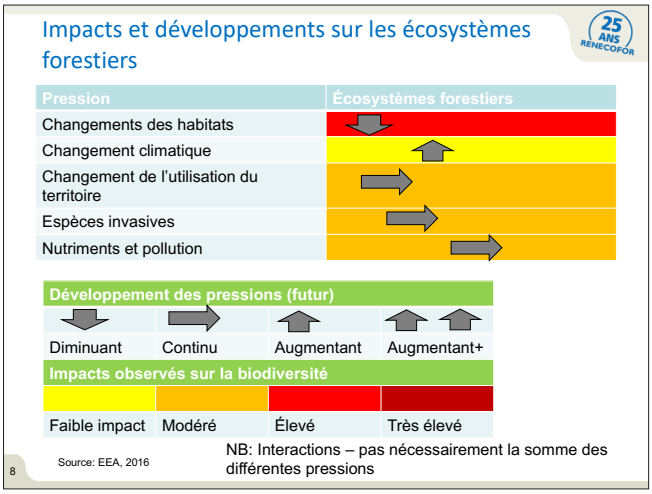
En raison de cet intérêt grandissant, des études ont été lancées au niveau européen pour classifier d'abord, puis identifier et cartographier les services écosystémiques. On les a classifiés en 3 grandes catégories : la production, la régulation, et les services culturels, spirituels et sociaux. Trois catégories qui reposent, c'est fondamental, sur le « soutien » de la biodiversité, des sols, des éléments nutritifs…
Nous reconnaissons ainsi l'importance de la forêt comme habitat, comme écosystème, comme ressource naturelle en elle-même et pour les gens qui y vivent, pour le milieu rural, pour le milieu urbain et pour la société en général. L'importance de la forêt en elle-même et parce que de nombreux secteurs sont basés sur ces ressources forestières, avec des manifestations d'une compétition croissante entre ces ressources.

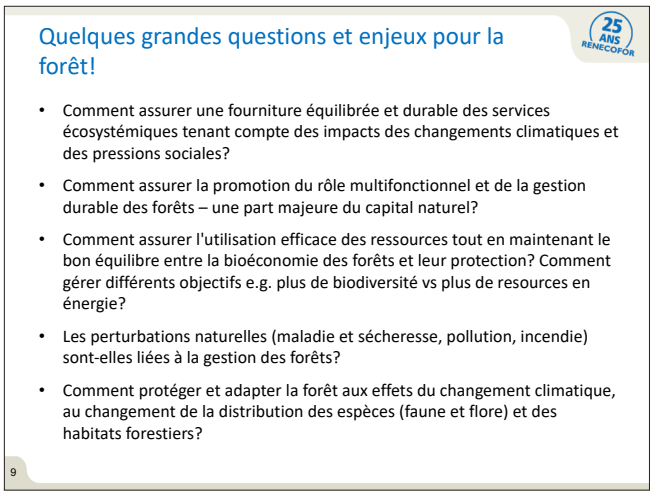
Quelles sont les menaces et les pressions ?

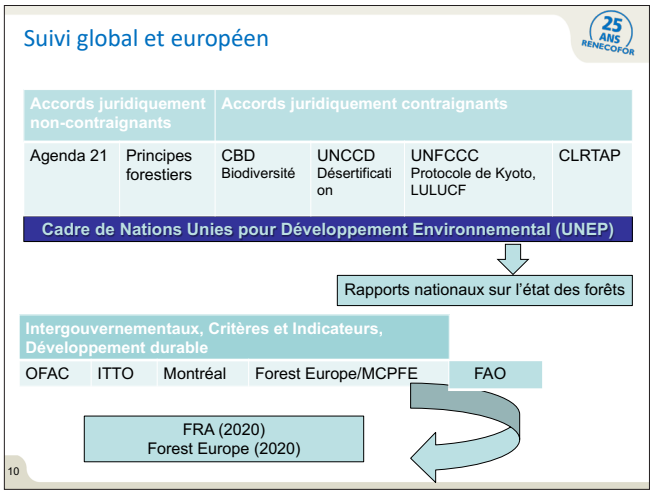
Dans le même temps, la forêt subit des menaces et des pressions. En premier lieu, l'urbanisation et les infrastructures. Sur cette carte elles sont exprimées par la lumière, avec en superposition la carte de la forêt : on voit bien que tout le territoire de l'Europe est essentiellement dominé par ces infrastructures.

Je ne détaille pas toutes les menaces et les pressions évoquées ci-contre, et j'en arrive à l'évolution des fameux 5 impacts qui en résultent.

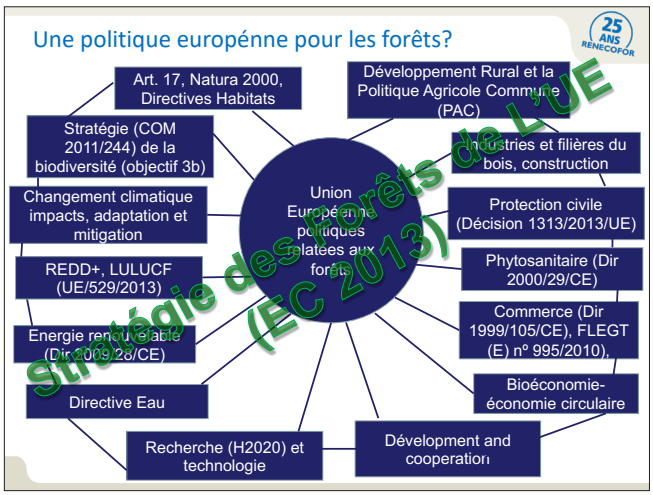








Pour l'explication des sigles et désignations spécifiques de cette diapo et des suivantes, voir le glossaire.



Changements globaux : cinq grands impacts sur les forêts

Certaines de ces menaces et pressions conduisent à des modifications d'habitats, assez importantes en forêt mais dont on pense qu'elles diminueront dans le futur ; il y a bien sûr les impacts des changements climatiques, encore faibles à modérés actuellement mais dont on s'attend à ce qu'ils empirent ; il y a enfin les trois impacts « modérés » liés (1) aux changements de l'utilisation du territoire, (2) aux espèces invasives et (3) à la pollution en général et aux apports de nutriments, et dont on pense qu'ils vont se maintenir.

Les questionnements et enjeux actuels

En conséquence, les enjeux actuels pour la forêt tournent autour de quelques grandes questions. Comment, tout d'abord, assurer une fourniture équilibrée et durable des services écosystémiques, qui tienne compte des impacts des changements climatiques et des pressions sociales ? Et comment promouvoir le rôle multifonctionnel des forêts et leur gestion durable, la forêt étant une part majeure du capital naturel ? Comment assurer un équilibre entre la protection de la forêt, de sa biodiversité, et l'utilisation de ses ressources pour la bioéconomie ? Avec cette préoccupation, par exemple : les impacts des perturbations comme les maladies, la sécheresse, la pollution, l'incendie ont-ils un lien avec la manière dont sont gérées les forêts ? Et enfin, comment protéger la forêt et l'adapter aux effets du changement climatique, ainsi qu'aux changements de la distribution des espèces (faune et flore) et des habitats forestiers ?

Pour répondre à ces enjeux et questionnements, il y a d'abord le dispositif global des Nations unies pour le suivi de l'environnement en général, dans le cadre d'accords internationaux juridiquement contraignants ou non. Vous y reconnaissez entre autres la convention de Genève (CLRTAP*) pour combattre la pollution atmosphérique, mais aussi la Convention cadre sur le changement climatique avec le protocole de Kyoto, les efforts contre la désertification, la Convention de la biodiversité (CDB*)…
Il y a d'autre part le suivi des critères et indicateurs de gestion forestière durable, au sein de diverses instances transnationales, parmi lesquelles Forest Europe (la Conférence ministérielle dont Christian Barthod a rappelé l'origine), sans oublier les statistiques périodiques de la FAO*. Cela donne lieu à des rapports nationaux et des rapports européens pour fournir les informations sur l'évolution de la situation des forêts dans les différents pays.

Cependant l'Union européenne n'a pas de *politique forestière* à proprement parler, mais une *forêt de politiques* et d'initiatives qui influent directement sur les forêts. Ainsi les forêts, et l'information qui vient des forêts, ont un rôle très important pour répondre aux multiples questions traitées dans ces différentes politiques ; inversement, il faut pouvoir évaluer l'effet de toutes ces politiques sur les écosystèmes forestiers, sur les ressources et aussi sur leur gestion (cf. « Nouvelle stratégie pour les forêts et le secteur forestier » de la Commission européenne, en 2013).

On a donc un besoin continu d'information et d'indicateurs sur l'état des forêts, pour pouvoir implémenter ces politiques européennes et en suivre les effets.

La santé des forêts sine qua non

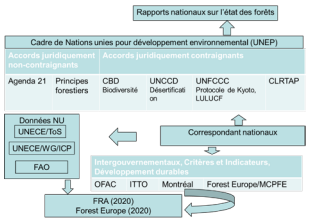
- La capacité des écosystèmes forestiers à s'adapter aux pressions et menaces actuelles et futures - en particulier les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers et la foresterie (passé, présent et futur) – résilience.
- La capacité de production et de fourniture de services et produits (bois et non-bois)
- Les interactions avec d'autres écosystèmes et les secteurs hors-forêt
- Leur contribution à la protection et au maintien de la biodiversité en Europe
- Valorisation des produits non-bois et des services écosystémiques

La base...collection de données existantes

13

La qualité des informations est fondamentale:

- Données pertinentes, harmonisées, complètes, systématiques, représentatives, fiables et à jour (répétées) des ressources forestières et de leur gestion
- Des rapports périodiques et réguliers sur l'état des forêts et leur développement pour implémenter les politiques nationales, européennes et globales relatives aux forêts



Besoins actuels et futurs...

i. Vers des connaissances plus complètes et harmonisées p.ex.:
   i. les ressources et provisions en bois et en biomasse
   ii. les produits forestiers non-bois
   iii. les services fournis par l'écosystème forestier p. ex. le carbone dans le sol et la litière
ii. Renfort du méthodologique pour des informations plus précises, harmonisées et opportunes des écosystèmes et des ressources forestiers pour alimenter les systèmes d'information de l'Union Européenne
iii. Renfort du soutien aux politiques de l'UE et aux processus internationaux ayant besoin d' informations forestières cohérentes
iv. Une utilisation plus ample au niveau européen des informations existantes (données télédétection incluses)

15

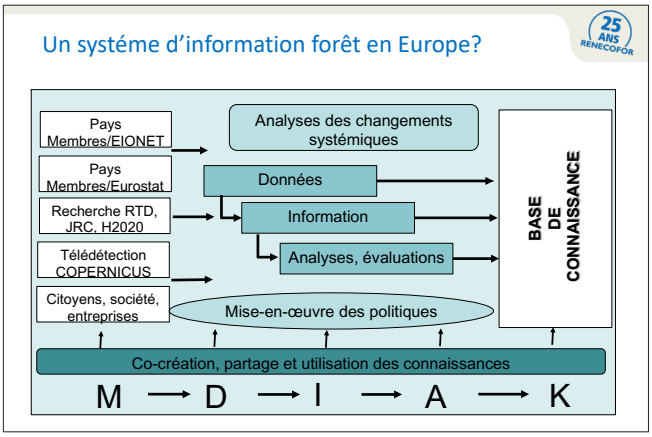
Implications pour le monitoring forestier actuel

Tous les enjeux évoqués précédemment dépendent de l'état, de la santé des forêts. C'est ce qui conditionne la capacité des écosystèmes à s'adapter, à produire, à fournir des services ; ce qui conditionne aussi les interactions avec les autres écosystèmes et les secteurs hors forêt. La santé des forêts conditionne enfin leur contribution à la protection et au maintien de la biodiversité en Europe, ainsi que la valorisation des produits non-bois et des services écosystémiques.

Les sources de données sur l'état des forêts sont nombreuses, en réponse aux objectifs des diverses politiques et initiatives européennes. On voit ici le schéma de base, décliné pour la France (mais ça vaut aussi pour les autres pays), avec des collections de données de toutes sortes : celles du PIC Forêts*, du projet européen de démonstration BioSoil*, le système d'information sur les feux de forêt (EFFIS*), les données des sites Natura 2000, celles des sites ateliers de recherche, l'inventaire forestier, l'inventaire de l'Eurostat* relatif à l'utilisation des sols (LUCAS*), et bien sûr tout le côté télédétection à tous les niveaux (européen, national, local). Mais l'ensemble est assez fragmenté : chaque dispositif cherche à couvrir ses propres besoins d'information, et il faut parfois trouver des compromis entre le niveau de détail et la rapidité de mise à disposition de ces informations.

Ce qui est fondamental en tout cas, c'est la qualité de ces informations, selon toute une série de critères. Face aux enjeux et aux questions, on a besoin de données pertinentes, harmonisées, complètes, systématiques, représentatives, fiables, à jour, etc. C'est indispensable pour établir les rapports périodiques sur l'état des forêts (et leur développement) qui permettent d'implémenter ces politiques au niveau national, européen et global. Sans oublier que tout ça peut aussi avoir beaucoup d'importance au niveau local et régional.
Nous aurons l'occasion, au cours du colloque, de souligner cette exigence de qualité des données.

Pour l'avenir, nous avons besoin de connaissances plus complètes et plus harmonisées sur les ressources et l'approvisionnement en bois et biomasse, sur les produits forestiers non bois, et sur les services écosystémiques forestiers (comme le stockage de carbone dans le sol et la litière). Nous avons besoin d'amélioration méthodologique pour alimenter le système d'information de l'UE, qui est très dense, avec des informations harmonisées, précises et pertinentes. Il faut aussi mieux renseigner les politiques de l'UE et les processus internationaux en général, qui plus que jamais requièrent des informations forestières cohérentes, et amplifier l'utilisation des informations existantes au niveau européen. Nous avons eu jusqu'à présent un problème d'accessibilité des données ; les moyens d'utilisation étaient très dépendants de la télédétection et ne permettaient pas vraiment d'exploiter l'information disponible sur les sites et les parcelles.



Pour conclure,

c'est peut-être le moment de penser un système d'information forêt en Europe, selon le principe qui anime l'Agence de l'environnement, ce qu'on appelle la chaîne MDIAK (en anglais : *Monitoring, Data, Indicators, Assessments, Knowledge (+ understanding, action)*).
Ça commence par le monitoring (les suivis émanant des pays et des institutions, projets de recherche, télédétection et autres), qui fournit des données ; de là découlent des informations, des analyses et évaluations pour éclairer la mise en œuvre des politiques européennes, et le tout construit une base de connaissances destinées aussi bien aux politiques qu'aux personnes qui s'intéressent à la forêt.

Je vous remercie de votre attention.

Discussion

Questions / Réponses

Brigitte Pilard-Landeau, ONF-DFRN - Le financement de l'Ademe va s'éteindre : quelle est la perspective de financement complémentaire ? Puisque tout le monde est enthousiaste sur l'intérêt du réseau RENECOFOR, l'intérêt d'aller jusqu'à 30 ans et même de poursuivre au-delà, il faut bien se poser ici la question...

> Catherine Cumunel - *N'appartenant pas à la direction du MTES* dont relève cette décision, je n'ai pas de réponse à ce stade, mais j'ose espérer qu'on pourra trouver une solution. Je relaierai la question, dont on a bien conscience, à la direction chargée de cette réflexion.*

> Manuel Nicolas - *Pour information, la question a été soulevée lors du comité de pilotage scientifique en février 2017, et tous les bailleurs de fonds en ont été saisis assez tôt. Mais c'est une question qui pourrait aussi regarder d'autres services des ministères concernés.*

Xavier Bartet, DT- ONF Centre-Ouest Aquitaine - On a vu qu'il y a dans d'autres pays européens des réseaux équivalents à RENECOFOR. Or il y a une spécificité de gestion française, notamment en forêt publique, qui consiste à concilier les différents objectifs sur un même espace alors qu'ailleurs, notamment dans les pays anglo-saxons, c'est plutôt production intensive versus évolution libre. Aurait-on des résultats comparatifs qui permettraient de montrer une spécificité de la réaction de nos forêts, liée à cette gestion multifonctionnelle, par rapport à celles où on concentre un objectif par territoire ?

> Guy Landmann - *Je crois savoir que le contraste entre la France et d'autres pays en termes de partition de l'espace n'est pas si manifeste que ça au sein de l'Europe. C'est vrai surtout pour la Nouvelle Zélande ou d'autres pays du monde. Par ailleurs dans nos inventaires forestiers, dans nos réseaux, on n'affecte pas un coefficient d'objectifs à la gestion de la forêt ; il serait donc difficile de répondre, d'autant que pour des raisons techniques, certains pays ont opté pour des placettes de niveau II (type RENECOFOR) plutôt non gérées alors que les autres ont les ont choisies gérées (c'est notre cas). Ce choix ne reflète pas des différences catégoriques de type de gestion dans l'espace mais plutôt des choix d'opérateurs du suivi. Ça ne répond pas de façon simple à la question.*

Myriam Legay, cheffe du département RDI de l'ONF - Dans quelle mesure l'approche de l'AEE* par les services écosystémiques modifie-t-elle la façon dont on peut concevoir le monitoring forestier ?

> Annemarie Bastrup-Birk (ABB) : Grande question ! L'intérêt européen pour les services écosystémiques est comme un retour d'intérêt pour les écosystèmes. Il faut comprendre les processus : ce qui se passe dans les sols, dans les plantes, comprendre l'état de santé. Ce sont là des sujets de base du réseau RENECOFOR. Il y a eu une période de délaissement, l'UE s'est plutôt intéressée aux statistiques, à la production ; maintenant elle en revient à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes. Je pense donc qu'on peut continuer globalement dans la même direction, sachant que les circonstances ont changé comme l'a dit Guy Landmann, et qu'il y a des choses à ajuster.

Claudy Jolivet, INRA Orléans, unité InfoSol - Je suis coordinateur du réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), qui ne s'intéresse pas seulement aux sols forestiers mais aux sols français dans leur ensemble, y compris sols agricoles, etc. On démarre une nouvelle campagne qui va repasser notamment sur les sols forestiers. Parallèlement j'ai suivi le programme BioSoil* qui dans les années 2006-2007 a échantillonné les sols du réseau européen (16x16) de surveillance des forêts ; je voudrais savoir si, au niveau européen, il pourrait y avoir un nouveau programme de ce type pour pouvoir faire, notamment, un monitoring des questions de stockage de carbone dans les sols du réseau 16x16, très complémentaire de ce qui se fait sur le réseau RENECOFOR en France ? La question du carbone est essentielle vis-à-vis du changement climatique et vous avez souligné les besoins de connaissances sur le stockage dans les sols à l'échelle de l'Europe…

> ABB – Le programme BioSoil est une excellente base et ce serait une très bonne idée de refaire cet exercice. Je ne peux pas dire ce que pense la Commission (l'Agence fait partie de l'UE mais n'est pas à la Commission) mais j'entends dire en effet que, 10 ans après BioSoil, il serait peut-être temps de le refaire et de profiter des informations de base qui en sont sorties. Mais il faut que les pays manifestent leur intérêt et essaient ensemble de convaincre la Commission de relancer ce projet, dans la forêt et hors forêt.

Nicolas Debaive, Réserves Naturelles de France (RNF) - L'association RNF coordonne notamment avec l'ONF un protocole de suivi par placettes permanentes à la fois dans les Réserves Biologiques et les Réserves Naturelles. Je pense que ça fait partie des « autres outils » évoqués dans la présentation de Guy Landmann et dont il faudrait mieux tirer parti. Y a-t-il des pays européens qui ont su harmoniser, non pas leurs dispositifs puisqu'ils ont leurs objectifs propres, mais leurs systèmes d'information ? Y a-t-il des exemples de systèmes harmonisés où les données seraient accessibles à un même endroit ?

> ABB - Le meilleur exemple est celui de la Suisse, qui a essayé de superposer plusieurs réseaux et qui l'a fait relativement tôt. De sorte qu'elle a sur le même système le réseau 16x16, le réseau de niveau 2, l'inventaire forestier et aussi des sites de recherche. Ça permet de regrouper au moins des objectifs, mais je ne saurais dire comment ça marche au point de vue harmonisation des données. En tout cas, le fait d'avoir une synchronisation dans le temps et aussi dans l'espace est déjà un grand pas en avant. Je sais que d'autres pays essaient de coupler leurs réseaux de surveillance des forêts avec les inventaires forestiers, entre autres sur les parcelles niveau 1 (16x16). C'est un processus assez compliqué mais il y a quelques progrès ; certains pays ont même remplacé complètement le niveau 1 par l'inventaire forestier. L'idée d'une nécessaire harmonisation est donc à l'œuvre, mais c'est un travail qui est assez long, surtout parce que si on a déjà une longue série de données dans le temps on n'est pas satisfait de la perdre. Donc il faut des transitions et aussi des fonds pour y parvenir. Mais c'est une vision à avoir pour le futur : regrouper le plus possible d'informations et les harmoniser de sorte qu'elles puissent se compléter.

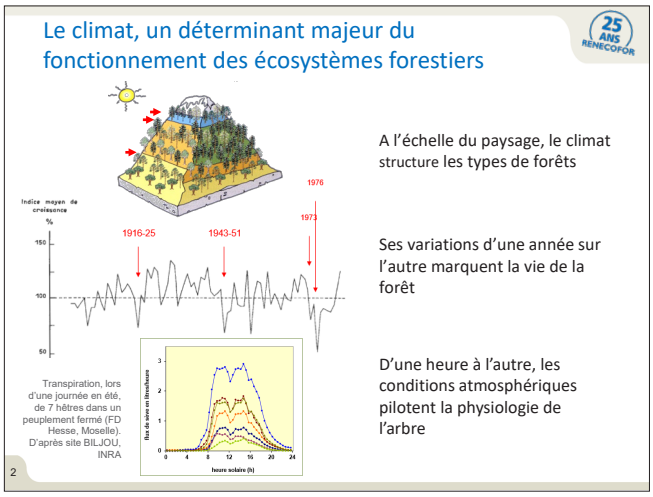
Les intervenants de la première session :
A-M Bastrup-Birk, A. Maillet, C. Cumunel, E. Van de Maele, L. Galsomiès, C. Barthod

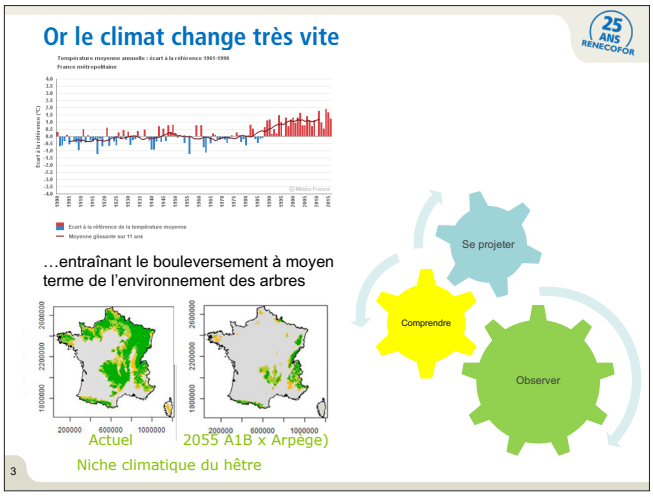
Photo : Luc Croisé, ONF

SESSION 2 - COMMENT LES ARBRES RÉPONDENT-ILS AUX VARIATIONS DU CLIMAT ?

INTRODUCTION

Myriam Legay
ONF, cheffe du département recherche-développement-innovation





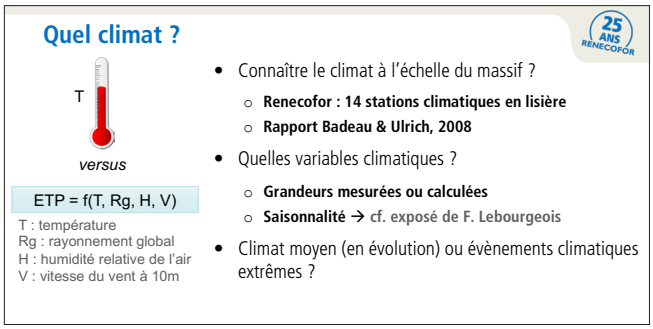
Comment les arbres répondent-ils aux variations du climat ? En ouverture de cette session, je vous invite à réfléchir à ce que ça signifie d'étudier la réponse des arbres forestiers au climat.

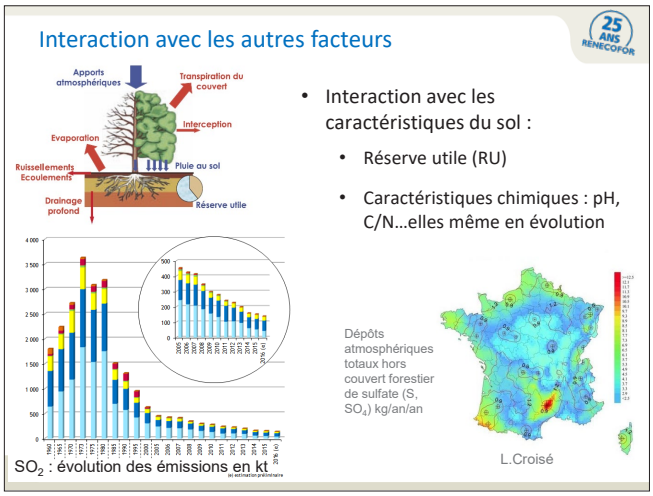
En guise d'échauffement, commençons par une évidence : le climat est un déterminant majeur du fonctionnement des écosystèmes forestiers. Il structure nos paysages, que ce soit en latitude ou en altitude. On sait aussi que ses variations d'une année à l'autre marquent la vie de la forêt. C'est illustré ici par une étude dendrochronologique produite par Michel Becker sur les sapins au moment des pluies acides dans les Vosges (1987), et qui montre l'effet des différentes sécheresses. Enfin d'une heure à l'autre, les conditions atmosphériques pilotent la vie de l'arbre comme on peut l'observer sur les sites ateliers, avec ici un graphique de suivi de la transpiration en été dans un peuplement de hêtre. On y voit également que le climat que connaissent les hêtres n'est pas le même dans les différentes strates de la canopée.

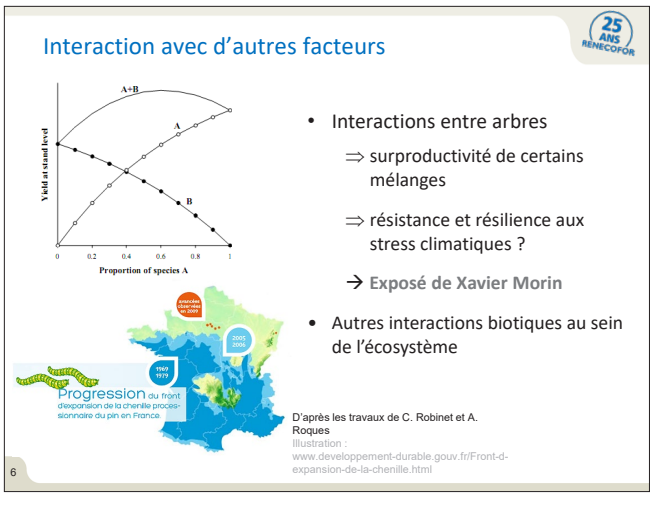
Or ce climat qui marque tant nos écosystèmes forestiers change très vite, témoin ce graphique de Météo France sur l'évolution des températures de 1900 à 2015. Et donc à moyen terme c'est l'environnement de croissance des arbres qui est complètement bouleversé comme on le voit sur la carte obtenue par Paulina Pinto à partir de 3 modèles de niche : elle montre l'évolution de la niche climatique du hêtre entre le climat actuel à gauche et le climat en 2055 suivant le scénario A1b du GIEC* et le modèle Arpège.
Si on veut se projeter dans ce climat futur, il nous faut comprendre pour modéliser, et pour comprendre et modéliser, il faut avoir de bonnes données d'observation.

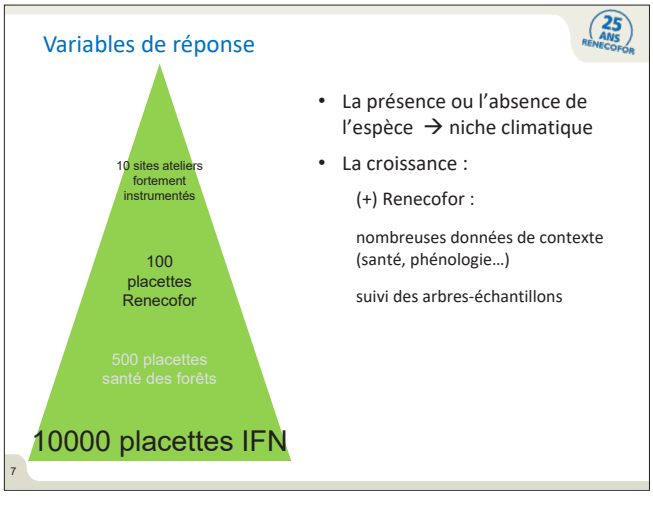
Appréhender les variables du climat

Le climat, oui, mais quel climat ? On sait que connaître le climat à l'échelle d'un massif forestier, ça n'est pas si simple (sans parler du climat à l'échelle des arbres à l'intérieur même du peuplement). RENECOFOR, qui contribue à l'acquisition de données climatiques sur 14 stations situées hors couvert, a permis de montrer que la comparaison de ces données climatiques avec celles de Météo France n'est pas évidente et soulève un certain nombre de questions. Et par ailleurs, quel genre de variables utiliser pour suivre le climat ? Les variables qui intéressent la forêt peuvent être de différents types : il y a celles qui sont directement mesurées, comme la température, et d'autres qui sont plus complexes. C'est le cas du bilan hydrique, une variable majeure pour la vie de la forêt, à travers sa composante évapotranspiration potentielle (ETP), calculée selon des formules compliquées (ici la formule de Penman) à partir de plusieurs variables climatiques qui ne sont pas mesurées sur toutes les stations. Et enfin quel aspect du climat considérer ? S'en tenir au climat moyen et à son évolution en termes de dérive, ou s'intéresser aux événements









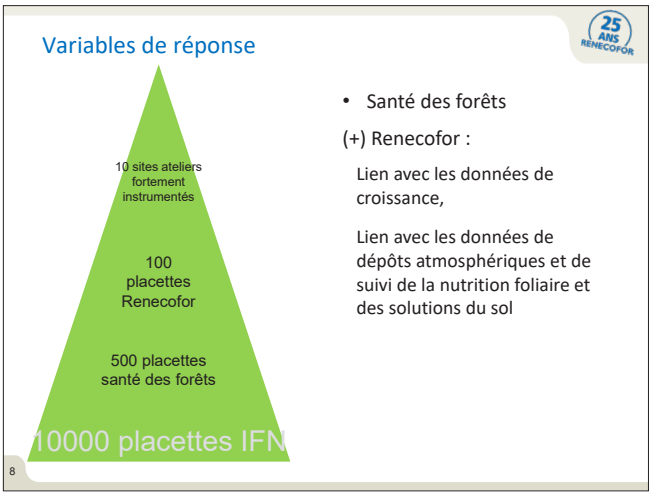
climatiques extrêmes ? Événements dont on sait qu'ils marquent en général les évolutions majeures de la forêt, comme on l'a vu lors de l'épisode des pluies acides : les grandes sécheresses ont en fait agi au moins autant que la pollution atmosphérique dans les dépérissements observés à l'époque.

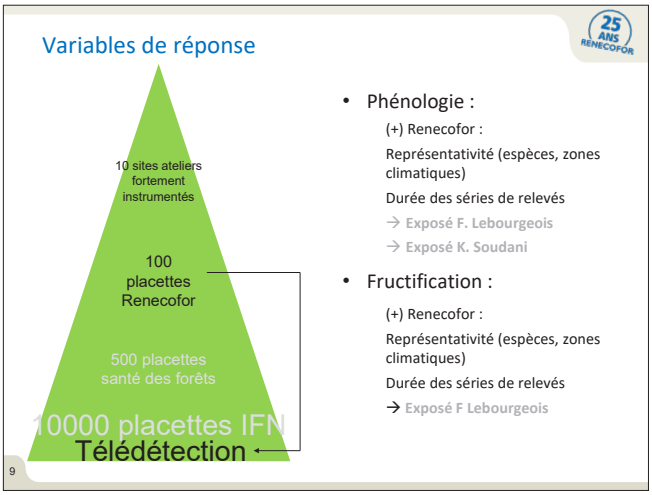
Souvenons-nous aussi que la réponse des arbres au changement de climat se fait en interaction avec d'autres facteurs. À commencer par les autres facteurs abiotiques : interaction avec les caractéristiques du sol, comme la réserve utile, puisque cette fameuse variable du bilan hydrique est calculée à partir de la réserve utile des sols ; interaction avec les caractéristiques chimiques des sols, comme le pH et le C/N, qui ont le mauvais goût d'être elles-mêmes en évolution puisqu'elles sont liées aux retombées de la pollution atmosphériques. Retombées dont certaines évoluent à la baisse comme le dioxyde de soufre ; attention, le graphique a une échelle un peu particulière, au pas de 5 ans jusqu'en 2005 et annuel ensuite. Cette interaction entre les caractéristiques chimiques et le climat est forte puisque les dépôts atmosphériques sont véhiculés jusqu'en forêt par les pluies : l'importance des retombées dépend donc de l'importance des pluies, comme le montre la carte établie par Luc Croisé.

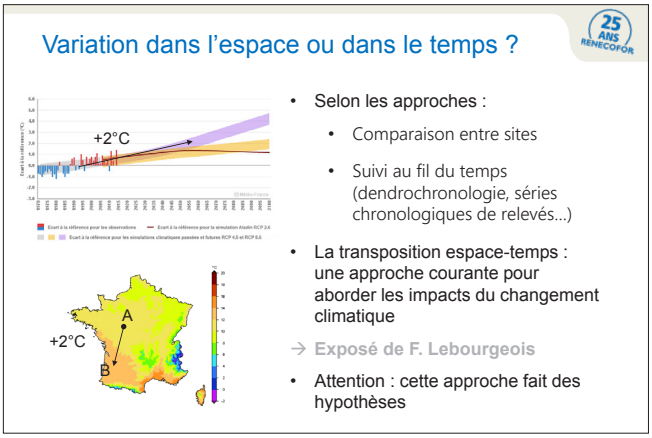
Il y a aussi des interactions avec les facteurs biotiques, d'abord parce que les arbres interagissent entre eux. On sait par exemple qu'un mélange ne se comporte pas comme la somme de ses composantes. Un certain nombre de mélanges, c'est maintenant bien établi, montrent une surproductivité par rapport à ce qui est attendu en cumulant la productivité des composantes au prorata du mélange. Les mélanges ont-ils aussi des propriétés intéressantes de résistance ou de résilience par rapport au stress climatique ? Xavier Morin va aborder cette question (entre autres). La réponse des arbres au climat se fait enfin en interaction avec bien d'autres phénomènes biotiques. J'en donne ici l'exemple classique de l'évolution de la répartition de la chenille processionnaire du pin. Dans la bande figurée en bleu clair les pins ont non seulement connu un réchauffement sensible entre les années 70 et les années 2000, mais ils ont aussi subi l'arrivée de la processionnaire du pin, qui n'était pas présente auparavant. J'en reste là pour le climat…

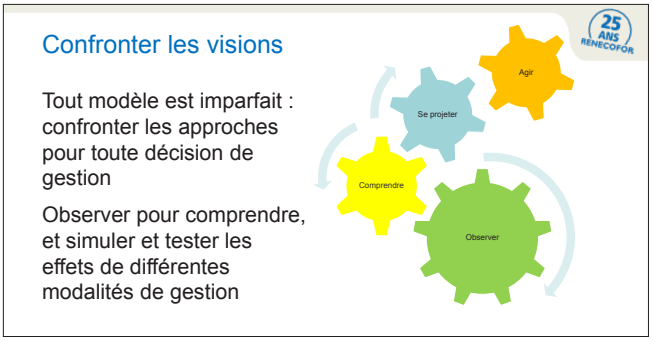
Regardons maintenant du côté des variables de réponse…

…et des ressources du système de monitoring français. J'ai figuré par ce triangle vert la « pyramide du monitoring » : au sommet, une dizaine de sites-ateliers très fortement instrumentés sur lesquels on recueille un grand nombre de données ; à la base, plusieurs milliers de placettes relevées annuellement par l'Inventaire forestier national (IFN) ; aux niveaux intermédiaires, le réseau RENECOFOR avec sa centaine de placettes, et le réseau de santé des forêts (plusieurs centaines de placettes). Le réseau de santé des forêts apparaît en gris parce qu'il n'intervient guère dans la première série de variables qui nous intéresse ici. D'abord la présence ou l'absence des espèces, qui permet de définir leur niche climatique : c'est une variable sur laquelle RENECOFOR peut apporter sa contribution, mais c'est surtout la puissance de l'Inventaire forestier qui est intéressante. Ensuite la croissance, variable sur laquelle le réseau RENECOFOR a un apport spécifique puisqu'il fournit, en lien avec la croissance, un grand nombre de données de contexte sur la santé du peuplement, sa phénologie, ainsi que des données de suivi au fil du temps d'arbres échantillons. Données qui ne sont pas disponibles dans l'IFN.









Deuxième série de variables de réponse, c'est celle des variables liées à la santé des forêts ; là j'ai « éteint » l'IFN qui contribue assez peu. Sur cet aspect le réseau le plus extensif est le réseau 16x16 (santé des forêts), et RENECOFOR a là encore un apport spécifique en ce qu'il permet de mettre en lien ces données de santé des forêts avec un grand nombre de données de croissance, d'une part, mais aussi de dépôts atmosphériques ou de nutrition foliaire.

Troisième série de variables, celles qui sont liées au processus de reproduction : la phénologie et la fructification. J'ai « éteint » ici l'IFN et le réseau de santé des forêts car sur ce type de variables RENECOFOR est le réseau le plus représentatif : il fournit des données qui permettent d'avoir une certaine représentation des grandes espèces et des grandes zones climatiques, et ses séries chronologiques de relevés sont les plus longues et les plus cohérentes pour les arbres forestiers en France. Il en sera question notamment dans les exposés de François Lebourgeois et celui de Kamel Soudani (présenté par Eric Dufrêne). Particularité ici, la télédétection permet d'étendre l'acquisition de données en lien avec le réseau RENECOFOR, qui apporte des données de calage.

Réponse aux variations du climat… dans l'espace ou dans le temps

Je vous invite aussi à prendre conscience de ce que, pour analyser la réponse des peuplements, on s'intéresse tantôt aux variations dans l'espace, tantôt aux variations dans le temps, ça dépend des approches. Quand on compare deux sites, on parle de variation dans l'espace, alors que pour la dendrochronologie ou l'analyse de séries chronologiques de relevés, il s'agit d'évolution au fil du temps. En matière de changement climatique, on fait souvent un tour de passe-passe qui consiste à utiliser une différence dans l'espace (par exemple une différence entre deux sites A et B, dont le climat diffère par exemple de 2°C) pour étudier ce qui pourrait se passer au fil du temps si le site A se réchauffait de 2° suivant un scénario climatique. C'est ce qu'on appelle la transposition espace-temps.

Évidemment, cette approche indispensable et très pratique fait des hypothèses fortes et elle a donc ses limites.

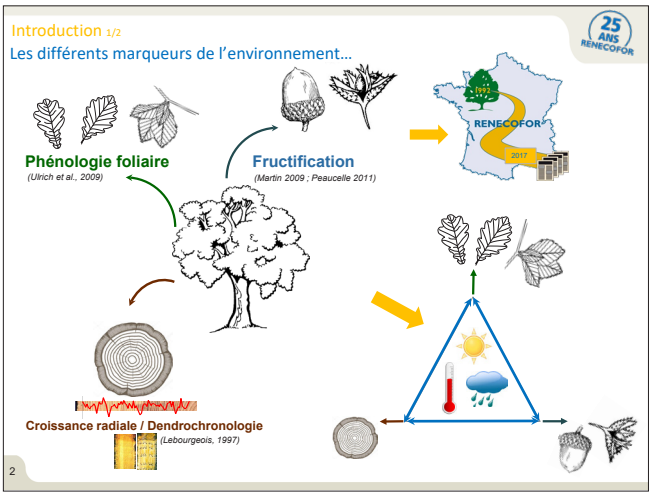
Et d'une façon générale, tout modèle est imparfait. Si je vous ai emmenés dans ce jardin plein de sentiers qui bifurquent, c'est parce qu'on a besoin de toutes ces approches pour prendre des décisions de gestion. Il est exclu de se reposer sur un seul modèle. L'ensemble de la démarche à laquelle on est invité, c'est donc d'observer pour comprendre, simuler, tester les effets de scénarios de climat et de scénarios de gestion, pour pouvoir agir au final.

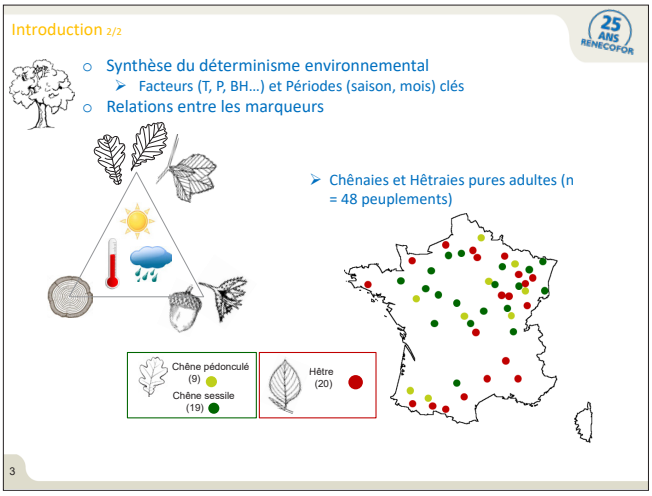
Merci à nos orateurs d'apporter leur éclairage sur la question de la réponse des espèces au climat.

LES RÉPONSES OBSERVÉES DES ARBRES AUX VARIATIONS DU CLIMAT (CROISSANCE, PHÉNOLOGIE FOLIAIRE ET FRUCTIFICATION)

François Lebourgeois
AgroParisTech, Laboratoire des ressources Forêts-Bois

Nicolas Delpierre
Université Paris Sud, Laboratoire Écologie Systématique et Évolution



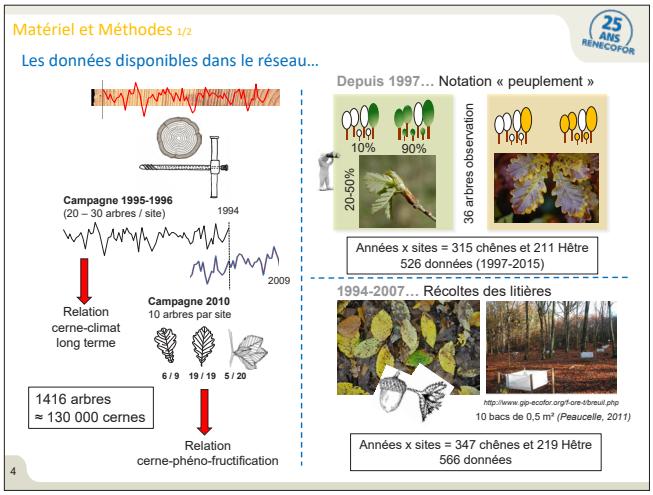


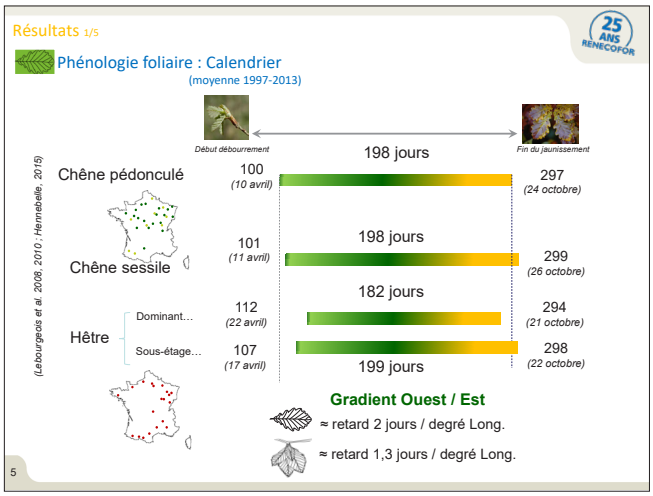
Comme vient de l'indiquer Myriam Legay, la démarche générale est d'abord d'observer, pour comprendre les mécanismes puis simuler les effets des évolutions climatiques. Je vais donc vous parler des réponses observées des arbres aux variations du climat. Cet exposé a été préparé avec Nicolas Delpierre et d'autres contributeurs dont vous voyez ici les noms.

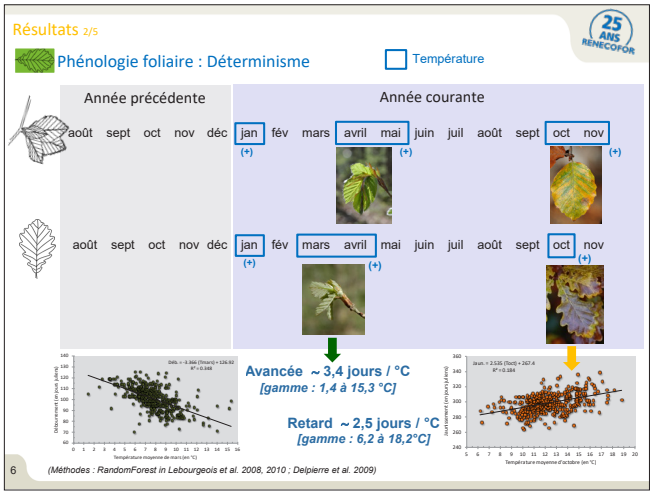
Évaluer et comparer les réponses au climat des différents aspects du fonctionnement des arbres

Quand on travaille sur les écosystèmes forestiers et les arbres, on a différents marqueurs des effets de l'environnement. Le premier, c'est la croissance radiale, le cerne annuel : le fonctionnement saisonnier des arbres est tel qu'en étudiant la croissance on peut étudier l'effet des paramètres environnementaux. Le deuxième marqueur, c'est la phénologie foliaire, à travers des dates de débourrement et des dates de sénescence. Et le troisième marqueur dont on dispose c'est la fructification, exprimée en données de biomasse ou de quantité de fruits.
On a la chance extraordinaire, dans le réseau RENECOFOR, d'avoir l'ensemble de ces données depuis de nombreuses années, grâce à quoi on peut étudier le déterminisme environnemental de l'ensemble de ces marqueurs. On peut les étudier isolément (ils dépendent du climat, du temps qui fait, de la température, des pluies, etc.) et on peut aussi essayer de mettre en évidence les relations qu'il peut y avoir entre eux.

L'objectif de cette présentation, c'est de proposer une synthèse du déterminisme environnemental de ces différents marqueurs en essayant de dégager les facteurs-clés, les périodes-clés (la saisonnalité de ces variations) et de trouver des relations entre les différents facteurs.
Je me limiterai, faute de temps, aux résultats qui concernent les peuplements feuillus du réseau, hêtraies et chênaies, soit 20 peuplements de hêtre et 28 peuplements de chênes, donc 48 peuplements.







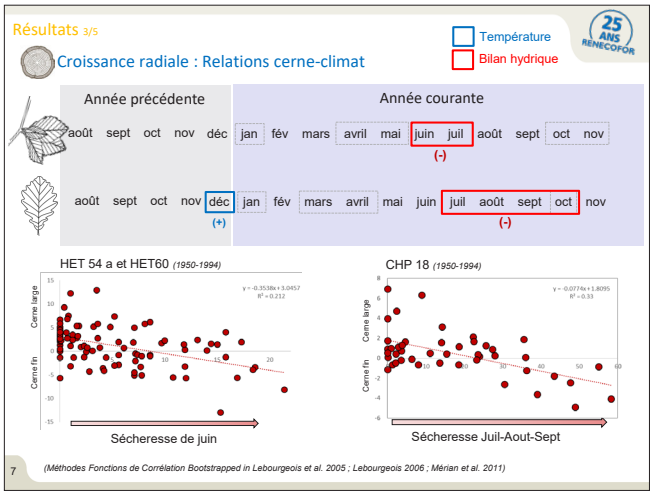
Les sources de données RENECOFOR

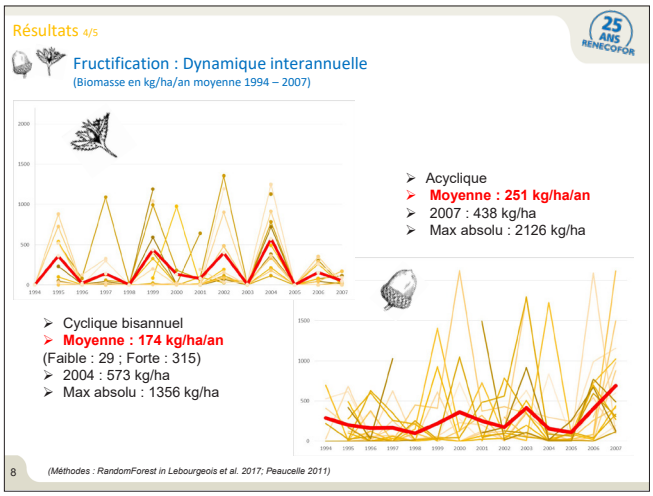
En ce qui concerne la croissance radiale, on dispose de deux jeux de mesures : une première campagne dans les années 90, qui a permis d'étudier les relations cerne-climat sur de larges échelles et une deuxième campagne de carottages en 2010 qui a permis plus précisément d'étudier les relations entre les cernes, la phénologie et les fructifications. Ce qui donne un pool de données d'à peu près 1 500 arbres et 130 000 cernes. L'analyse est donc basée sur un nombre important de données.
Pour la phénologie, les correspondants du réseau font depuis 1997 des notations de peuplements indiquant le stade observé et le pourcentage d'arbres présentant ce stade. Sont ainsi notés le débourrement et le jaunissement. Donc si on associe les observations années et sites, on dispose d'environ 600 données, ce qui est déjà énorme par rapport à ce qu'on peut avoir dans d'autres types de réseaux. Enfin les données de fructification sont issues de la récolte des litières ; là encore, ça fait à peu près 600 données en couplant année et site.
C'est à partir de ces données que nous avons obtenu les résultats que je vais vous présenter ; mais je ne vais pas du tout parler de la méthodologie ni des types d'analyses.

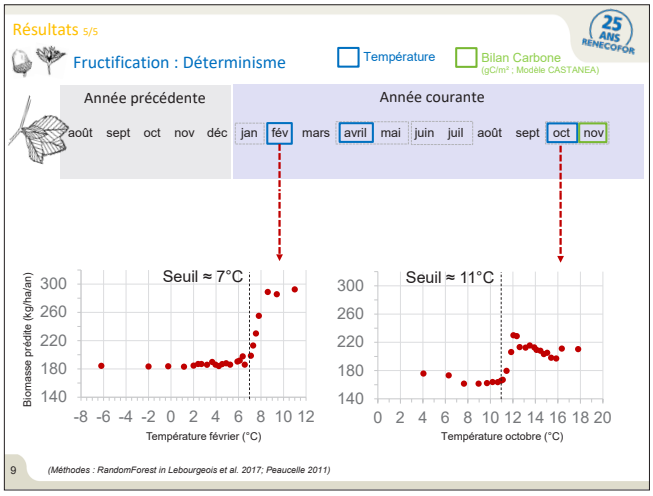
Que savons-nous maintenant de la variation et du déterminisme de ces marqueurs environnementaux ?

Commençons par ce qui concerne la **phénologie** foliaire : la variabilité et le calendrier phénologique. Globalement, en moyenne sur la période (1997-2013), la saison de végétation dans les chênaies dure environ 200 jours avec un débourrement mi-avril et une sénescence (avec jaunissement complet) fin octobre. La saison de végétation des hêtraies est un peu plus courte, de l'ordre de 20 jours. Dans le détail, on observe aussi des gradients très marqués entre l'ouest et l'est de la France, avec des variations de l'ordre de 2 jours par degré de longitude pour les chênes et de 1,3 jour par degré de longitude pour les hêtres. Donc un débourrement qui est d'autant plus retardé qu'on est dans l'Est de la France.

Essayons maintenant de comprendre le déterminisme environnemental de la phénologie, en examinant les conditions climatiques de l'année précédente et l'année courante. Il s'avère que la phénologie foliaire dépend très fortement du régime thermique. Pour les hêtres, les périodes clés sont centrées sur ce qui se passe en janvier, puis en avril-mai de l'année courante, avec un effet positif des températures ; pour la sénescence, c'est plutôt ce qui se passe en octobre-novembre (rien de très original). Chez les chênaies, on voit aussi un effet de ce qui se passe hors saison de végétation, au mois de janvier, mais le déterminisme du débourrement est plutôt lié à ce qui se passe en mars-avril : si on fait une régression simple entre la température de mars et la date du débourrement, on a globalement 3,4 jours d'avancée pour une augmentation de 1 °C. Concernant la sénescence, on a également un effet des températures d'octobre et là, si on fait la corrélation très simple entre la température d'octobre et la sénescence, on remarque qu'il y a un retard de 2,5 jours par degré.



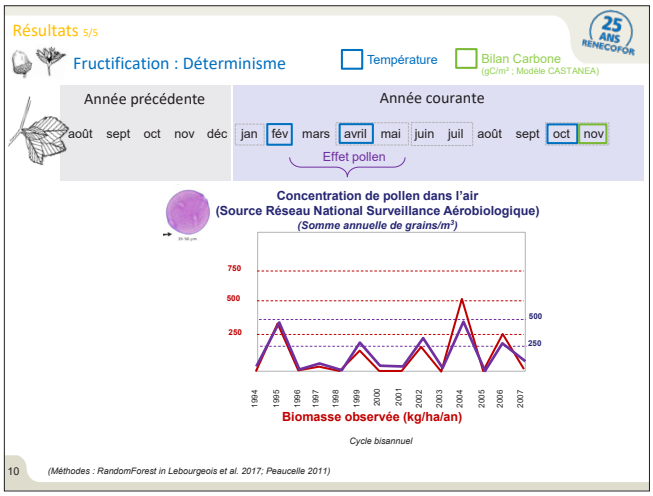


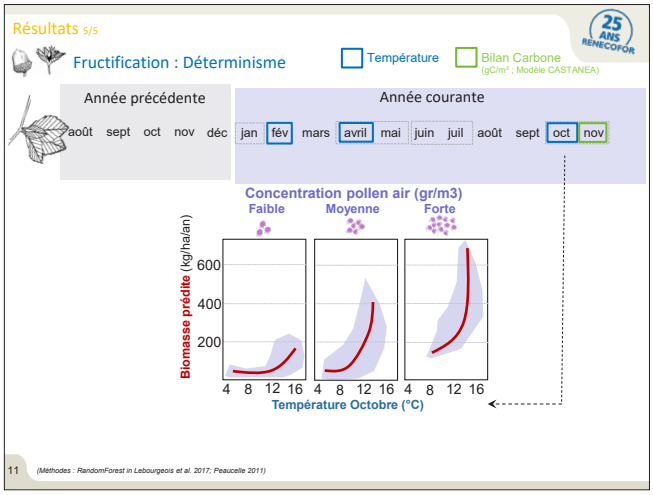


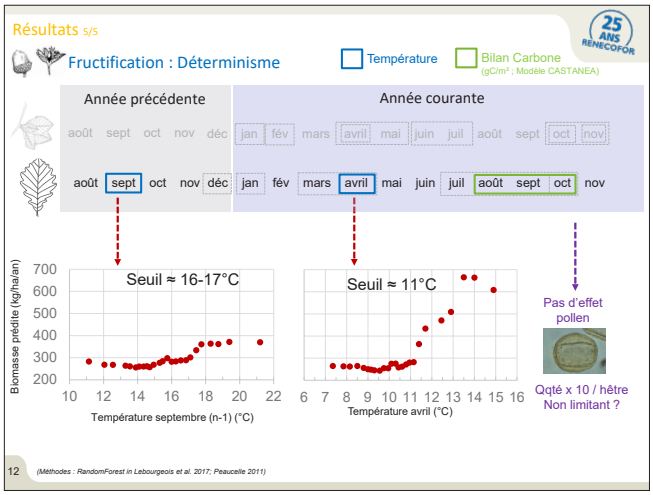
Passons aux résultats sur **la croissance radiale**…
J'ai laissé en grisé les périodes clés pour le marqueur précédent (la phénologie).
Pour le hêtre, c'est facile : la variabilité de la croissance radiale des hêtraies est essentiellement liée à la sécheresse et donc au bilan hydrique de début d'été, juin-juillet. C'est-à-dire que des sécheresses en juin et en juillet vont aboutir à la mise en place d'un cerne fin.
Pour les chênaies, les modèles sont plus compliqués, moins explicatifs et surtout on observe une plus grande variabilité du déterminisme des variations de croissance radiale. Globalement la variation de la croissance radiale est liée au déficit hydrique sur l'ensemble de la saison (juillet, août, septembre et jusqu'à octobre). Là encore, des sécheresses importantes en période estivale aboutissent à une réduction de croissance. On observe aussi très souvent en chênaie des effets thermiques hors saison de végétation, donc en période hivernale.

Venons-en à **la fructification**, avec des résultats assez originaux. Concernant la dynamique interannuelle, d'abord. On observe, sur la fructification des hêtraies du réseau RENECOFOR, un cycle bisannuel très net avec une forte fructification tous les 2 ans ; la production moyenne de faines est d'environ 180 kg par hectare et par an avec une très forte variabilité entre les années, et un maximum de presque 600 kg/ha en moyenne en 2004 (donc après la sécheresse de 2003). Le maximum absolu observé est de l'ordre de 1400 kg/ha.
Chez le chêne, c'est totalement différent. La production de glands est très variable d'une année sur l'autre et d'un peuplement à l'autre ; aucune cyclicité n'est visible. En moyenne, la production de glands est à peu près de 250 kg par hectare et par an, mais là encore c'est très variable. On peut avoir une année où il n'y a quasiment pas de glands, suivie par des années de forte fructification. L'année record a été l'année 2007 : c'était une année avec un printemps extraordinaire caractérisé par des températures très élevées. Le maximum absolu est de 2 tonnes/ha.
En résumé pour la dynamique interannuelle de fructification, les deux espèces ont des traits très différents.

Pour ce qui est du déterminisme, je reviens à mon schéma global où j'ai laissé en grisé ce qu'on a observé précédemment. Le déterminisme de la fructification est essentiellement lié à la température. Dans les modèles on a aussi pris en compte des sorties de bilan carbone, c'est-à-dire des grammes de carbone fixé par m² de sol (issus d'un modèle spécifique), pour voir si ça jouait sur la biomasse ou la quantité de fruits récoltés.
Sur les hêtraies, on observe que le déterminisme de la fructification est d'abord très lié aux conditions thermiques de 3 périodes : période hivernale (février) puis avril et octobre. Mais on voit aussi un effet important du bilan carbone pour le mois de novembre : plus la hêtraie fixe de carbone pendant cette période, plus la biomasse de fruits est importante. Les modèles utilisés permettent de mettre en évidence des effets-seuil ; c'est-à-dire qu'on est capable de dire à partir de quand le paramètre joue très fortement. Prenons comme exemple la température de février : on observe que, quand la température de février est supérieure à 7 °C, la capacité prédictive des modèles est fortement augmentée, avec un saut très important de qualité de prédiction. Même chose pour la température d'octobre, avec un seuil autour de 11 °C. Sur les graphiques, avec en abscisse la température et en ordonnée la biomasse prédite par les modèles, on voit bien ces effets seuil sur la prédiction de ces paramètres environnementaux.



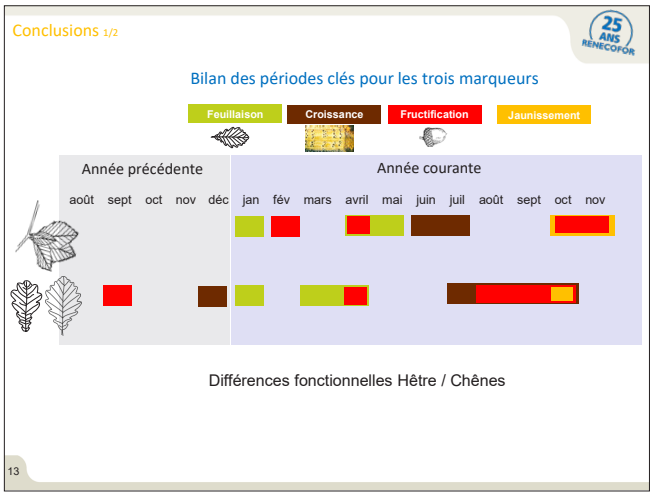


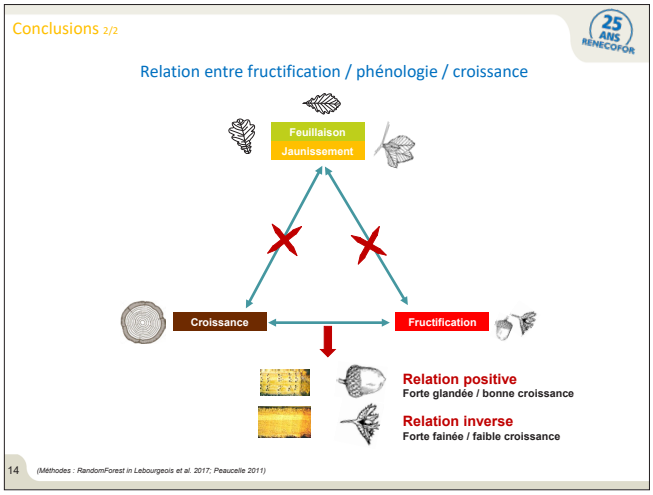


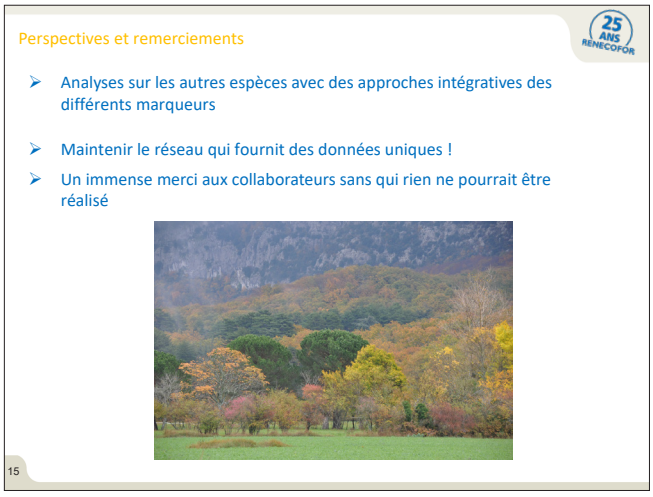
Par ailleurs, Nicolas Delpierre s'est dit que la fructification doit dépendre aussi un peu du pollen. Comme on a la chance d'avoir en France un réseau national de surveillance aérobiologique qui récolte des grains de pollen, nous avons introduit dans nos modèles une variable quantité de pollen. Je passe sur les détails, et je vous montre ici la courbe de concentration de pollen de hêtre observée dans l'air pour les années correspondant aux données de fructification (en violet). On y voit le même rythme bisannuel que pour la fructification, avec des variations, et si on superpose avec la biomasse observée (en rouge), on a un parallélisme frappant entre la quantité de pollen observée et la fructification (biomasse ou quantité). C'est donc un paramètre qui marche très bien et qui s'avère être le paramètre essentiel pour expliquer le déterminisme de la fructification.

Et là aussi on peut mettre en évidence des effets seuil. Ce graphique représente en ordonnée la biomasse prédite par le modèle et en abscisse la température du mois d'octobre, en fonction de la concentration observée en pollen dans l'air (faible, moyenne ou forte). Pour les faibles concentrations, quelles que soient les conditions d'octobre, la biomasse prédite par le modèle sera faible. Pour des concentrations de pollen moyennes (graphique du milieu), l'effet seuil de la température d'octobre (11°) sur la fructification s'exprime nettement : plus il y a de pollen, plus l'effet seuil de la température est important. Pour les fortes concentrations de pollen et les températures d'octobre élevées, on aura des fructifications très importantes.
Il y a donc une relation étroite entre les différents paramètres et le type d'analyse qu'on a fait permet de mettre en évidence ce genre de chose.

Dans le cas des chênaies, on retrouve, comme pour la croissance, un effet des paramètres de l'année précédente (septembre) et des conditions du mois d'avril sur la fructification. On voit aussi que le bilan carbone de fin de saison interagit fortement sur la biomasse ou la quantité de glands produits.
Pour la température du mois de septembre de l'année précédente on observe un seuil autour de 16-17 °C, avec un effet qui n'est pas énorme mais tout de même très significatif. Par contre, pour la température d'avril de l'année courante, on a un seuil autour de 11 °C avec un effet très fort sur la production de glands. C'est-à-dire que les années de printemps chaud vont donner des glandées abondantes.
Nous avons aussi exploré l'effet du pollen mais, contrairement au cas du hêtre, nous n'avons pu mettre en évidence aucun effet pollen chez le chêne. Il se trouve que la quantité de pollen récoltée au niveau du suivi aérobiologique est beaucoup plus importante (x10) pour le chêne que pour le hêtre ; nous émettons donc l'hypothèse que le pollen ne serait pas limitant pour le chêne. Mais ça reste à discuter ; peut-être y a-t-il d'autres explications, peut-être que nos modèles ne sont pas bons sur cet aspect.







Faisons le bilan

J'ai récapitulé en vert ce qui agit sur la feuillaison, en marron ce qui agit sur la croissance, en rouge sur la fructification et en jaune sur le jaunissement : le schéma qui en ressort est assez différent entre les hêtraies et les chênaies. Pour les hêtraies, le déterminisme lié à l'ensemble de ces facteurs environnementaux réside essentiellement dans l'année en cours, alors que pour les chênaies il y a un certain nombre d'arrière-effets de l'année précédente qui vont jouer sur la croissance ou la fructification. Donc on a un déterminisme assez différent, avec des périodes-clés différentes. Ces deux espèces vont donc fonctionner différemment, c'est à peu près clair maintenant.

Pour finir, parlons des relations entre fructification, phénologie et croissance. Nous n'avons pas réussi à mettre en évidence de relation entre croissance phénologie foliaire, ni entre phénologie foliaire et fructification. Par contre, nous constatons une relation entre croissance et biomasse des fruits. Cette relation est positive dans les chênaies, c'est-à-dire que les années à forte glandée sont aussi des années à forte croissance. Mais dans les hêtraies la relation est inverse, c'est-à-dire que les années à forte croissance sont des années de faible fainée et, inversement, quand la fainée est importante, la croissance est faible.

Il me reste dire ce que je pense du réseau RENECOFOR

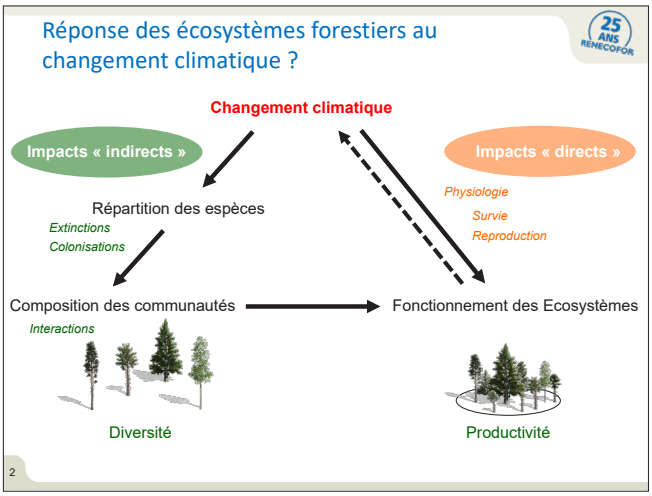
J'étais là presque au début du réseau et, en un mot, RENECOFOR m'a permis de faire ma carrière scientifique : 90% de mes travaux de recherche depuis 25 ans, je les ai faits dans le cadre du réseau RENECOFOR, et je l'en remercie. Au-delà de mon cas personnel, il est pour moi essentiel de maintenir ce réseau qui marche bien, depuis très longtemps, et qui fournit des données uniques. J'ajoute, comme je le dis souvent à mes étudiants, que « tout seul on va plus vite, mais ensemble on va plus loin » : je pense très sincèrement que sans vous, les observateurs, nous les scientifiques ne pourrions pas avancer. Beaucoup de scientifiques et moi en particulier. Je tenais donc à vous en remercier.

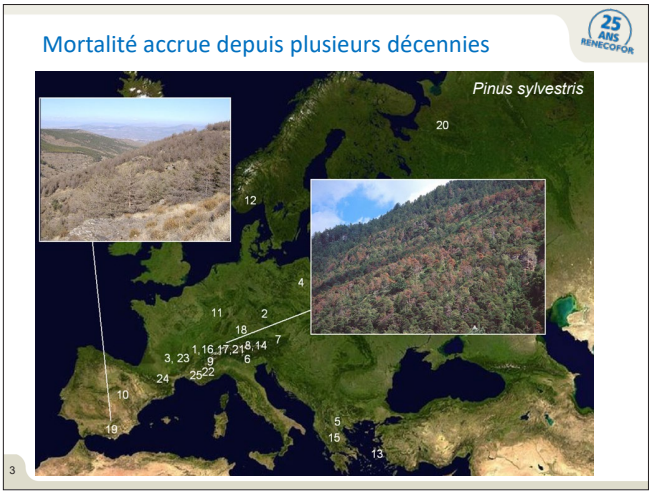
Photo : INRA

Les débuts de F. Lebourgeois avec RENECOFOR (étude dendrochronologique, 1996)

MIEUX COMPRENDRE LES PROCESSUS D'INFLUENCE DU CLIMAT SUR LES ARBRES POUR ANTICIPER LES EFFETS DE SON ÉVOLUTION SUR LA COMPOSITION ET SUR LE FONCTIONNEMENT DES FORÊTS

Xavier Morin
Isabelle Chuine
CNRS, Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive



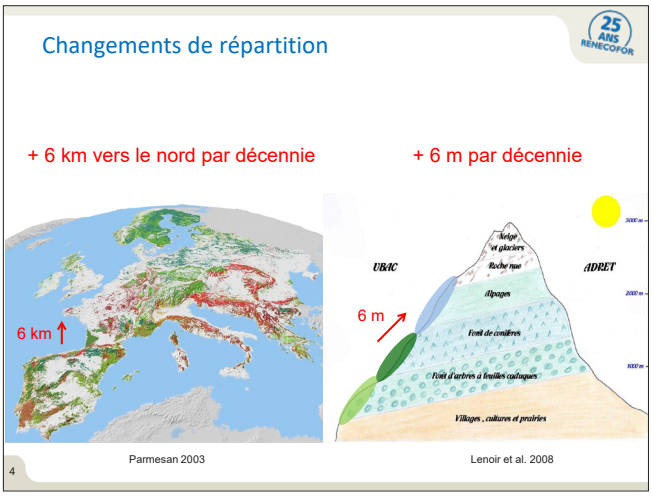


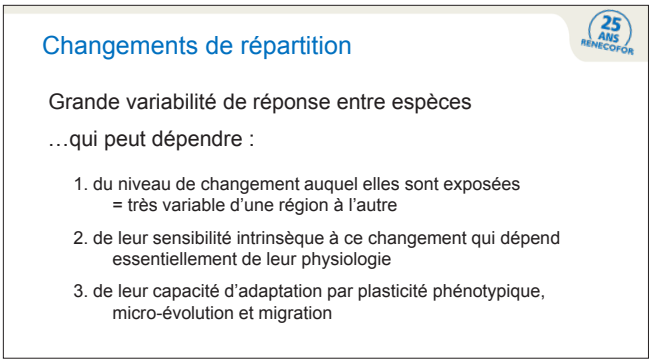
Je suis content d'intervenir juste après François Lebourgeois, parce que ça me permet de simplement dézoomer un peu, pour passer de la réponse des arbres à celle des forêts, en termes de composition.

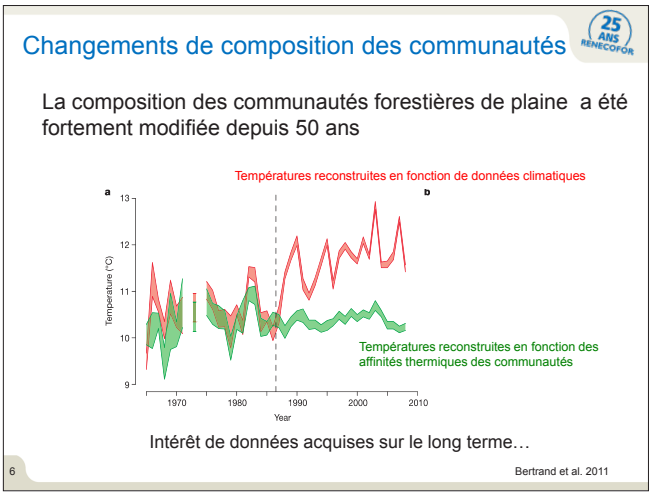
Les impacts directs et indirects du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes

Nous venons de voir que l'analyse des données du réseau RENECOFOR permet d'approcher l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers en général et en particulier sur les changements au niveau de la physiologie, la croissance et la reproduction notamment. C'est ce que j'appelle les **impacts directs** du changement climatique sur les forêts.
De façon un peu artificielle on peut aussi voir une autre famille d'impacts, **les impacts indirects**, qui portent plutôt sur l'aspect composition, diversité de ces écosystèmes forestiers. On sait que le changement climatique agit sur la répartition des essences forestières, avec des extinctions locales qui, dans l'hémisphère nord, surviennent plutôt au sud de l'aire actuelle de répartition, et des événements de colonisation plutôt au nord (ou en haute altitude). Ces changements de répartition ont des impacts à l'échelle plus locale sur la composition des communautés, et ensuite sur les interactions entre espèces et individus au sein de ces communautés.
De plus, on sait qu'il y a un lien fort entre la composition des communautés et le fonctionnement des écosystèmes ; c'est très étudié depuis 15 ou 20 ans, pour savoir par exemple si des forêts mélangées sont plus ou moins productives que les forêts pures. Ça permet de boucler la boucle avec un effet possible de ce que j'appelle les impacts indirects du changement climatique (dans la partie gauche du diagramme) sur le fonctionnement des écosystèmes (à droite).

Je ne m'étends pas sur les impacts directs, relatifs à la croissance, la survie, la phénologie, la fructification… et dont François Lebourgeois vient de parler. Mais je complète en signalant les impacts sur la mortalité. Il y a de nombreux exemples, notamment en France, d'événements de mortalité accrue sur des essences forestières. Voici un exemple extrait d'une synthèse bibliographique ou d'une méta-analyse datant d'il y a 7 ans, qui montrait pour le pin sylvestre différents événements de mort à l'échelle des populations, aussi bien au niveau latitudinal (au sud de l'Espagne) que sur une dynamique altitudinale (dans la vallée du Valais en Suisse). Ce qui nous amène aux impacts indirects, car ces événements de mortalité accrue induisent des changements de répartition.







On observe depuis plusieurs décennies un décalage vers le Nord des répartitions des espèces, arbres compris, de l'ordre de 6 km par décennie (selon une méta-analyse regroupant divers organismes). Je n'ai mis en guise d'illustration que la carte des différents types forestiers européens, mais il y a des études qui montrent très concrètement des événements de colonisation et de changements de répartition, en Scandinavie notamment. En parallèle, on observe également des changements de répartition altitudinale. Voir par exemple l'étude coordonnée par Jonathan Lenoir pour les forêts de montagne françaises, sur la remontée altitudinale de l'optimum de répartition des espèces forestières (dont les arbres, mais pas seulement).

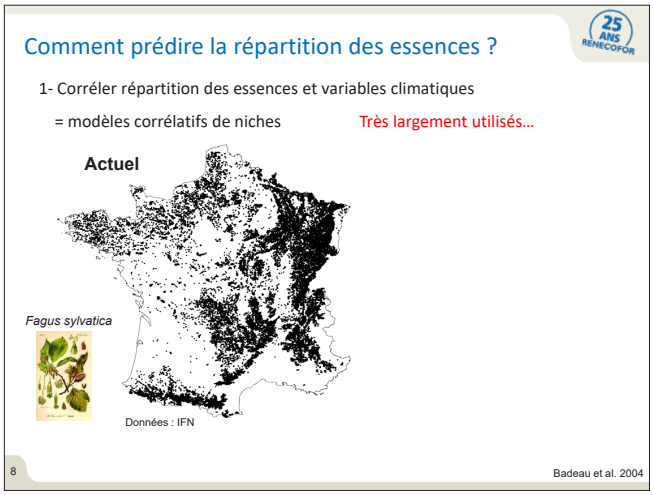
Ces changements de répartition se caractérisent évidemment par une grande variabilité de réponse. Variabilité qui peut dépendre du niveau de changement auquel sont confrontées les essences, car toutes les régions ne sont pas égales face au réchauffement climatique ou à l'augmentation des événements de sécheresse. Mais les espèces ne sont pas non plus égales dans leur réponse au changement climatique : la sensibilité varie entre les espèces ou même au sein de chaque espèce, ce qui joue sur leurs capacités d'adaptation, par la plasticité ou par évolution génétique. Je n'ai hélas pas le temps de détailler.

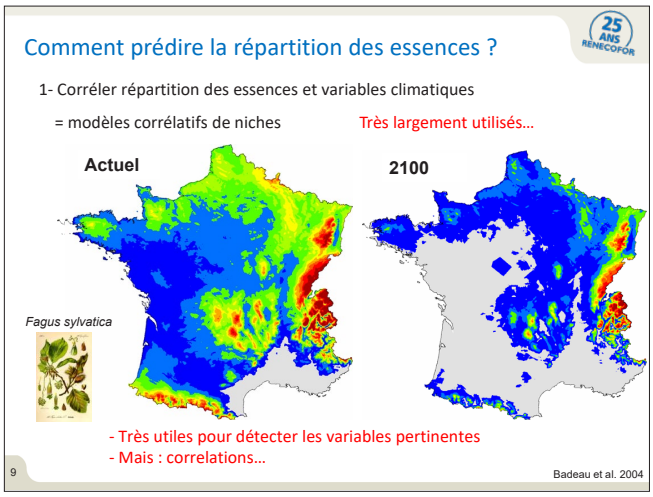
Il y a donc des changements de répartition avérés mais variables, en réponse (entre autres) au changement climatique, qui se traduisent en conséquence par des changements de composition des communautés. Et ces recompositions se font à une vitesse qui elle-même varie, notamment, selon qu'on est en plaine ou en montagne. C'est ce que montre une étude pilotée par Romain Bertrand qui compare l'évolution au cours du temps de la température observée et de la température bio-indiquée par les suivis floristiques en forêt : on voit sur le graphe qu'en plaine les communautés peinent à se recomposer et accusent un décalage avec les températures observées (alors qu'en montagne les deux courbes restent assez cohérentes).

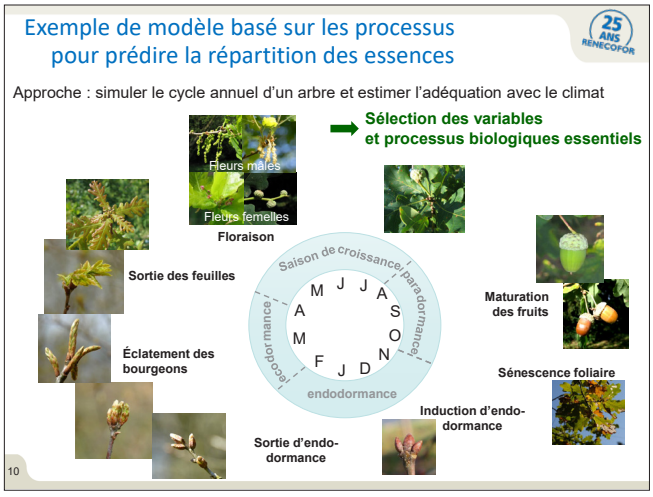
En fil rouge, ici comme dans la suite de la présentation, je signale l'intérêt des données acquises sur le long terme. Même si je ne présente pas des analyses faites avec les données du réseau RENECOFOR, il est utile de pointer les cas pour lesquels ce genre de données est irremplaçable.

Cascade des impacts : comment prédire pour anticiper la réponse des écosystèmes ?

Faute de pouvoir tout traiter, je vais me focaliser sur deux grandes questions : tout d'abord, à l'échelle régionale, comment prédire le changement de répartition des espèces en réponse au changement climatique ? Et ensuite, à l'échelle locale, comment peut-on essayer d'étudier l'effet du changement de composition sous l'angle de l'adaptation des forêts au changement climatique ? C'est-à-dire en gros : le mélange d'essences forestières pourrait-il être plus résistant que, par exemple, des forêts monospécifiques ?
Autant que faire se peut, je présenterai des approches dites (de façon un peu présomptueuse) mécanistes, ou du moins j'essaierai d'intégrer le plus possible dans les approches la compréhension des mécanismes qui sous-tendent les réponses des espèces et des communautés au changement climatique.







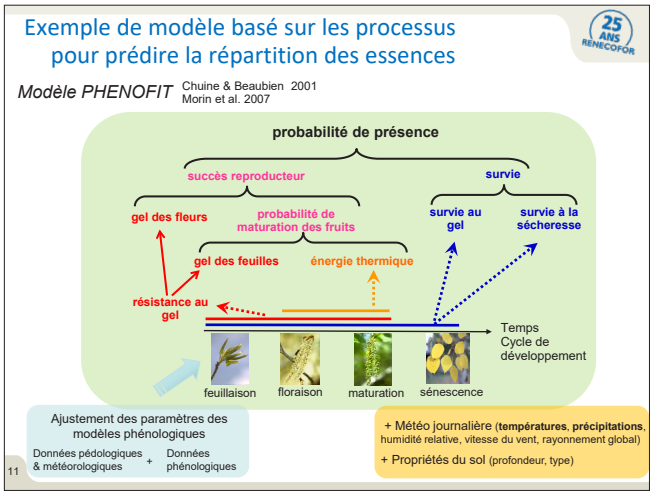
Échelle régionale : prédire la répartition des essences

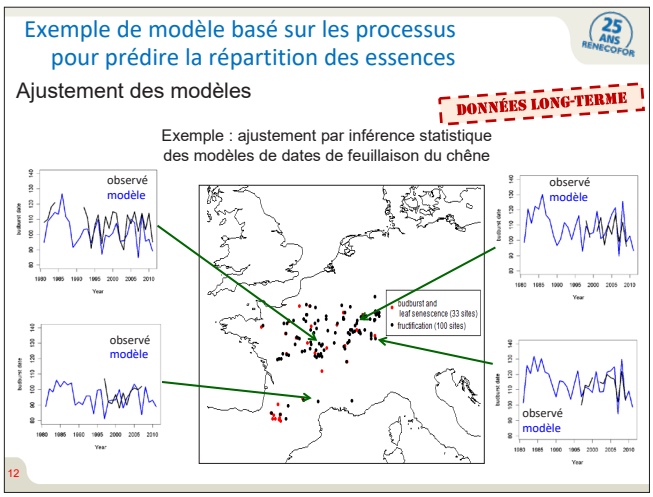
Je commence donc par le problème de la prédiction des changements de répartition. La démarche la plus utilisée actuellement, à la fois pour essayer de comprendre le déterminisme climatique de la répartition des espèces et leur réponse au changement climatique, utilise ce qu'on appelle des modèles corrélatifs de niche.
L'exemple que je présente ici vient d'une étude bien connue de Vincent Badeau, qui est présent dans la salle. On part des données de l'inventaire (IFN), en l'occurrence celles du hêtre. Ce sont des données de présence/absence, qu'on peut très bien mettre en relation avec des données climatiques, ce qui permet d'obtenir une carte d'affinités climatiques de l'espèce en fonction de sa présence ou de son absence.

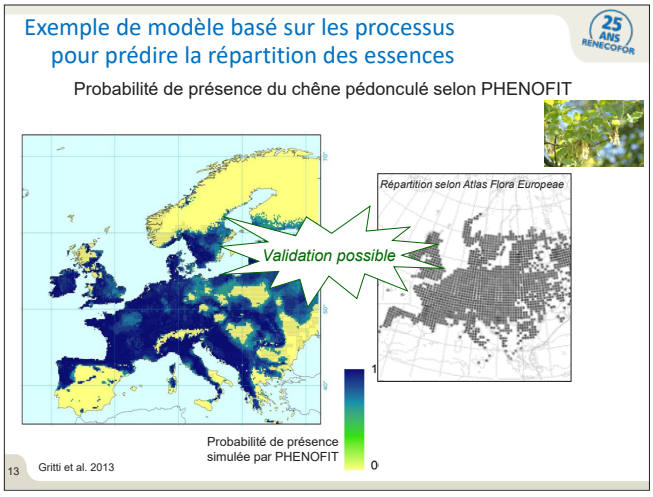
En utilisant les données des scénarios de changement climatique, on peut projeter, par exemple à la fin du siècle actuel, la répartition attendue (la répartition future du hêtre) si on garde dans le temps ce même lien entre présence et affinités climatiques.
Cette approche a un gros avantage, c'est de pouvoir être développée pour un grand nombre d'espèces, parce qu'on a simplement besoin de répartitions fiables et de données climatiques. Et elle est très utile pour essayer de détecter les variables pertinentes et commencer à comprendre à quels mécanismes les espèces sont particulièrement sensibles, vis-à-vis de leur répartition. Mais il ne s'agit que de corrélations et on peut donc s'interroger : la corrélation qu'on observe aujourd'hui sera-t-elle conservée telle quelle dans le temps ?

Pour essayer de se départir de cette corrélation, on peut adopter une approche complémentaire, qui consiste à essayer de comprendre les mécanismes à déterminisme climatique qui peuvent jouer sur la répartition des espèces. Je vais présenter brièvement un modèle, développé à l'origine par Isabelle Chuine, qui recourt à cette approche en prenant l'angle de la phénologie (modèle Phénofit). L'idée est de se dire que si une espèce peut être présente en un site donné, c'est parce que les conditions climatiques lui permettent de survivre, d'abord, puis de réaliser un cycle de vie complet : développer des feuilles, faire des fleurs, des fruits et produire des graines viables.

Il s'agit donc de reproduire le cycle de vie annuel d'un arbre, en fonction du climat. Et pour cela, on a besoin de données qui permettent de sélectionner des variables pertinentes pour reproduire ces mécanismes, en l'occurrence phénologiques, et aussi de sélectionner les processus biologiques essentiels qui sous-tendent ce cycle.







Le cycle de vie annuel de l'arbre est à la base du modèle avec, pour chaque événement phénologique, un modèle sous-jacent qui dépend du climat. À partir de la simulation de ce cycle biologique, le modèle va estimer la survie d'un arbre moyen (ici au gel et à la sécheresse). Mais surtout les modèles phénologiques vont servir à estimer à la fois la possibilité pour l'arbre de faire des feuilles et les dommages infligés à ces feuilles au cours de l'année, notamment par le gel ; même chose pour les fleurs ou les fruits. Ensuite on simule la maturation des fruits en fonction de la machinerie disponible au niveau de l'arbre et de l'énergie thermique due au climat. Tout ça pour estimer au final un succès reproducteur. La dernière étape fait intervenir une notion d'écologie évolutive, à savoir la valeur sélective ou fitness, c'est-à-dire le produit du succès reproducteur et de la survie, qui permet d'estimer une probabilité de présence d'une espèce donnée en un site donné, caractérisé en l'occurrence par son climat et ses conditions de sol.

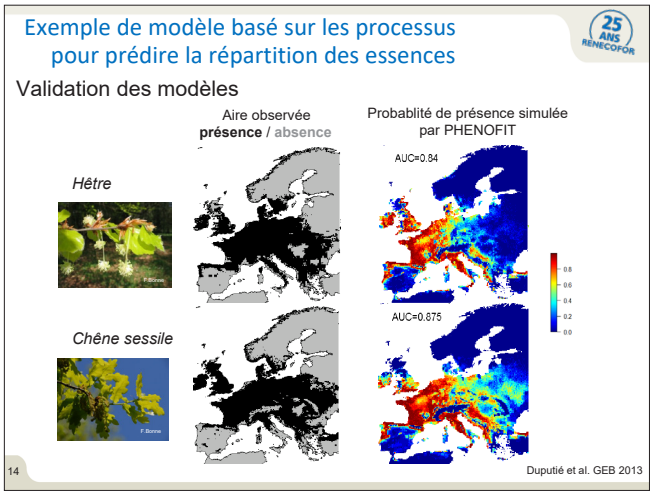
Le nerf de la guerre, c'est d'ajuster les paramètres de ces modèles phénologiques, chose qui n'est possible qu'avec de longues séries de données phénologiques et d'autres types de données (climatiques et pédologiques dans notre cas).

Voici un exemple d'ajustement de ces modèles. Il s'agit du chêne pédonculé, je crois. La carte montre l'ensemble de sites pour lesquels nous avons des séries d'observations de dates phénologiques, en l'occurrence pour la feuillaison, et typiquement les placettes RENECOFOR en font partie. L'objectif est de calibrer les paramètres des modèles phénologiques au niveau de chaque site, donc de chaque climat local, avant de les rentrer ensuite dans le modèle phénofit pour prédire les aires de répartition. Là encore, ce n'est possible qu'en ayant de longues séries temporelles d'observations phénologiques.

Voilà un exemple de sortie pour le chêne pédonculé (carte de gauche) : celle des probabilités de présence, entre 0 et 1, en l'occurrence sur une grille climatique européenne. On peut comparer, à droite, avec la répartition observée, même à une échelle assez grossière, de l'Atlas Flora Europeae. C'est un avantage de cette approche « mécaniste » : on peut vraiment la valider en comparant la répartition simulée avec l'observé, puisque l'observé n'est pas utilisé pour calibrer le modèle.

Photo : Luc Croisé, ONF

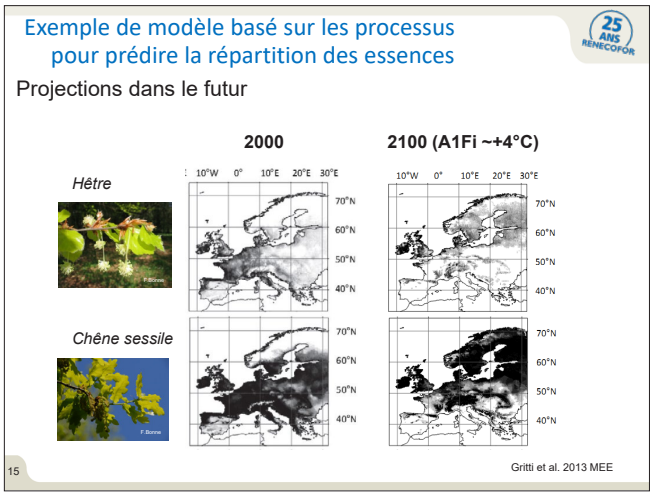
Chêne - phénologie de la feuillaison



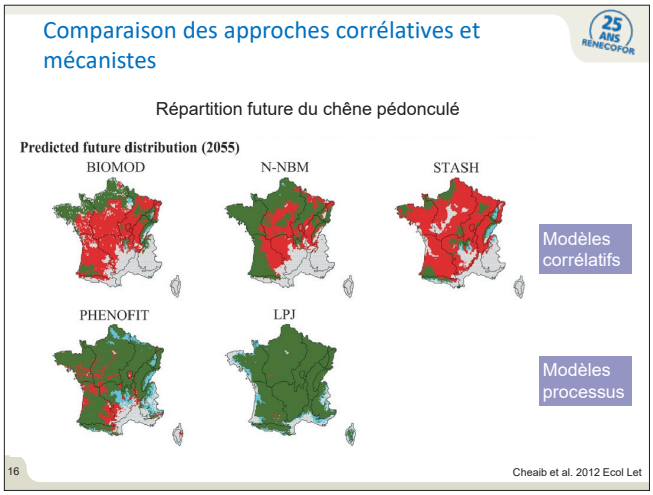
Le modèle PHENOFIT est calibré aujourd'hui pour presque une dizaine d'espèces forestières européennes. Par exemple ici, le hêtre et le chêne sessile avec, de la même façon, la répartition simulée (à droite) qui montre un assez fort accord avec l'aire observée (à gauche, en noir).

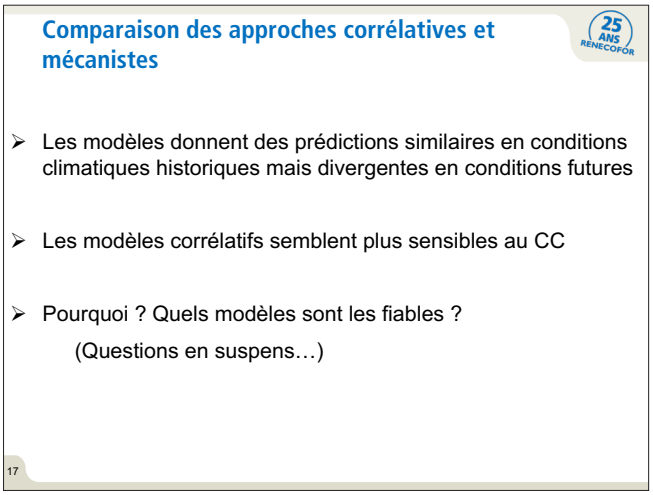
À partir de là, on peut simuler, en utilisant des données de modèles climatiques, des répartitions futures pour tel ou tel scénario climatique.

Ce qui est intéressant, bien sûr, c'est de comparer l'approche corrélative, qui est la plus utilisée (et la plus simple), avec des approches plus mécanistes comme PHENOFIT (en bas à gauche) ou un autre modèle, disons « hybride », qui s'appelle LPJ. On voit ici les différences de prédictions entre ces deux approches, pour le chêne pédonculé en 2055 (vert = aire viable conservée ; rouge = aire viable perdue ; bleu = aire viable nouvelle). Je ne détaille pas…



Ce qu'il faut simplement retenir c'est que globalement on arrive à des prédictions similaires, pour des simulations à l'échelle européenne, de perte de populations au sud de l'aire de répartition ou de colonisation au nord. Mais globalement les modèles corrélatifs sont plus sensibles, montrent plus de variations, que les modèles plus mécanistes. Reste l'éternelle question : ça ne nous renseigne pas sur ce qui serait l'approche est la plus fiable.





Échelle locale : modéliser le comportement des mélanges

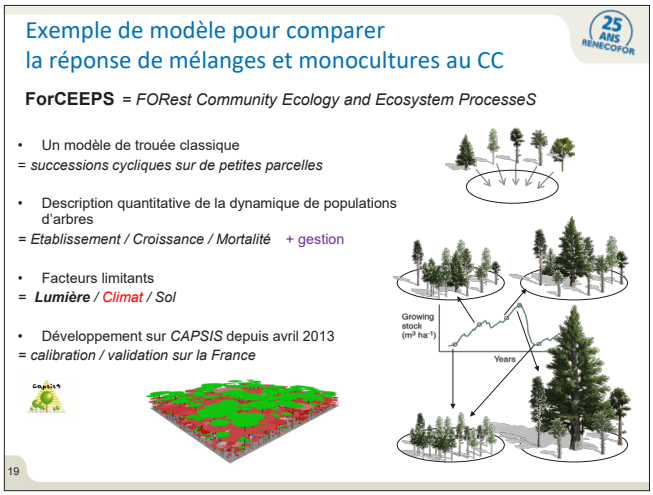
J'en arrive maintenant à la seconde grande question, à l'échelle locale cette fois : comment prendre en compte l'importance de la diversité pour le fonctionnement des écosystèmes en réponse au changement climatique ? Là encore on s'appuie sur des modèles.

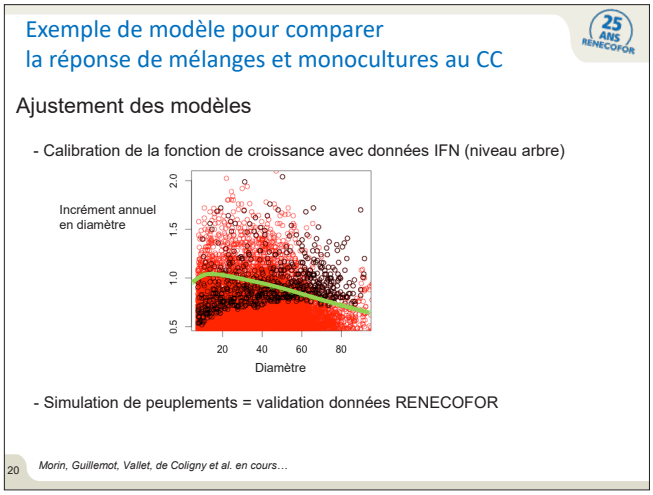
Il y a de nombreux types de modèles que j'appelle de communautés d'arbres (pour ne pas parler de dynamiques forestières), et qui prennent plus ou moins en compte les facteurs climatiques : courbes de production, modèles de peuplements, ou modèles individu-centrés…

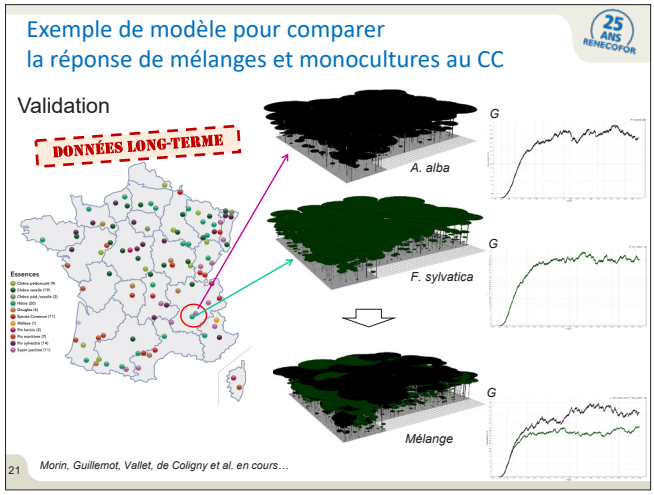
Je vais parler brièvement d'un modèle de type individu-centré, qui s'appelle ForCEEPS. Il découle du modèle ForClim sur lequel j'avais travaillé au cours d'un post-doctorat en Suisse. C'est un modèle qui permet de reproduire sur de petites parcelles l'établissement, la croissance et la mortalité des arbres - et plus récemment de prendre un peu plus en compte certaines mesures de gestion -, en fonction de facteurs limitants, notamment la lumière mais aussi le climat.

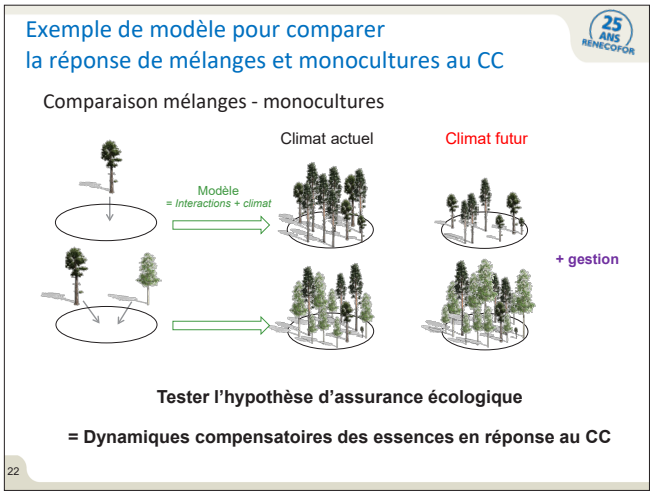
Nous sommes actuellement en train de calibrer et valider ce modèle sur la France, et j'insiste ici sur l'importance des données de l'IFN, qui nous ont permis d'avoir une plus grande gamme climatique que les données RENECOFOR pour la calibration de certains processus. Nous faisons aussi des simulations de peuplements sur différentes placettes, et notamment sur les placettes RENECOFOR, lesquelles sont utilisées en tant que placettes de validation.

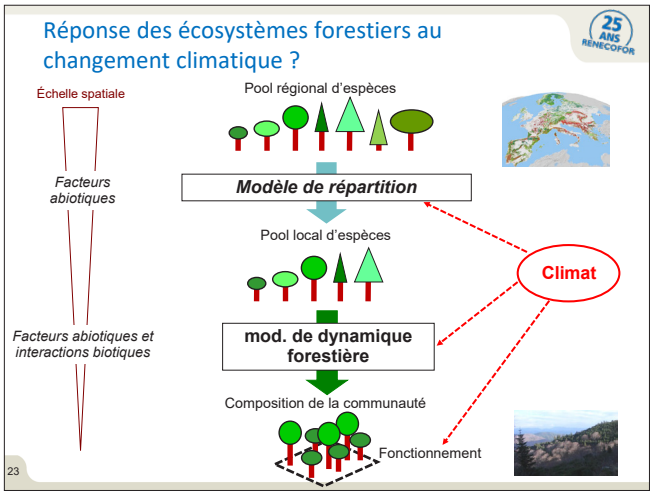
Dans la Drôme, par exemple, on peut comparer des peuplements purs et des peuplements mélangés de hêtre et sapin en validant les sorties de peuplement pur avec les placettes RENECOFOR et en faisant des tests sur un mélange théorique avec le modèle.
C'est hélas du travail encore en cours, mais je tiens encore à insister sur le fait que ça nécessite impérativement des données de long terme, parce qu'en gros, on a besoin d'un « avant » et d'un « après ».

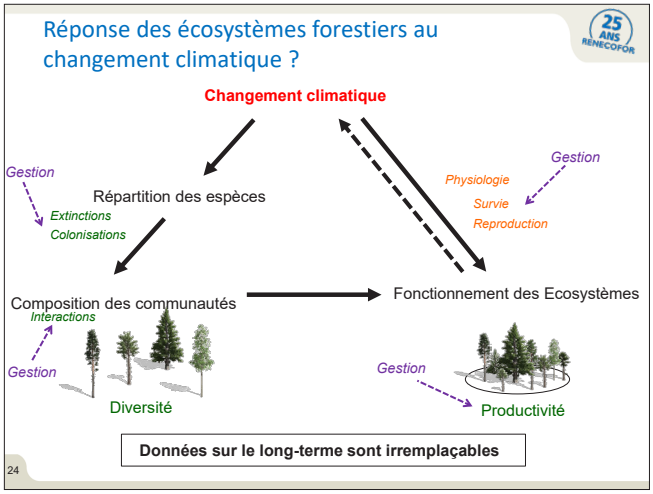












Ce qu'on cherche à tester ensuite c'est, par exemple, ce qu'on appelle l'hypothèse d'assurance écologique. Lorsqu'on a un mélange, y a-t-il une dynamique compensatoire entre les deux (ou trois) essences ? Autrement dit, est-ce que le mélange d'essences permet d'obtenir un fonctionnement minimal (par exemple un niveau de productivité) ou un fonctionnement plus stable dans le temps, par rapport à des peuplements purs ? Et cela, grâce à des différences de comportement entre les espèces face au climat ?

Il y a encore du boulot !

Reste enfin l'intérêt du couplage des deux approches : nourrir l'approche locale avec l'approche régionale.

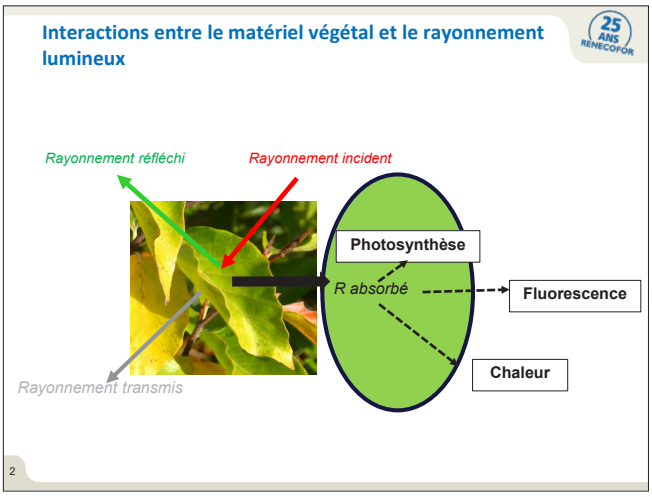
Mais là encore, c'est un travail en cours.

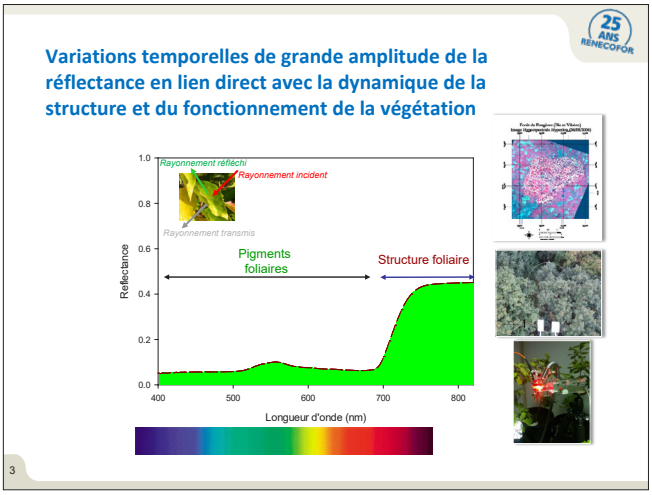
L'idée générale repose sur la complémentarité d'échelle des modèles de répartition d'espèces et des modèles de dynamique forestière. Les seconds considèrent un « pool » d'espèces pour simuler des communautés forestières et leur fonctionnement associé, en mettant en compétition des arbres des différentes espèces du pool, tout en simulant aussi l'effet des conditions abiotiques sur la régénération, croissance et mortalité des arbres. Ce pool d'espèces pourrait être fourni par les modèles de répartition, qui prédisent quelles espèces peuvent être potentiellement présentes dans un même site (en fonction du climat essentiellement), mais sans considérer les relations entre individus (compétition notamment).

Et j'en termine en soulignant la nécessaire prise en compte de la gestion dans cette cascade d'impacts. Ce qui, là encore, n'est possible qu'avec le genre de données que produit le réseau RENECOFOR. Un genre de données plus que jamais irremplaçable.

UTILISER LES DONNÉES D'OBSERVATION POUR TESTER DES OUTILS DE TÉLÉDÉTECTION : EXEMPLE DE LA DÉTECTION SATELLITAIRE DU DÉBOURREMENT ET DE LA SENESCENCE DES FEUILLES

Eric Dufrêne
Kamel Soudani
Université Paris Sud, Laboratoire Écologie Systématique et Évolution





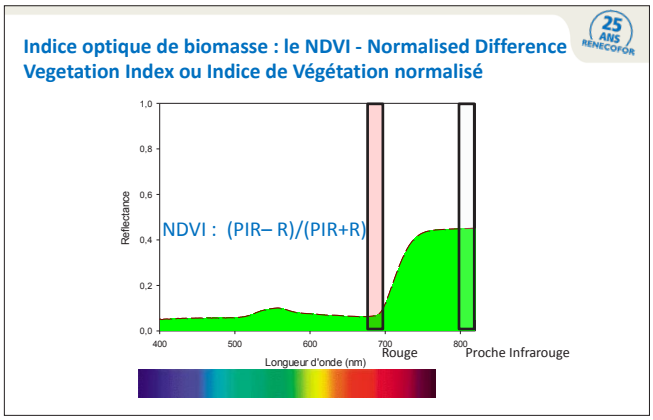
Je dois vous demander d'excuser mon collègue Kamel Soudani qui n'a pas pu venir, et d'être indulgent avec moi qui vais devoir présenter son exposé.

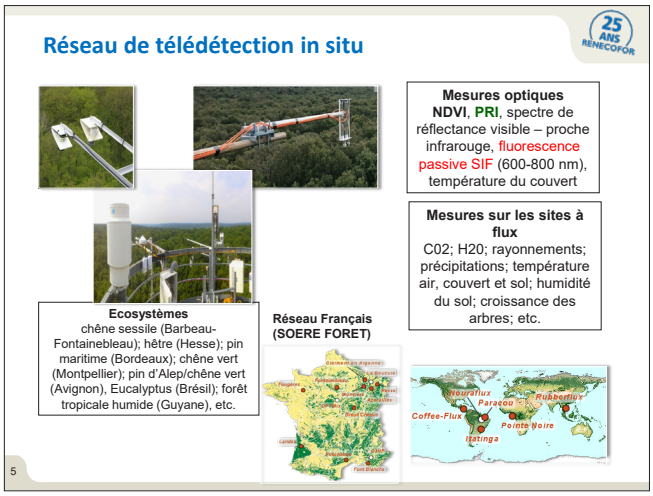
Nous allons parler de télédétection et voir comment on cherche à utiliser la télédétection, satellitaire ou rapprochée, pour avoir des informations sur la phénologie.

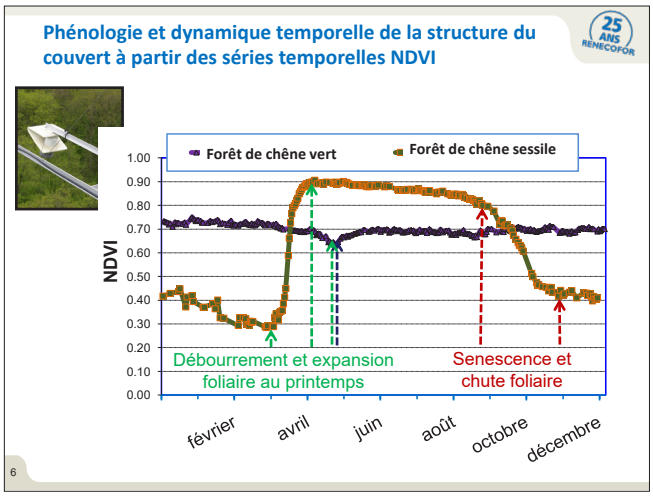
Principes méthodologiques

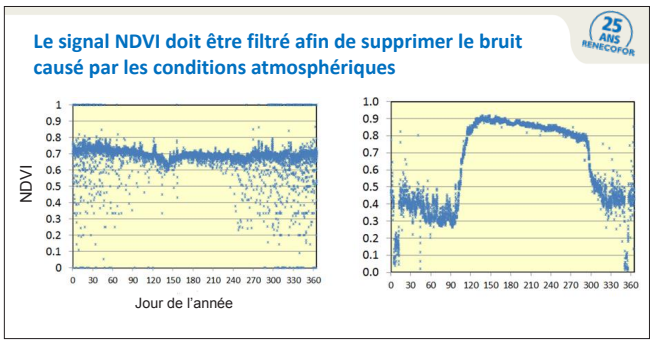
La télédétection, c'est juste une mesure à distance ; ça peut être à 1 mm ou beaucoup plus loin, comme avec les satellites.
Ce qui nous intéresse en l'occurrence, c'est essentiellement l'interaction entre le matériel végétal et le rayonnement lumineux. Que ce soit à l'échelle de la feuille ou à l'échelle de l'écosystème, le rayonnement incident qui arrive sur la végétation est en partie réfléchi, en partie transmis et en partie absorbé (par la feuille ou la canopée). Et le rayonnement absorbé a lui-même trois devenirs possibles : une part fournit l'énergie nécessaire à la photosynthèse, et le reste est réémis sous forme de rayonnement lumineux (de fluorescence, par exemple) ou sous forme de rayonnement thermique. J'ajoute au passage que ce rayonnement absorbé fait actuellement l'objet de beaucoup de développements de télédétection, entre autres sur la fluorescence, avec le lancement de nouveaux satellites qui vont permettre ou qui permettent déjà en partie d'avoir des informations directes sur la photosynthèse du couvert et des feuilles.

Ce qu'on peut mesurer à l'aide de capteurs, c'est la réflectance, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement transmis. On peut la mesurer à différentes distances, avec des capteurs rapprochés, au niveau des feuilles (image en bas à droite) ou au-dessus d'un couvert végétal (image au milieu à droite), ou avec des capteurs très éloignés dans des satellites (image en haut à droite). C'est la mesure directe.
Cette réflectance (en ordonnée sur la figure) est sensible à la longueur d'onde exprimée en nanomètres. Dans la gamme visible, jusqu'à 700 nanomètres, elle dépend essentiellement des pigments foliaires et dans la gamme proche infra-rouge, au-delà de 700 nanomètres, elle va plutôt dépendre de la structure foliaire ou de la structure du couvert selon l'échelle à laquelle on se place.









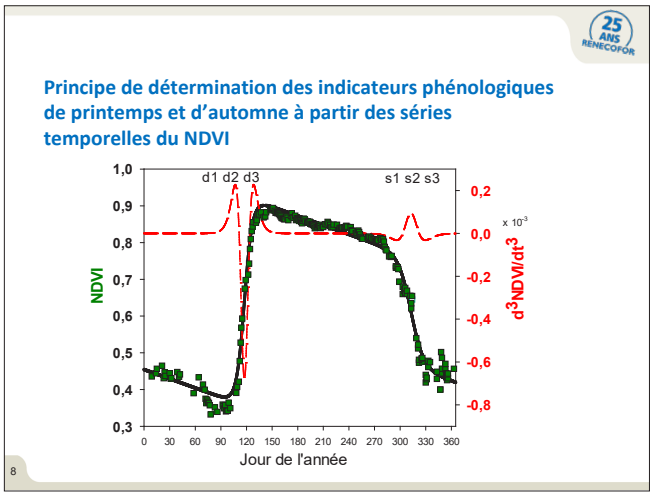
Pour caractériser l'état, l'activité de la végétation, on utilise classiquement des indices qui combinent les valeurs de réflectance particulièrement informatives. Et notamment l'indice de végétation normalisé (NDVI), qui considère deux bandes spectrales (plages de longueurs d'onde) : une dans le proche infra-rouge (PIR), l'autre dans le rouge (R) autour de 680 nanomètres, dans la bande d'absorption de la chlorophylle A. Remarque : on voit qu'il y a dans cette bande une forte absorption parce qu'on a une faible réflectance ; même chose dans le bleu, domaine d'absorption des deux chlorophylles A et B ; dans le vert, par contre il y a peu d'absorption, d'où une forte réflectance du couvert.
Le NDVI est un indice normalisé : on calcule la différence entre les valeurs de réflectance dans les deux longueurs d'onde et on normalise par la somme des deux. L'indice varie donc entre -1 et 1, ou si on préfère, entre -100% et 100%.

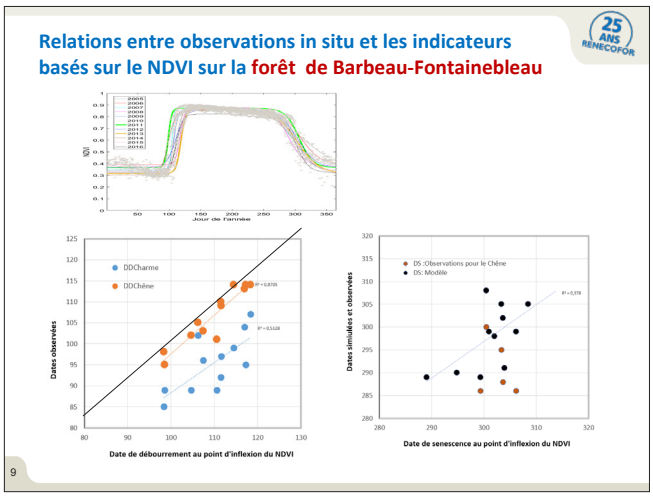
Notre laboratoire développe et installe des capteurs de télédétection rapprochée depuis pas mal années déjà, et fait des mesures avec des spectromètres qui permettent d'accéder au NDVI mais aussi à d'autres informations dont je ne parlerai pas ici.
Ces systèmes sont installés sur un réseau de sites, principalement les sites ICOS* et les sites du réseau SOERE F-ORE-T* dont Guy Landmann a brièvement parlé (session 1). Comme il se fait bien d'autres choses sur ces mêmes sites, et en particulier des mesures de flux, ça nous donne d'autres informations qu'on peut comparer avec la phénologie.

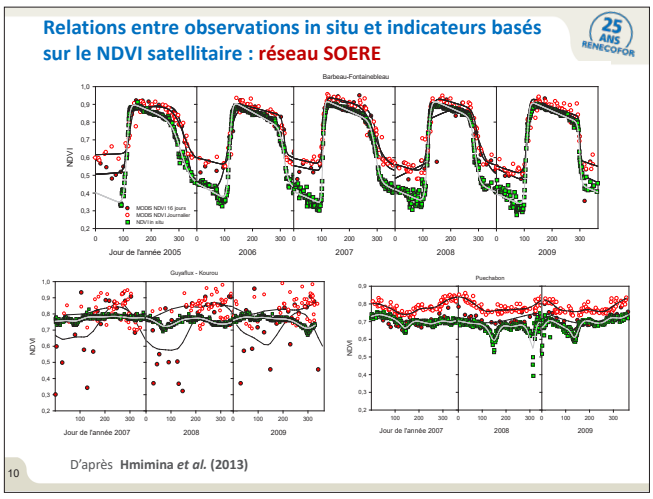
Télédétection rapprochée du débourrement et de la sénescence

Pour entrer dans le vif du sujet, voici le type de tracé qu'on obtient sur ces sites pour le NDVI, l'indice de végétation, en fonction de la période de l'année. Le vert/kaki correspond à une forêt de chêne sessile, la forêt de Barbeau près de Fontainebleau ; le bleu correspond à une forêt de chêne vert, la forêt de Puéchabon dans l'Hérault. On voit entre les deux une grande différence dans la dynamique de signal : c'est que le chêne sessile est une espèce à feuilles caduques tandis que le chêne vert est sempervirent. Chez le chêne sessile, le NDVI reste très faible pendant la période sans feuilles ; il monte très rapidement lors de la feuillaison puis connaît une sorte de plateau et une décroissance lors du jaunissement et de la chute foliaire. Mais dans des systèmes où la surface foliaire et la chlorophylle varient relativement peu, on a quand même un signal : on le voit, chez chêne vert, lors de la pousse des feuilles (la chute et la pousse sont quasi simultanées) ; et comme on peut relier ce signal avec des flux de carbone, on sait que ce n'est pas un artefact.

Je viens de vous montrer le signal « propre », mais en fait le signal brut correspondant, ci-contre, est sensible au rayonnement et en particulier à la proportion de rayonnement diffus et direct. Pour obtenir les courbes précédentes, il faut traiter ces données et en particulier les « seuiller » en fonction du rayonnement.







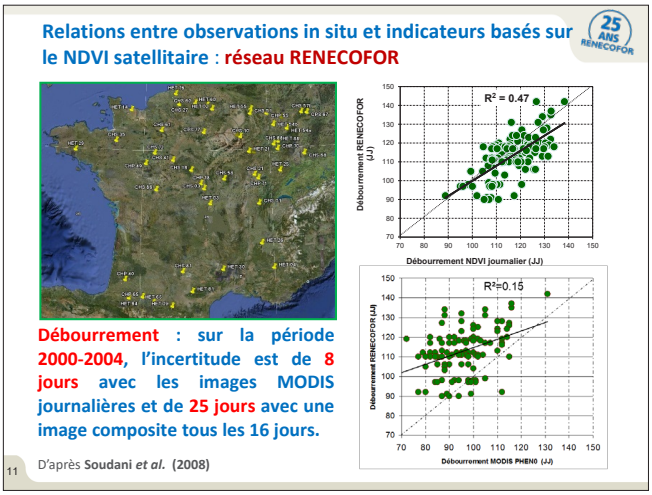
D'après **Hmimina *et al.* (2013)**

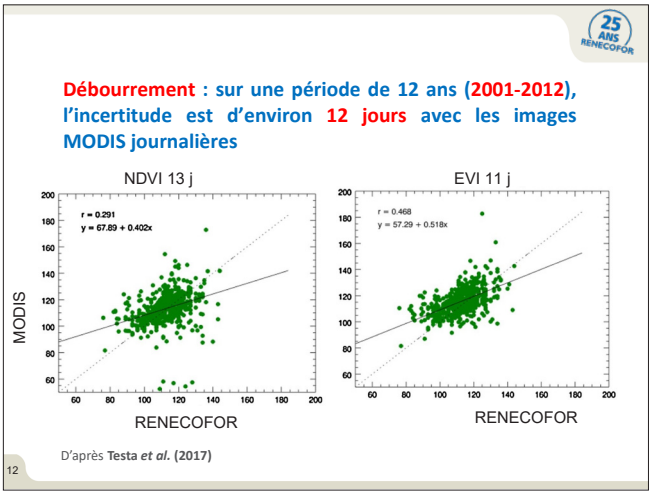
Ensuite, pour valider la pertinence de ces courbes en matière de détection du débourrement et de la sénescence, il faut comparer avec les mesures de phénologie faites sur les réseaux (dont RENECOFOR). Or on a un signal dynamique qui s'étend sur toute l'année alors que les données d'observation phénologique sont ponctuelles dans le temps. Pour pouvoir comparer, il faut extraire de nos dynamiques saisonnières l'information souhaitée. Pour la phase de débourrement, nous avons extrait la date de démarrage de croissance des feuilles, c'est-à-dire le point d'inflexion (qui correspond à la vitesse de croissance maximale) et la date à la valeur maximale ; même démarche pour le jaunissement et la chute des feuilles.

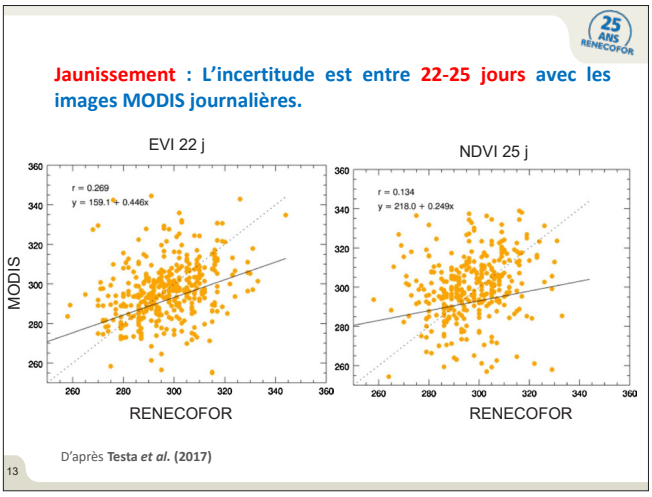
Ainsi, sur le site de Barbeau, où nous avons 12 années de données (voir l'aperçu en haut), nous avons pu comparer la date d'observation avec la date de débourrement issue du point d'inflexion (figure de gauche), et nous l'avons fait pour deux espèces, parce que le chêne (points orange) est accompagné de charme (points bleus) en sous-étage. Pour le chêne, on a une bonne relation qui n'est pas biaisée par rapport à la droite 1/1. Pour le charme on obtient aussi une bonne relation, mais elle est biaisée ou plus exactement décalée, ce qui normal : comme vous le savez, le charme débourre 15 jours à 3 semaines avant le chêne sous nos climats ; or la réflectance mesurée au-dessus du couvert est celle de l'étage dominant, c'est-à-dire du chêne. Pour le jaunissement nous avons fait la même approche, sauf que (figure de droite) on a 2 types de points (des points de modèle et des points de données) mais peu importe : nous n'avons pas de relation entre le signal de télédétection qu'on arrive à extraire et les dates d'observation sur le site de Barbeau. La télédétection ne fonctionne pas (actuellement) pour détecter la date de jaunissement des feuilles.

Test de la télédétection satellitaire

Jusque-là c'était facile parce que le capteur est proche du couvert et qu'on a peu d'interférence avec l'atmosphère. Mais quand on utilise des données satellitaires, le signal qu'on capte est fortement bruité car il doit retraverser toute l'atmosphère et subit donc une forte interférence. Je vous présente ici des données de NDVI au fil du temps sur trois écosystèmes : la forêt de chêne sessile sur le site Barbeau (en haut), la forêt tropicale du site de Kourou en Guyane (en bas à gauche) et la forêt de chêne vert du site de Puéchabon (en bas à droite). En rouge, ce sont les données du satellite MODIS, avec des produits journaliers (points creux) ou des produits composites à 16 jours (points pleins), et en vert ce sont comme précédemment les données mesurées in situ depuis les tours à flux.
Disons, pour faire simple, qu'en ce qui concerne le chêne sessile on arrive plus ou moins à reproduire depuis le satellite le signal observé localement. Mais sur la forêt tropicale de Guyane c'est plus compliqué, entre autres à cause de l'ennuagement, et ça marche mal ; sur le chêne vert, ça ne marche pas bien non plus.







À une échelle plus large, Kamel et quelques autres ont utilisé les observations phénologiques du réseau RENECOFOR (sites de hêtre et chênes), pour les comparer aux indications issues des données NDVI du satellite MODIS.
Pour le débourrement, ça donne une incertitude de 8 jours avec les produits journaliers et de 25 jours sur une image composite. Je parle là des produits fournis par MODIS, des données qu'on peut aller télécharger directement sur le site internet : pour nous, en gros, elles ne valent pas grand-chose. Par contre, quand on accède aux images journalières brutes de MODIS et qu'on les traite soi-même comme savent le faire les télédétecteurs comme Kamel, on obtient une relation plus étroite, qui commence à vouloir dire quelque chose (figure en haut à droite) [en bas c'est le produit phénologique MODIS calculé avec des images composites sur 16 jours].

Nous avons fait la même chose, c'est-à-dire la comparaison des données MODIS et des données RENECOFOR, mais en utilisant deux indices de végétation : le NDVI et l'EVI (Enhanced Vegetation Index), qui prend en compte la lumière bleue pour tenter de corriger les effets de l'atmosphère, dont j'ai dit qu'ils parasitaient pas mal les données. Cela concerne, les feuillus (chêne et hêtre), et pour toutes les années d'observation disponibles pour la comparaison (2001-2012).
Au final, on n'obtient pas grand-chose de mieux en tentant de corriger avec ce rayonnement bleu.

Même exercice enfin pour le jaunissement : on a vu précédemment que la comparaison ne marchait déjà pas en télédétection rapprochée… alors forcément ça marche encore moins bien depuis le satellite.

Photo : Luc Croisé, ONF

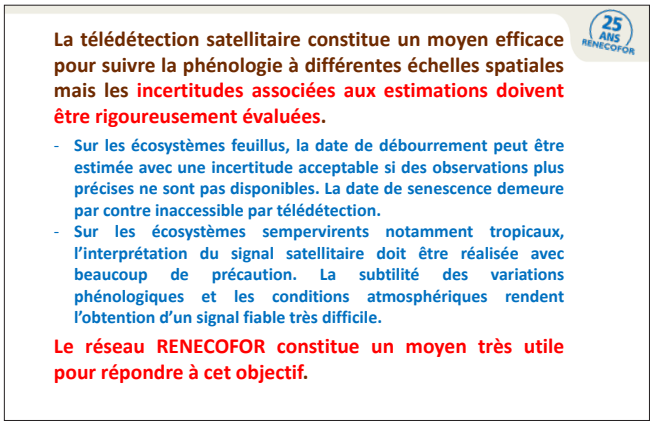
Débourrement du chêne à Fontainebleau

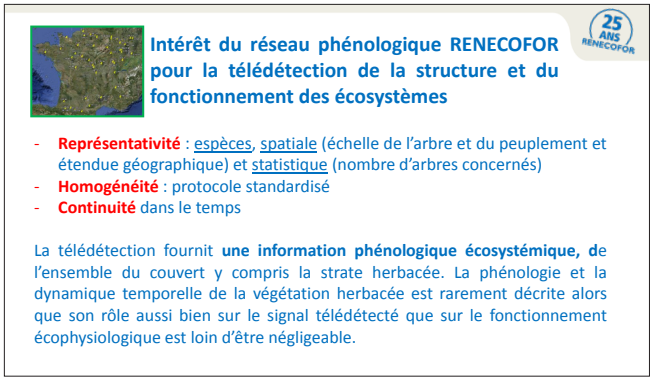
Les figures de cette présentation sont extraites de :

Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailler, J. Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., de Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Granier, A., Gross, P., Heinesch, B., Longdoz, B., Moureaux, C., Ourcival, J. M., Rambal, S., André, L. S. & Soudani, K. (2013)-Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: an investigation using ground-based NDVI measurements. Remote Sensing of Environment,132:145-158

Soudani K., le Maire G., Dufrêne E., François C., Delpierre N., Ulrich E. & Cecchin S. (2008)-Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Remote Sensing of Environment,112(5):2643-2655

Testa S., Soudani K., Boschetti L., Mondino E.B. (2017)-MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,64, 2018:132-144





Conclusion

Je ne suis pas télédétecteur de formation, je suis simplement utilisateur de la télédétection et mes commentaires sont moins enthousiastes que ceux de Kamel, mais en gros nos avis sont assez proches. « La télédétection satellitaire constitue un moyen efficace… », écrit-il, alors que pour moi ça ne marche pas dans un certain nombre de cas, ça dépend de quelle télédétection on parle, ça dépend de comment les données sont traitées, etc. En gros, la télédétection fonctionne assez bien, pour le suivi du débourrement, sur les écosystèmes feuillus avec une forte dynamique. Mais sur les écosystèmes sempervirents, tropicaux ou autres, c'est beaucoup plus compliqué. Il pourrait y avoir des progrès dans les années à venir, grâce aux nouveaux satellites radar qui commencent à voler et qui, eux, ne sont pas sensibles à l'ennuagement : on obtient des signaux visiblement beaucoup plus « propres », mais avec d'autres types d'inconvénients.

Quelques mots encore pour dire tout ce que nous a apporté le réseau RENECOFOR, et surtout les qualités, de cet apport : la dimension plurispécifique, l'aspect représentativité au sens spatial, depuis l'échelle de l'arbre et du peuplement jusqu'à celle du pays, et aussi au niveau statistique puisqu'on a un nombre d'arbres suffisant. Autres qualités fondamentales : les protocoles standardisés, et la continuité dans le temps. Pour faire utilement des comparaisons avec des données satellitaires, qui sont en principe normalisées et calibrées, il faut que les données d'observation soient, de leur côté, aussi normalisées et calibrées que possible. Merci à RENECOFOR.

Discussion

Questions / Réponses

Guy Landmann, Ecofor - La session s'intitule « Comment les arbres répondent-ils aux variations du climat ? », mais je reformule : en 25 ans, est-ce qu'on voit une réponse des arbres RENECOFOR au changement du climat qui s'est produit sur cette période ? Ou alors il ne s'est rien produit et c'est normal de ne rien voir... [rires]

Éric Dufrêne (ED) - Pour rester sur le ton de la provocation, 25 ans c'est beaucoup trop court, à mon avis il en faut 50 ! Plus sérieusement, c'est vrai que pour mettre en évidence des tendances, même sur des choses relativement simples, il faut beaucoup de recul. À Fontainebleau on a 30 ans maintenant de dates de débourrement et on ne voit pas de tendance ou presque pour une même espèce, et ça dépend des espèces.

François Lebourgeois (FL) – Sur RENECOFOR, on va avoir cette année 20 ans de données phénologiques, et bien sûr on commence à se demander si on peut détecter quelque chose, si on pourrait « faire passer une droite ». Mais c'est extrêmement difficile, d'autant qu'on est dans une période avec une variabilité interannuelle très forte. Donc on a une variabilité du signal monstrueuse par rapport à la durée d'observation, ce qui masque une éventuelle tendance.

Xavier Morin (XM) - En effet, le changement climatique ne se traduit pas seulement en moyenne, mais aussi dans la variance : la variabilité interannuelle augmente elle aussi.

ML - Et il faut se rappeler que pour les climatologues, il fallait classiquement 30 ans de données pour définir un climat. Même s'ils sont aujourd'hui obligés de faire évoluer ce « dogme » compte tenu du changement climatique, ça donne la mesure du poids de la variabilité interannuelle.

ED – Ceci dit, on construit des modèles et donc en fait on utilise la variabilité interannuelle quand il y en a. C'est quand il n'y en a pas qu'on est vraiment embêté, parce que quand tout varie dans le même sens (le CO2, l'azote, la croissance…), on ne peut rien dire.

Jean-Luc Dupouey, INRA Nancy – Il y a un décalage croissant entre RENECOFOR, qui ne voit pas trop de tendances, et des articles publiés en nombre qui en constatent beaucoup sur des périodes d'observation qui ne sont pas beaucoup plus longues… Pour m'en tenir à un domaine que je connais bien, avant que ne démarre RENECOFOR il y avait déjà beaucoup de publications disant que la flore était en train d'évoluer, avec une dynamique liée à des changements à long terme : certains

avaient vu de l'eutrophisation à cause des dépôts azotés, d'autres avaient vu des effets de l'acidification. Depuis il y a eu des publications sur la montée en altitude des espèces sous l'effet du changement climatique. Ceci pour dire que les chercheurs qui travaillent sur la flore, dont je fais partie, ont été prompts à publier des résultats sur les effets des changements environnementaux qui nous intéressent, et qu'on est arrivé relativement aisément à mettre en évidence des réponses. Or on voit que dans RENECOFOR, où on a mis en place des protocoles de suivi très précis, on a du mal à retrouver aussi facilement ces tendances. Cela invite à se poser des questions. (voir aussi l'intervention sur le suivi de la flore, session 6)

ED - Il faudrait regarder plus finement la distribution, car un réseau national, ça peut aussi masquer des choses. En se focalisant sur un plus petit nombre de placettes ou sur une région, on peut peut-être détecter des tendances qu'on ne verra pas sur un réseau national...

Christophe Mouy, ONF Auxerre - Les travaux présentés par François Lebourgeois sont basés, en ce qui concerne la fructification, sur des séries un peu anciennes (1994-2007). Or pour le chêne nous sommes confrontés depuis quelques années à des problèmes de glandées. A-t-on cherché à confronter les corrélations trouvées avec ce qui s'est passé depuis une dizaine d'années ?

FL : Non, nous n'avons pas cherché à utiliser nos modèles pour faire de la prédiction. RENECOFOR a le plus beau jeu de données actuellement sur la fructification mais, pour cause de restriction de budget (arrêt du financement de l'UE), la récolte des litières n'a pu se poursuivre, depuis 2008, que sur un petit nombre de sites. Et c'est très dommage pour qui s'intéresse à la problématique de fructification, de pérennisation de l'écosystème. Quoi qu'il en soit, c'est déjà une gageure d'essayer de comprendre, quel est le déterminisme environnemental de la fructification pour les principales essences forestières. C'est ce à quoi nous nous sommes attelés (nous ne sommes pas les seuls), et nous avons des modèles qui marchent très bien en calibration, qui permettent de commencer à comprendre ; mais de là à faire des projections sur le long terme… C'est déjà difficile pour la phénologie foliaire, mais pour la fructification (qui intègre une cascade de processus), c'est vraiment très compliqué. Sur la période récente, contrairement à d'autres régions, la Lorraine a connu une très forte glandée en 2014 et il y a actuellement (2017) une glandée exceptionnelle. N'hésitez pas à faire remonter l'information de vos forêts : y a-t-il une glandée ou pas. Une information binaire, c'est toujours mieux que pas d'information du tout. Voir aussi, sur les variations des glandées, la présentation de Samuel Venner (session 6).

Caroline Scotti, INRA Avignon – Toujours sur la fructification des chênes : dans les analyses, a-t-on dissocié les espèces de chêne ? Ça paraît totalement acyclique, mais ça pourrait venir de différences entre chêne sessile et chêne pédonculé ?

FL - Nous avons commencé par explorer séparément les données de chêne sessile et de chêne pédonculé, et nous n'avons pas vu de différence notable donc nous avons ensuite mélangé l'ensemble des données pour avoir une meilleure assise statistique. Sur la phénologie foliaire, où on a beaucoup plus de recul, on voit très peu de différence entre les deux espèces ; sur la fructification, il n'y a pas plus de cyclicité sur le chêne sessile que sur le pédonculé. C'est un gros bazar, et on a mélangé le gros bazar.

Jean-Luc Dupouey - On ne voit pas de différence pédonculé/sessile… mais il y a peu de peuplements mélangés sessile/pédonculé dans RENECOFOR. Or, si l'on veut comparer les deux espèces, il faut le faire toutes choses égales par ailleurs donc dans des peuplements mélangés, ou en plantations comparatives. Dans ce cas, la bibliographie indique l'existence de différences entre les deux espèces. RENECOFOR n'est pas idéal pour répondre à cette question.

FL - Je suis d'accord. Mais de toute façon, à l'échelle de RENECOFOR, l'échelle peuplement, on n'est pas suffisamment fin. Depuis 15 ans on a par ailleurs des dispositifs avec un mélange chêne sessile et pédonculé et là effectivement on va voir des petites différences.

Frédéric Jean, INRA Avignon : (1) D'après les données RENECOFOR, François Lebourgeois a montré qu'il y a une relation entre croissance et fructification et je suis surpris de voir qu'il n'y a pas de relation entre la phénologie foliaire et la croissance. Comment expliquer ça ? (2) Il a dit d'autre part qu'il n'y a pas de relation entre la phénologie (foliaire) et la fructification ; y aurait-il alors un intérêt à observer la phénologie de la reproduction comme déterminant de la fructification ?

FL - (1) Les données sur lesquelles nous avons travaillé (phénologie, croissance, fructification) ne sont pas strictement individualisées sur la période 1997-2015, donc la réponse est globalisée au niveau peuplement ; ça masque la variabilité entre individus et ne permet pas des explorations très fines… Ce n'est pas très étonnant qu'on n'ait pas pu trouver de lien entre phénologie et croissance à l'échelle peuplement. Par contre, RENECOFOR fournit des données à l'échelle arbre depuis 2009 (notations phénologiques individuelles). Et d'après les travaux récents de Nicolas Delpierre[1] quand on travaille à l'échelle de l'arbre, on peut avoir une relation entre croissance et phénologie, mais pas directement avec la date du débourrement ni même la longueur de la saison de végétation : c'est la période effective de croissance qui explique la variabilité de la croissance, et pas forcément le taux de croissance. Et les relations ne sont pas les mêmes chez le chêne et le hêtre dont le fonctionnement est différent. (2) Quant au lien entre phénologie et fructification, même remarque : nous avons travaillé à l'échelle peuplement, or pour bien comprendre les processus, il faut regarder à l'échelle arbre, donc avoir des données à l'échelle arbre. Ça commence à arriver pour les informations sur la fructification, par exemple (avec le projet PotenChêne que va présenter Samuel Venner, cf. session 6). Et oui, il faudrait aussi regarder tout ce qui est floraison ; il y a des choses qui se mettent en place, mais c'est loin d'être évident.

Nicolas Delpierre – Sur cette question de phénologie de la reproduction, j'ajoute que des résultats très intéressants ont été publiés récemment, notamment en Pologne, sur le lien entre la durée d'émission du pollen et la

1 Nicolas Delpierre, Joannès Guillemot, Eric Dufrêne, Sébastien Cecchini, Manuel Nicolas, 2017. Tree phenological ranks repeat from year to year and correlate with growth in temperate deciduous forests. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 234 pp. 1–10
Nicolas Delpierre, Daniel Berveiller, Elena Granda, Eric Dufrêne, 2016. Wood phenology, not carbon input, controls the interannual variability of wood growth in a temperate oak forest. New Phytologist (2016) 210:459–470

fructification chez le chêne. Apparemment, quand la durée d'émission du pollen est courte, c'est-à-dire quand les arbres fleurissent simultanément, les glandées sont plus importantes. Et c'est un signal que nous observons sur les chênaies de RENECOFOR. Quand on fait l'analyse sur l'ensemble de ce jeu de données (beaucoup plus important que celui sur lequel ce lien a été mis en évidence en Pologne), on voit encore ce signal mais il est très faible ; il ne semble pas avoir un effet déterminant à très large échelle, quand on considère beaucoup de forêts simultanément. Par contre il est possible que sur un petit nombre de forêts, on voie un effet assez marquant. Ça veut dire que probablement, sur de très larges échelles ce signal existe mais il est de moindre importance par rapport à d'autres effets, tels que les effets directs de température ou les effets bilan de carbone qui ont été mentionnés. Je pense que c'est aussi là que se situe la question du changement d'échelle : il y a le passage de l'individu au peuplement, mais aussi le passage du peuplement à l'ensemble des forêts d'un vaste territoire. Toutes ces échelles sont à considérer, les déterminants prépondérants ne sont pas les mêmes aux différentes échelles.

FL - Répétons-le : la force du RENECOFOR c'est d'avoir du multisite, du long terme et plusieurs espèces ; donc on peut travailler très bien à l'échelle globale et à l'échelle du peuplement. Les approches que j'ai présentées rapidement permettent de mettre en évidence les paramètres principaux à grande échelle ; ça dégrossit déjà pas mal les choses. Mais pour détecter des mécanismes plus fins, qui puissent incrémenter des modèles mécanistes, il faut travailler à une échelle plus fine ; RENECOFOR le permet pour certains paramètres mais pas pour tout. NB : les modèles mécanistes ont le grand avantage, par rapport aux approches corrélatives, d'être indépendants de la gamme de données. Les modèles corrélatifs ne sont normalement valables que dans la gamme de calibration, tandis que les modèles mécanistes s'intéressent aux processus : si le processus est bon, le modèle doit marcher, en théorie, quelle que soit la gamme des paramètres.

Andreas Prinzing, Université de Rennes 1 - Xavier Morin est passé un peu vite sur la modélisation du comportement des mélanges d'espèces. Quels sont les mécanismes d'interaction que vous êtes en train de modéliser ? Est-il possible d'inclure des choses comme les interactions avec les « ennemis » qui sont fortement sous le contrôle du débourrement, ou avec les mycorhizes ? On a pu mettre en évidence que le débourrement d'un arbre est retardé quand ses voisins [de même espèce] sont relativement éloignés, et que ce retard peut être partiellement compensé par une forte mycorhization : est-ce qu'on peut approcher ce type de processus ? Et si vous avez pu le faire, ces facteurs biotiques sont-ils aussi importants que les facteurs climatiques ?

XM - Nous travaillons actuellement sur les mécanismes de compétition pour la lumière. On peut en principe complexifier les modèles autant qu'on veut si on a des données. Mais pour l'évolution du modèle, j'essaie d'avoir l'approche la plus parcimonieuse possible. Certes, nous rajoutons des processus – nous avons rajouté par exemple un module de gestion - mais comme la base du modèle n'a pas été fortement changée, ça porte sur des peuplements très simplifiés, l'idée étant de dégager (et tester) des grandes tendances pour les facteurs les plus importants. Ceci dit nous avons implémenté avec les collègues de l'INRA Bordeaux un module d'herbivorie par la processionnaire du pin, pour tester son effet sur le mélange pin maritime – bouleau ; l'INRA Bordeaux a des données très fines sur le cycle de vie de la processionnaire et sur son impact sur les pins. Il est donc possible de greffer des modules d'interactions biotiques selon les questions qu'on veut explorer, mais il faut avoir les bonnes données pour le faire. Quant à l'importance des effets de ces facteurs biotiques pour moduler les réponses au climat… ça dépend fortement de l'écosystème et des espèces qu'on considère, c'est à voir au cas par cas.

Caroline Scotti – Une question à Eric Dufrêne, sur la télédétection. En Guyane, où on n'observe pas de corrélation entre ce qui sort de la télédétection et les cycles de végétation, on met en cause l'ennuagement, c'est-à-dire un problème physique ; mais est-ce que ça ne pourrait pas être lié au fait qu'en Guyane il n'y a pas de véritable rythme saisonnier ? Il y a une saison sèche et une saison humide, mais l'ensemble de la communauté change sa végétation à des rythmes discontinus…

ED - Quand on fait des observations in situ et qu'on ramasse de la litière, on peut distinguer un cycle saisonnier, qui n'est pas très marqué. Or des travaux publiés dans de grandes revues montrent un cycle de télédétection inversé par rapport à ce qui est observé in situ, et il semblerait que ce soit un artéfact lié à des niveaux d'ennuagement. Autrement dit, il y a probablement un cycle, il est faible, et avec les données de télédétection optique dont on dispose actuellement, on ne perçoit rien ou bien quelque chose qui, en gros, donne le taux d'ennuagement. Il y a de l'espoir avec les données radar parce que le radar n'est absolument pas sensible à l'ennuagement, mais la résolution spatiale est moins bonne (chaque type de mesure a ses inconvénients). Et il y a maintenant des satellites qui volent à des pas de temps rapprochés et on peut espérer avoir des informations sur les forêts tropicales.

Alain Bréthes, retraité ONF - Myriam Legay a présenté la régression attendue du hêtre ; sait-on ce qui pourrait le remplacer ?

ML - Je n'ai pas parlé de régression du hêtre mais plus prudemment de recul de la niche climatique. Il ne faut pas sur-interpréter les indications des modèles de niche : ils représentent l'enveloppe climatique dans laquelle on observe l'espèce aujourd'hui, et quand on projette cette enveloppe dans le temps on voit qu'elle se réduit pour la plupart des espèces de zone la tempérée (donc toutes nos espèces de production, pratiquement). Mais ce que ces modèles ne disent pas, c'est ce qui se passe quand les peuplements se retrouvent en-dehors de cette niche climatique. On fait souvent l'hypothèse que ça va entrainer un dépérissement mais rien n'est moins sûr, parce que les arbres ont une grande capacité d'acclimatation. On peut penser qu'à long terme des problèmes se manifesteront mais il se pourrait, par exemple, que ces problèmes concernent les processus de renouvellement et non la survie des arbres. Donc il ne faut pas interpréter ces cartes en termes de dépérissement. Quant à ce qui viendrait après… Il y a un certain nombre

2 Juliette Boiffin, Vincent Badeau, Nathalie Breda, 2017. Species distribution models may misdirect assisted migration: Insights from the introduction of Douglas-fir to Europe. Ecological Applications, vol. 27 (2), pp.446-457

d'espèces dont la niche s'étend mais leur vitesse de colonisation n'est pas à la hauteur de l'évolution du climat. Donc la question telle qu'elle est posée à l'échelle du paysage est très compliquée…

Eric Dufrêne – Et c'est sans compter les autres changements : les dépôts azotés (et autres), le gaz carbonique, etc. Tout ça a une influence sur la survie et la croissance de la forêt, or ce n'est pas pris en compte par les modèles de niche « de base ».

[anonyme] - Comment vont être redessinées les régions de provenance pour les plantations ? Dans combien de temps peut-on espérer un changement de cartes de régions de provenance ?

ML - Il y a déjà eu une révision des conseils d'utilisation des régions de provenance avec un élargissement des provenances qui peuvent être utilisées ; un élargissement à des régions plus « chaudes ». Cette évolution est amorcée et va se poursuivre à mesure de l'avancement des connaissances. Par ailleurs on se propose d'entrer à l'échelle de l'ONF dans une démarche de test d'essences et de provenances pour tester en grandeur réelle la réponse de différents matériels forestiers de reproduction au climat tel qu'il évolue dans les régions. Mais répétons-le : on n'a pas aujourd'hui un modèle qui permettrait de répondre de façon simple à cette question.

Georges Hache, sylviculteur privé en Côte d'Or - Je voudrais avoir l'avis d'un tenant des modèles corrélatifs, M. Badeau par exemple, sur la comparaison entre les modèles corrélatifs et les modèles mécanistes, disons phénologiques, en ce qui concerne la répartition du hêtre, notamment.

Vincent Badeau – La comparaison présentée par Xavier Morin est issue du projet Qdiv (2005-2008) : c'est déjà un peu ancien, et les modèles de niche que nous avions sortis en 2004 dans le cadre du projet CARBOFOR ont évolué depuis. Pour caricaturer, je pourrais dire que nous ne croyons plus à ces modèles de 2004. Je vous renvoie au dernier article publié par notre équipe avec ma post-doc Juliette Boiffin et Nathalie Bréda[2] : dans certains cas, notamment pour le Douglas, ces modèles corrélatifs ne marchent pas du tout. Ils sont très faciles à caler sur l'aire naturelle du Douglas sur la côte ouest des USA, mais la projection sur l'Europe prédit… que le Douglas n'y a absolument aucune chance ! On voit maintenant que les enveloppes climatiques calculées avec des données de présence uniquement ne permettent pas de faire des projections valides sur l'avenir (ou en tout cas qu'elles sont difficilement validables). Pour leur part, les modèles mécanistes sont bien plus précis au niveau du fonctionnement de l'espèce mais ne concernent que quelques espèces : on peut construire des modèles phénologiques pour les grandes essences sociales mais personne n'a jamais regardé ce qui se passait pour les cornouillers, les viornes, le muguet ou toutes ces autres espèces forestières. En fait on est encore au milieu du gué : on a des outils, on les utilise, on les compare, on essaie de trouver des solutions mais il ne faut pas croire qu'il y a un combat entre ces modèles, il ne faut pas croire qu'il y aura un modèle qui va nous sauver.

ML – Par ailleurs, Xavier Morin a confronté les modèles corrélatifs et mécanistes en disant qu'en général les modèles corrélatifs sont plus pessimistes, ou plus sensibles à l'évolution du climat. C'est effectivement ce qu'on observe, mais je me demande si on peut vraiment traiter ensemble des modèles mécanistes aussi différents que PHENOFIT et CASTANEA : la comparaison de modèles réalisée dans le cadre du projet Qdiv a montré que, lorsqu'on bloque l'effet de l'augmentation du CO_2, des modèles mécanistes comme CASTANEA retombent sur des prédictions assez proches de celles des modèles de niche. Les mécanismes qui rendent PHENOFIT ou CASTANEA moins sensibles au climat ne sont à mon avis pas les mêmes. C'est pourquoi j'insiste sur la nécessité de considérer l'ensemble des résultats : chacun donne un éclairage et aucun ne peut être utilisé isolément des autres pour prendre une décision de gestion.

JLD - Une question à Xavier Morin : les modèles mécanistes n'ont-ils pas aussi des problèmes de corrélation ? Par exemple, si vous utilisez les données RENECOFOR, c'est du corrélatif au sens où vous n'utilisez pas, pour calibrer les modèles, de données qui viendraient des climats simulés hors de l'enveloppe climatique actuelle. Comme l'a expliqué Vincent Badeau (avec l'exemple du Douglas), on comprend qu'observer la phénologie dans la niche actuelle du chêne a des limites fortes quant à la prédiction de la possibilité d'existence du chêne en-dehors. Cela implique qu'il faut absolument obtenir des observations sur le comportement des essences en-dehors de leur niche climatique actuelle, en conditions expérimentales. On n'en a guère aujourd'hui.

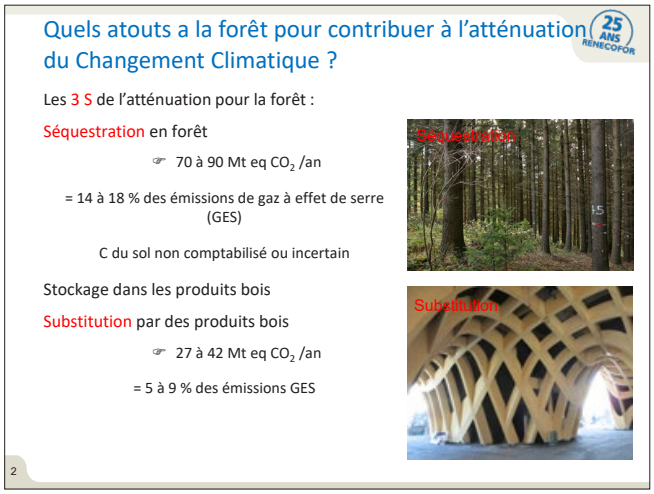
XM - Je suis d'accord et c'est pourquoi j'ai parlé de modèles (ou approches) dits, de façon un peu présomptueuse, mécanistes. Cela dit, pour prédire la répartition des essences, la grosse différence et l'avantage de l'approche mécaniste par rapport aux modèles corrélatifs c'est qu'au moins l'aire de répartition n'entre pas dans l'étape de calibration du modèle ; même si à l'intérieur on n'avait que des régressions linéaires corrélatives, au moins la variable présence/absence n'intervient pas. L'idéal serait effectivement d'avoir des résultats expérimentaux en conditions contrôlées pour connaître les normes de réaction, les normes de réponse d'un processus (la croissance, la phénologie…) au climat, par exemple. Mais on doit faire avec ce qu'on a.

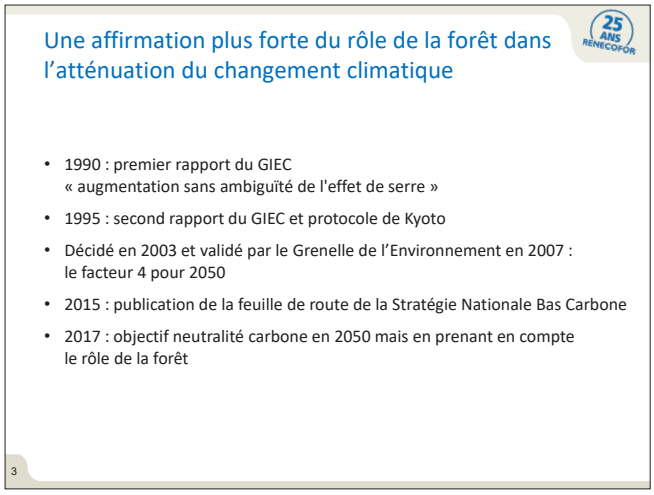
ED - Ça dépend quand même du niveau de mécanisme qu'il y a dans le modèle : plus on est proche du mécanisme, moins il y a de risque à projeter le modèle (à extrapoler). Le problème dans ce qu'on appelle modèle mécaniste, que ce soit CASTANEA ou un autre, c'est qu'il y a des choses très proches des mécanismes, comme la photosynthèse, et d'autres qui en sont très loin, comme la croissance.

ML – Pour conclure, on voit bien à travers ces échanges que l'observation nous permet de commencer à comprendre, et de faire des modèles qui nous interrogent. On voit aussi qu'on est à un stade où ces modèles sont plus sources de questionnements que de réponses très solides. D'où la difficulté de répondre à des questions qui peuvent paraître basiques. C'est qu'à travers la confrontation de ces modèles et l'étude de leur comportement, on se rend compte de leurs limites, comme l'illustre le témoignage de Vincent Badeau à propos des modèles de niche. Mais le fait de nous permettre de nous interroger est déjà extrêmement important, pour l'action aussi.

SESSION 3 - QUEL RÔLE JOUE LA FORÊT DANS LA SÉQUESTRATION DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUE ?

INTRODUCTION





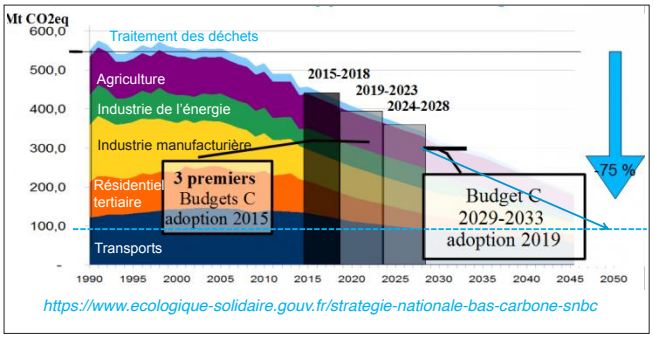
Christine Deleuze
ONF, responsable du pôle de recherche-développement-innovation de Dole

Cette session sur le rôle de la forêt dans la séquestration du carbone atmosphérique est très cohérente avec la session précédente sur l'effet des variations du climat, puisqu'il s'agit de contribuer à l'atténuation du changement climatique. Et elle va permettre de souligner l'intérêt du réseau RENECOFOR pour éclairer ce rôle d'atténuation.
Mais avant de parler de séquestration de carbone en forêt, il me semble important d'avoir en tête l'ensemble des effets d'atténuation qu'apporte la filière forêt-bois.

Ces effets d'atténuation viennent de la propriété qu'ont les arbres de capter du carbone atmosphérique et de le fixer dans la biomasse, et en particulier dans le matériau renouvelable qu'est le bois. Ils se traduisent par les trois S : séquestration, stockage, substitution.
La séquestration en forêt c'est le fait d'accumuler de la biomasse. Si la forêt était à l'équilibre, on n'aurait pas de flux supplémentaire chaque année. Mais la forêt française a doublé sa surface au cours du siècle dernier. Elle est donc globalement jeune, ce qui lui donne une grande capacité d'absorption, et comme par ailleurs on capitalise pas mal de bois sur pied, la séquestration est de l'ordre de 70 à 80 millions de tonnes équivalent CO_2 par an. À titre de repère, ça correspond à peu près à 15% du total des émissions de gaz à effet de serre de la France. L'arbre fixe ce carbone en particulier dans le bois, bio-matériau utilisé pour les meubles, la charpente, le parquet… Ces usages correspondent à du stockage de carbone, même si ce n'est pas forcément sur une durée très longue. Ce **stockage** reste assez stable dans le temps (nouvelles récoltes d'un côté, abandon en déchetterie de l'autre) et ne se comptabilise donc pas en flux. Et enfin, toute utilisation du bois a un effet de **substitution**. Le bois énergie évite de brûler des combustibles fossiles comme du pétrole ou du charbon ; le bois matériau, utilisé en construction notamment,évite des matériaux énergivores comme l'acier ou le béton. La substitution est une contribution très importante dans l'atténuation et on estime que les émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi évitées chaque année sont de 27 à 40 millions de tonnes équivalent CO_2. On comprend donc comment, selon l'étude prospective INRA-IGN[1], la filière forêt-bois contribue pour au moins 20% à l'atténuation des émissions de GES.

Voyons maintenant quelques **éléments de politiques publiques** sur cette question de l'atténuation. Jusqu'ici, les décisions portent surtout sur la réduction des émissions de GES.
En 1990, la publication du premier rapport du GIEC suscite la prise de conscience de ce que l'activité humaine a une part importante dans le

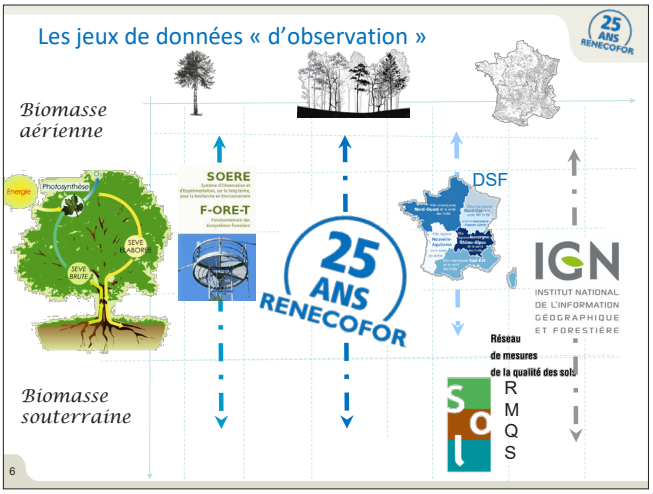
1 Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes)



réchauffement climatique. En 1995, le 2e rapport du GIEC confirme et aboutit à la mise en place du protocole de Kyoto. Sur ce graphique qui retrace les émissions françaises de GES depuis 1990 par grand secteur, on voit une stabilisation dès 1990 et à partir de 1995 on perçoit la volonté de réduire ces émissions.
En 2003, la France adopte une stratégie assez ambitieuse dite « facteur 4 » : elle s'engage, pour essayer de maintenir le réchauffement climatique à 2°C (à la fin du siècle), à diviser ses émissions de GES par 4 (= les réduire de 75%, cf. flèche bleue) à l'horizon 2050, par rapport au niveau de 1990. Pour tenir ce cap, il va falloir accentuer la courbe de façon extrêmement volontariste. D'où, en 2015, l'élaboration de la Stratégie nationale bas-carbone qui vise à définir en 3 phases (rectangles noir et gris) les actions concrètes à mettre en œuvre pour y parvenir.

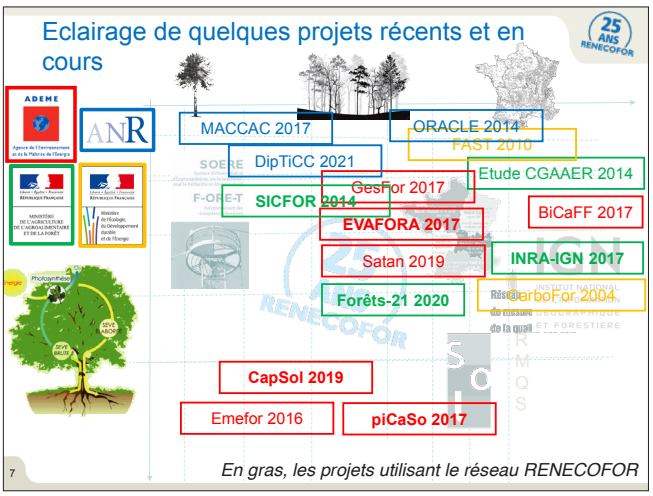
En 2017, le gouvernement (avec Nicolas Hulot) s'engage dans une stratégie encore plus ambitieuse qui vise **la neutralité carbone en 2050**. Et il y a dans cette ambition quelque chose de tout-à-fait nouveau : la volonté de promouvoir le rôle du secteur de l'utilisation des terres, qui peut agir comme un « puits » de carbone. Jusqu'à présent on n'a pas comptabilisé la contribution de la forêt à l'atténuation ; désormais on va prendre en compte les améliorations de séquestration que peut apporter la forêt dans cet objectif de neutralité carbone.

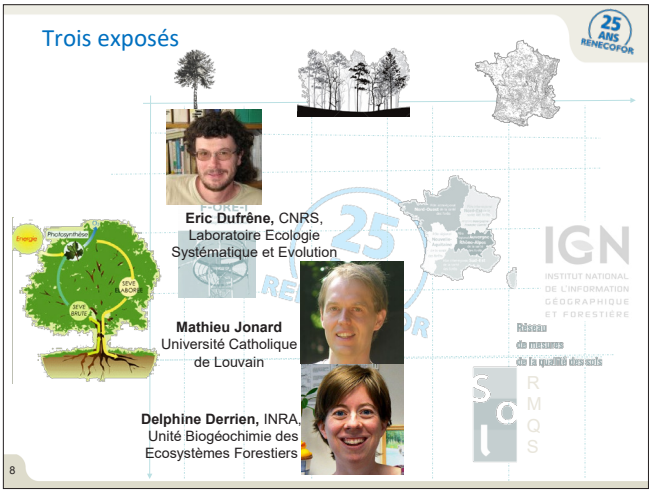
Sur ce thème de la séquestration en forêt, faisons un focus sur les sols. En 2015 à l'occasion de la COP 21, Stéphane Le Foll (alors ministre de l'Agriculture) a annoncé une initiative française qu'il a proposée au niveau mondial : la démarche 4 pour 1000 (4P1000). L'idée est la suivante : les sols contiennent une grande quantité de carbone et si on parvenait, *via* les pratiques agricoles et forestières, à améliorer cette séquestration de carbone de 0,4 % par an, c'est-à-dire 4 pour 1000, ça permettrait de compenser les émissions mondiales de GES. Pour la France, ce 4 pour 1000 prend une dimension importante, on le verra avec Delphine Derrien.



Les données d'observation dont on dispose pour appréhender le rôle de la forêt en matière de séquestration de carbone atmosphérique proviennent de différents réseaux. En gros, ce sont ceux dont a parlé Myriam Legay en introduction de la session précédente, mais je les présente différemment.

L'axe horizontal représente l'échelle d'observation, qui va de l'arbre (à gauche) à la ressource forestière totale (à droite) en passant par le peuplement ou le massif forestier. L'axe vertical représente le carbone, observé dans la partie aérienne ou dans la partie souterraine. On retrouve donc à gauche les sites atelier, très importants pour mesurer les flux de carbone (image de la tour à flux), soit une dizaine de sites suivis très en détail avec un recul de 6 à 20 ans selon les sites. On a ensuite les 100 placettes RENECOFOR, un peu plus représentatives de la ressource forestière et dont l'un des grands intérêts est de fournir de l'information sur tous les aspects de l'écosystème forestier, avec un recul de 25 ans. Viennent ensuite, avec 5 fois plus de points, le réseau 16x16 dit de niveau 1 sur le suivi de la santé des forêts, et le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) qui donne des informations complémentaires sur les sols, sur un maillage de même résolution mais pas tout à fait au même endroit ; on a un recul de 27 ans pour le DSF et de 16 ans pour le RMQS. Et enfin il y a à droite l'inventaire forestier national, très important dans ce continuum, qui fait des mesures sur de petites placettes temporaires à raison de 6 à 7000 placettes par an avec un recul de 40 ans.





Dans ce même espace j'ai positionné les projets de recherche qui peuvent éclairer le bilan carbone en ce qui concerne la forêt (les couleurs correspondent aux financeurs mentionnés à gauche). À droite beaucoup sont à l'échelle de la ressource, dont historiquement le projet Carbofor terminé en 2004. En bas, il y a des projets autour du carbone des sols, qui utilisent les données RENECOFOR. C'est d'ailleurs aussi le cas de l'étude ressource INRA-IGN. Au milieu, beaucoup de projets concernent le massif forestier ou le peuplement et à gauche il y a les projets qui s'intéressent plutôt au fonctionnement de l'écosystème.

Nous allons suivre 3 exposés. Eric Dufrêne va parler du modèle CASTANEA, et de la façon dont il mobilise les différents réseaux de mesure et d'observation pour comprendre et reproduire le fonctionnement de l'écosystème forestier, et notamment le cycle du Carbone. Ensuite Mathieu Jonard montrera comment les données RENECOFOR ont été les premières à apporter des informations sur le « puits de carbone » des sols forestiers, pour le 4 pour 1000 français. Enfin Delphine Derrien qui nous parlera plus concrètement de la dynamique du carbone organique dans les sols forestiers, dans la perspective de cette ambition 4 pour 1000.

Photo : Luc Croisé, ONF

COMMENT ASSOCIER DIFFÉRENTS RÉSEAUX D'OBSERVATION POUR MIEUX COMPRENDRE LE CYCLE DU CARBONE EN FORÊT ? EXEMPLE DU MODÈLE CASTANEA

Éric Dufrêne
CNRS, Laboratoire Écologie Systématique et Évolution

Ecologie Systématique et Evolution

Orsay France

25 ANS RENECOFOR

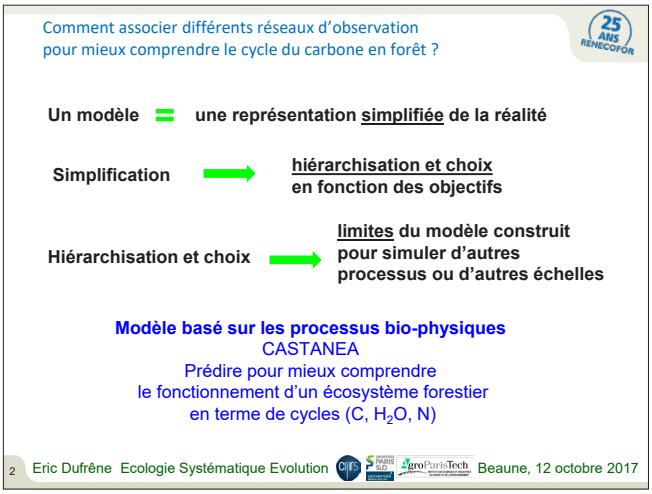
Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ? Exemple du modèle CASTANEA

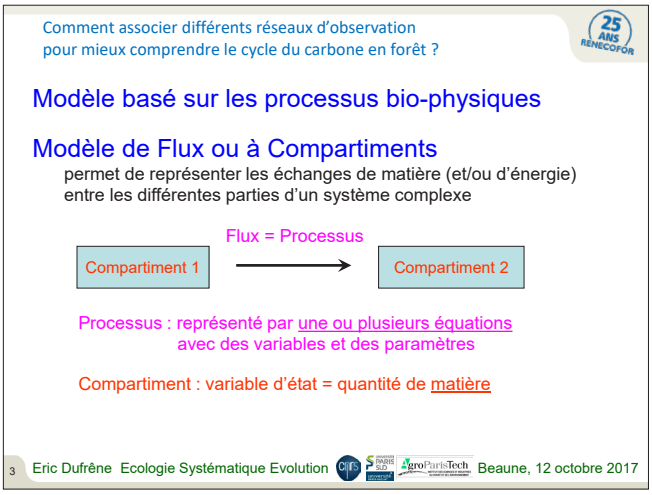
Eric Dufrêne[1], Christophe François[1], Nicolas Delpierre[1], Hendrik Davi[2], Hélène Genet[3], Joannès Guillemot[4], Guerric le Maire[4], Valérie Le Dantec[5], Guillaume Marie[5], Cécile Vincent-Barbaroux[5]

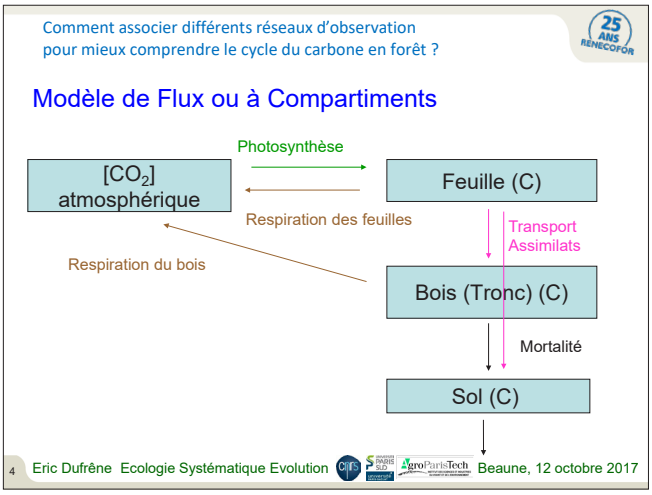
[1]Écologie Systématique Évolution, Université Paris-Sud, CNRS, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 91400 Orsay, France
[2]URFM, INRA, 84914 Avignon, France
[3]Institute of Arctic Biology Univ. of Alaska Fairbanks , Fairbanks AK, USA
[4]UMR Eco&Sols, CIRAD, SupAgro, 34060 Montpellier, France
[5]CESBIO, CNRS, Univ. Paul Sabatier, CNES, IRD, 31401 Toulouse, France
[6]Dept. of Ecological Sciences, Fac. of Earth and Life Sciences, Amsterdam, Pays-Bas
[7]ARCHE-USC, Univ. d'Orléans, INRA, 45 000 Orléans, France

Une des critiques qui est souvent faite aux réseaux d'observation, entre autres par les bailleurs de fonds, c'est « en quoi votre réseau se différencie-t-il des autres et à quoi sert-il par rapport aux autres ? » Dans notre démarche de modélisation nous avons associé au cours du temps, sur une vingtaine d'années, un grand nombre de réseaux pour développer le plus proprement possible notre modèle de fonctionnement CASTANEA, grâce à la fructueuse complémentarité de leurs apports. C'est ce que je vais essayer de vous présenter en l'illustrant par quelques exemples.

Je n'ai cité comme auteurs que les modélisateurs directement concernés, l'équipe de mon laboratoire et d'autres, mais **je tiens à remercier ici** les très nombreux scientifiques et techniciens qui ont contribué de façon décisive aux travaux que je vais survoler. Et je remercie bien sûr tous ceux qui prennent des données : nous savons à quel point c'est contraignant et ingrat..







Quelques rappels sur les modèles

Un modèle c'est une représentation forcément simplifiée de la réalité, c'est pourquoi ça ne marche pas toujours. Quand on construit le modèle on fait des choix de simplification. Ça implique que le modèle peut prédire un certain nombre de choses mais qu'on ne peut pas l'étendre à toutes les situations ; ça dépend des simplifications qui ont été faites. Si on l'étend trop, on commet de grossières erreurs. Donc je ne crois pas au modèle universel qui fait tout.
Ce qui nous est demandé, en tout cas au CNRS, c'est de comprendre, pas de prédire. Ce que nous construisons, à la base, c'est un modèle de compréhension. Mais ensuite, la société est plutôt intéressée par la possibilité de l'utiliser pour prédire et je suis très content quand on peut aussi apporter ça. D'où les discussions sur les comparaisons de modèles (en fin de session 2) : en fait chaque modèle cherche à comprendre un certain nombre de choses, et ensuite on les utilise pour simuler, avec plus ou moins de succès et plus ou moins d'erreur.

Le modèle que nous développons cherche à comprendre le fonctionnement d'un écosystème forestier en termes de cycles (de l'eau, du carbone, de l'azote…). C'est un modèle basé sur les processus, ce qu'on appelle modèle de flux ou à compartiments. En fait c'est assez simple : les compartiments sont les biomasses ou les quantités de matière (de l'eau, du carbone, de l'azote ou ce qu'on veut), et les flux sont les processus. Les processus sont représentés par des équations, avec une ou plusieurs variables d'entrée et un ou plusieurs paramètres. Ça donne des modèles relativement complexes avec de nombreuses équations.

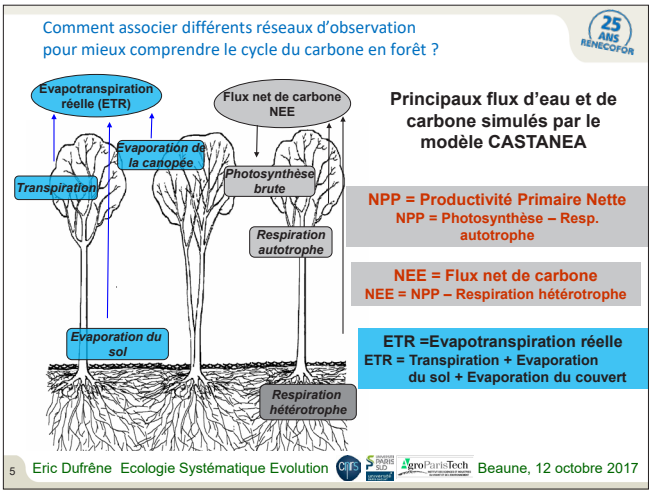
Description de principe de CASTANEA (sur l'exemple du carbone)

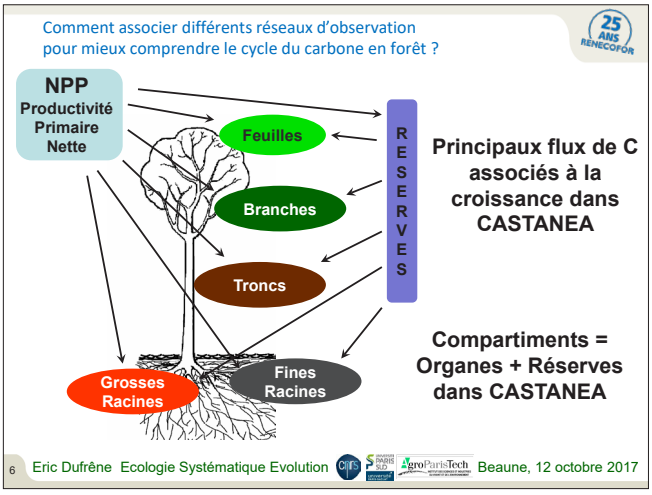
Rentrons dans le concret avec le carbone.
On a un réservoir de carbone atmosphérique ; ce carbone peut rentrer dans la plante par photosynthèse (c'est le processus) et il est ensuite distribué dans la plante entre différents organes (ce sont les différents stocks). Ça peut aussi migrer vers le sol et être stocké dans le sol (il en sera question dans les deux exposés suivants). Et puis il y a d'autres processus, comme la respiration, qui font ressortir le carbone du système.

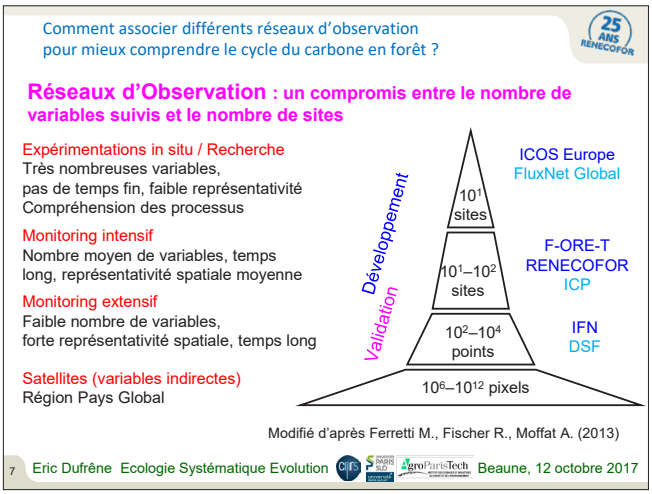
Photo : Jean-Pierre Galeme, ONF

Photo : Luc Croisé, ONF

Le modèle de processus Castanea repose sur les données de sites très instrumentés comme ici, pour le chêne sessile, le site ICOS de Barbeau près de Fontainebleau







Les principaux flux de carbone sont la photosynthèse, la respiration autotrophe (celle des plantes) et la respiration hétérotrophe (celle des microbes du sol). La différence entre la photosynthèse et la somme des respirations, c'est ce qu'on appelle le flux net (NEE) : c'est ce que mesurent par exemple les tours à flux dans les dispositifs ICOS*. Le carbone disponible pour la croissance de la plante, ce qu'on appelle productivité primaire nette (NPP), c'est la différence entre la photosynthèse et la respiration autotrophe.

Pour l'eau on a des flux de transpiration (ce qui sort par les stomates des feuilles), des flux d'évaporation du couvert et des flux d'évaporation du sol dont le total constitue l'évapotranspiration réelle, mesurée aussi sur les sites à flux.

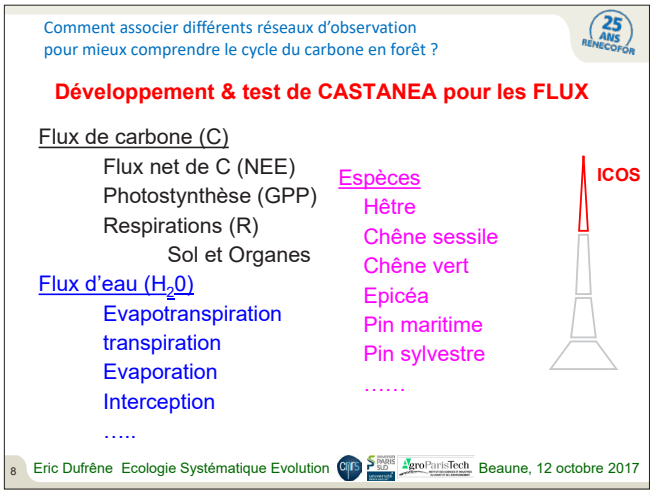
Jusqu'ici c'est assez simple : on est très proche des processus, qui relèvent de la physique ou de la physiologie. Maintenant, pour la distribution de la productivité primaire nette (NPP) entre les différents organes, on arrive dans la biologie et ça se complique : d'abord ça dépend fortement de l'espèce d'arbre, et on sait moins bien comment ça marche. Dans le modèle CASTANEA, on a choisi de représenter un certain nombre de compartiments de carbone (feuilles, branches, tronc, fines racines et grosses racines) et on a aussi un compartiment « de réserves » qui est en quelque sorte délocalisé.

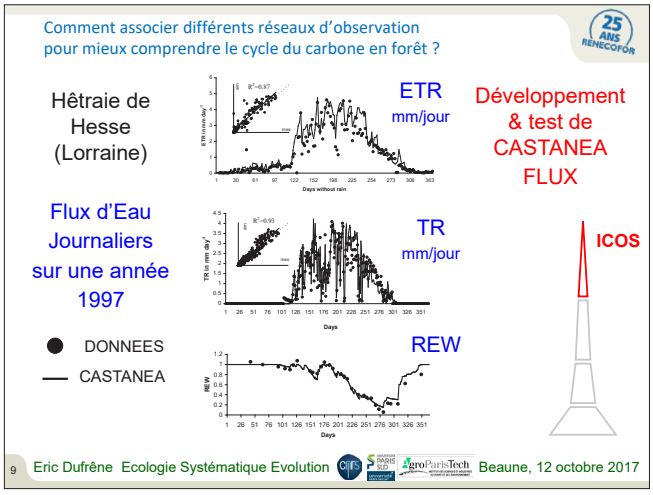
Je ne vais pas plus loin dans la description de CASTANEA.

L'utilisation des réseaux de mesures et d'observation

On retrouve la pyramide déjà présentée par Myriam Legay (en ouverture de la session 2), avec au sommet des réseaux d'expérimentation *in situ* et de recherche, à forte intensité de mesure sur un très grand nombre de variables : en particulier ICOS, qu'on appelle vulgairement les sites à flux. Viennent en-dessous les réseaux de monitoring : monitoring très intensif dans les sites-ateliers du réseau F-ORE-T (qui en fait inclut une partie des sites à flux) ; monitoring intensif avec RENECOFOR, monitoring extensif de la Santé des forêts et de l'Inventaire. Ce que je veux dire ici, c'est qu'en termes de modélisation fonctionnelle (basée sur les processus), les sites très lourdement instrumentés peuvent être utilisés pour tester le modèle mais aussi pour le développer. Quant aux réseaux moins instrumentés, avec une moins forte densité de mesures, on peut tenter de les utiliser pour tester ou valider le modèle mais pas vraiment pour les développer.

Photo : CNRS





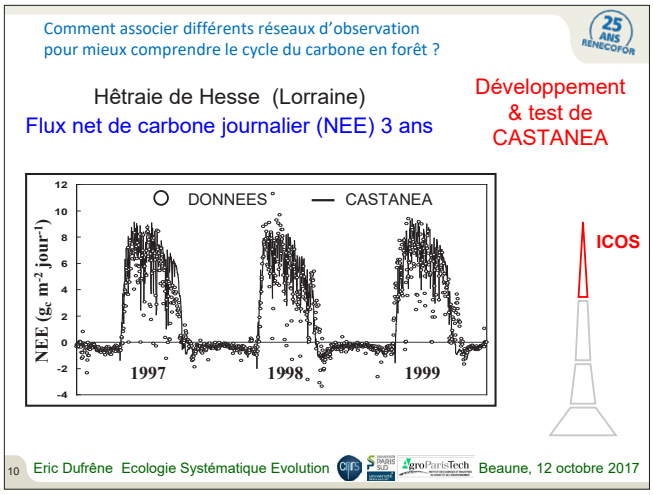
Développement et test de CASTANEA pour les flux

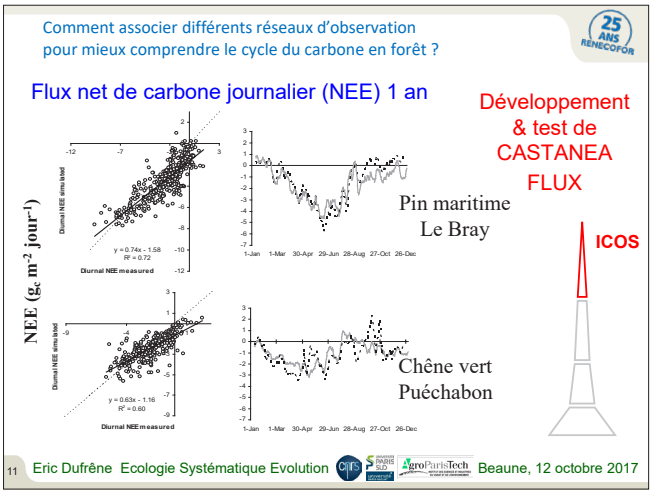
Revenons à CASTANEA, notre modèle de flux. Le développement et les tests se font au niveau des sites de recherche comme les sites ICOS. Pour les différents flux dont j'ai parlé précédemment, le modèle a été développé et testé pour un certain nombre d'espèces : hêtre, chêne sessile, chêne vert, épicéa, pin maritime, et pin sylvestre, mais pas au même niveau de précision. Nous avons plus d'expérience sur le hêtre, le chêne sessile et le chêne vert que sur les autres.

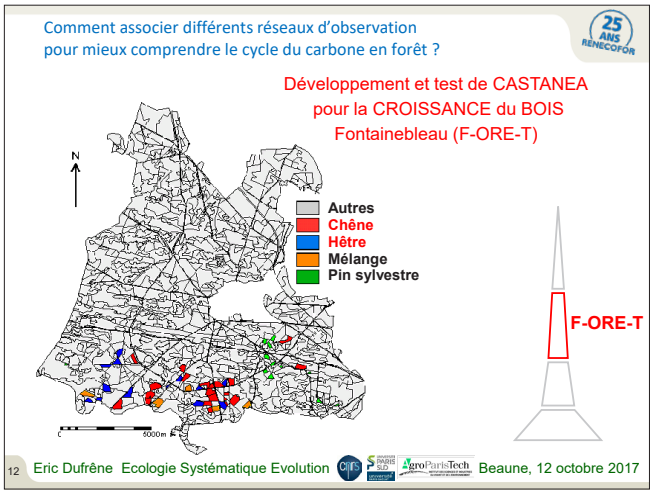
Tout ça a commencé à la fin des années 1990, ça fait pas loin de 20 ans qu'on est sur le coup ! Je vous présente ici des travaux réalisés avec les données du site-atelier / site ICOS de Hesse, qui nous a bien aidés à construire CASTANEA. Cela concerne la partie bilan hydrique avec, de haut en bas l'évolution de l'évapotranspiration, de la transpiration et de la réserve en eau du sol au fil des jours sur l'année 1997 ; les points sont des données mesurées, les traits sont les sorties de modèle. C'est une illustration de la capacité de ce type de modèle à reproduire les flux de transpiration et d'évapotranspiration, et la réserve en eau du sol. En médaillon, les courbes xy montrent qu'on a une assez bonne adéquation. C'est assez facile (disons pas trop difficile), avec des modèles de flux, de simuler des cycles annuels. L'interannuel, c'est une autre paire de manches.

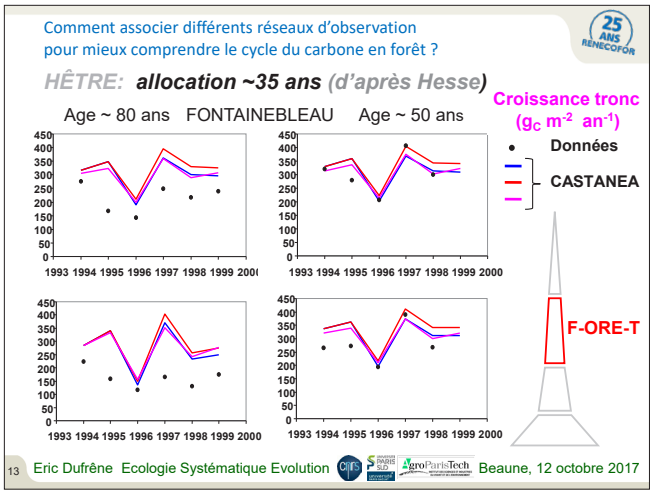
Voyons maintenant, sur le même site, les flux nets de carbone sur 3 années. Là encore, on voit que ça marche à peu près. Mais en regardant dans le détail, on voit qu'à certains endroits le modèle surestime pas mal le flux net et qu'une autre année, par exemple, il va sous-estimer pas mal. Ces petites différences font que le modèle a du mal à représenter les variations interannuelles du bilan de carbone (et l'interannuel en général).

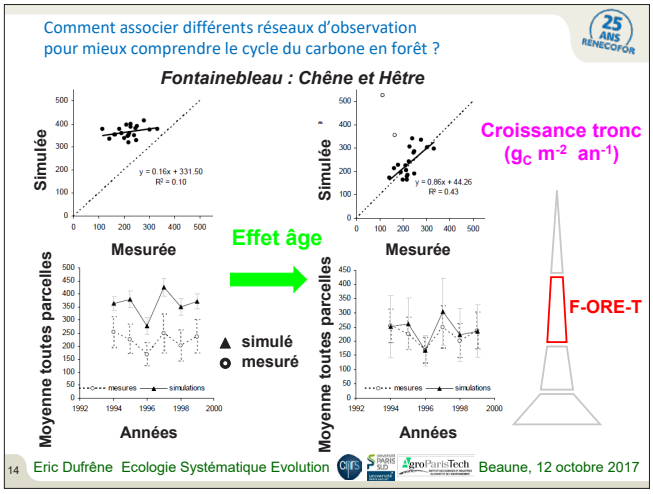
Nous ne nous sommes pas arrêtés au hêtre, nous avons continué avec les autres données disponibles, comme ici sur les sites historiques de flux : Le Bray près de Bordeaux pour le pin maritime et Puéchabon dans l'Hérault pour le chêne vert. À titre d'illustration, voici les résultats sur le flux net de carbone sur une année.











Développement et test de CASTANEA pour la croissance du bois

Je vais maintenant vous montrer ce qui peut se passer quand on change d'échelle, et je ne parle plus ici de flux mais de croissance du bois. Nous avons pris notre modèle, dûment testé sur le site de Hesse où il reproduisait assez bien la croissance, et nous l'avons transposé sur le réseau de parcelles de Fontainebleau qui fait partie du réseau F-ORE-T*. Ce réseau de parcelles a été mis en place pour la télédétection dans les années 90, mais en l'occurrence nous l'avons utilisé pour autre chose.

Ces graphiques présentent la croissance annuelle observée (points) ou simulée (traits) sur des parcelles de hêtre âgé d'environ 50 ans (à droite) ou 80 ans (à gauche), de 1993 à 1999. Les 3 couleurs de courbes correspondent à des petites différences dans le modèle, on ne s'en préoccupe pas ici. Enfin la croissance n'est pas exprimée en m^3 mais en grammes de carbone/m^2/an.

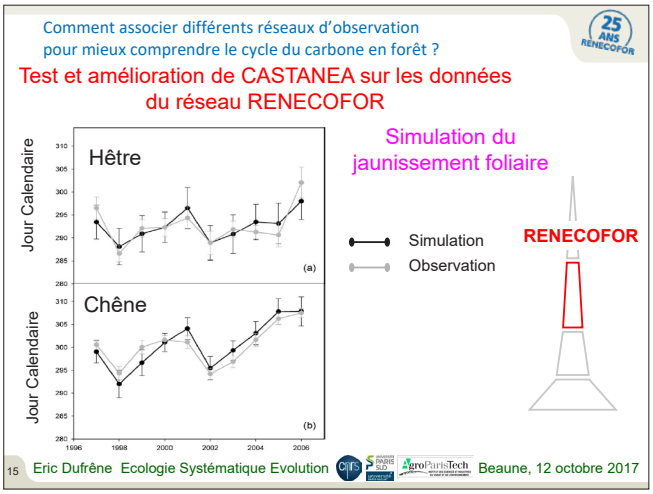
On voit que sur les jeunes parcelles, on était assez bien calé en valeur absolue de croissance. Par contre, sur des parcelles de 80 ans, on avait une assez bonne représentativité de la dynamique interannuelle mais avec un gros décalage. Je rappelle que dans CASTANEA la partie croissance est largement empirique et que donc c'est difficile à transposer. Et là, on a un effet âge évident.

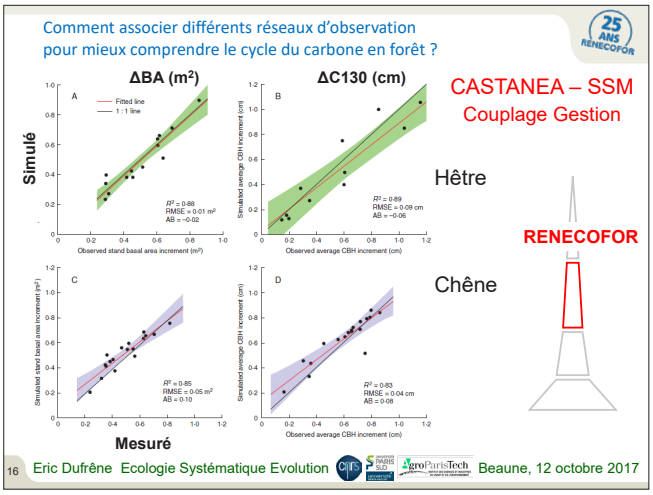
Nous avons refait la comparaison (croissance observée et simulée) pour l'ensemble des parcelles chêne et hêtre de ce même réseau. C'est ce qui est présenté ici à gauche, chaque point représentant la moyenne de toutes les parcelles : on retrouve le décalage ; on voit le biais (graphique du haut).

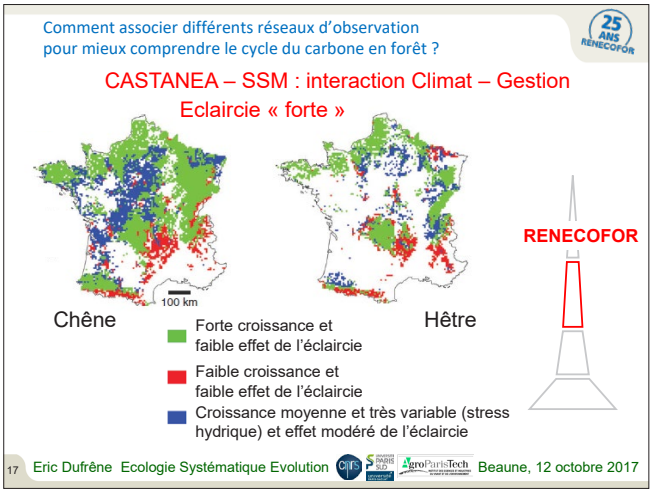
Nous avons donc réfléchi pour prendre en compte les effets âge, notamment en introduisant dans le modèle la quantité de bois qui respire, laquelle varie avec l'âge. La partie du bois qui respire, c'est-à-dire l'aubier, c'est important dans le bilan de carbone. En faisant ça, nous avons amélioré sensiblement nos prédictions. Ce n'est pas de la calibration mais du développement : nous avons vraiment changé les variables et les équations du modèle et après nous l'avons de nouveau testé sur les parcelles.

Photo : Patrick Barré, ONF

Parcelle de chêne et hêtre en forêt de Fontainebleau







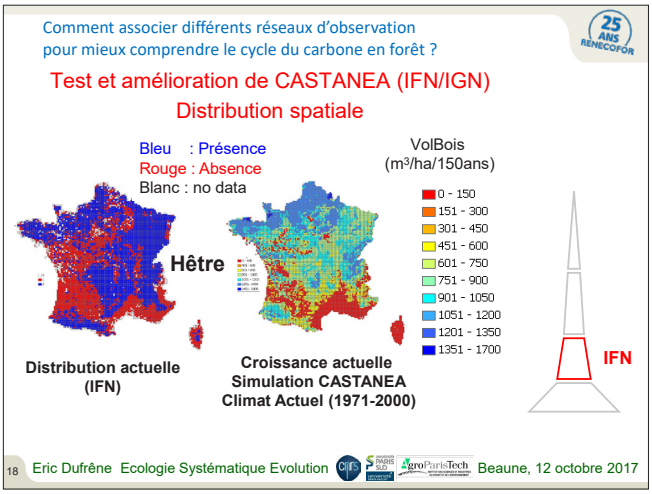
Test et amélioration de CASTANEA sur les données RENECOFOR

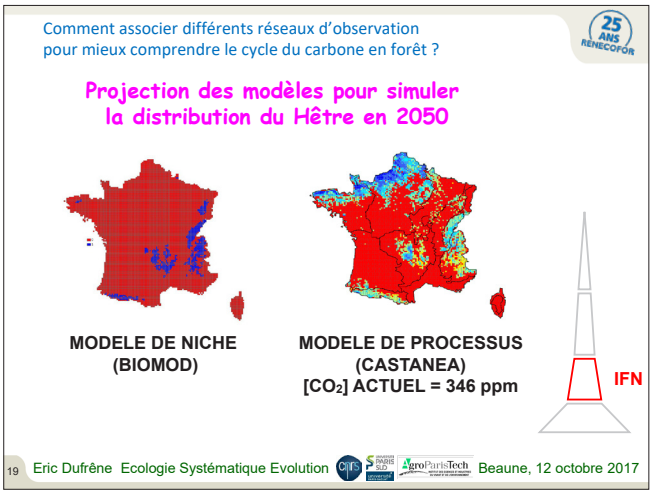
Je change encore d'échelle et j'arrive à RENECOFOR, avec un travail de simulation du jaunissement foliaire réalisé par Nicolas Delpierre dans le cadre de sa thèse (publiée en 2009). Le jaunissement est plus difficile à mesurer que le débourrement et il y avait à l'époque (c'est encore vrai) très peu de modèles capables de le représenter correctement, pour des raisons différentes de mesure et de modélisation (on connaît moins bien les processus). Voici une illustration qui montre qu'en moyenne, sur l'ensemble des placettes chêne et hêtre du réseau RENECOFOR, on arrive assez bien à représenter les variations interannuelles de jaunissement. Mais si on regarde placette par placette ce n'est pas aussi « joli » que ça, pour dire les choses honnêtement.

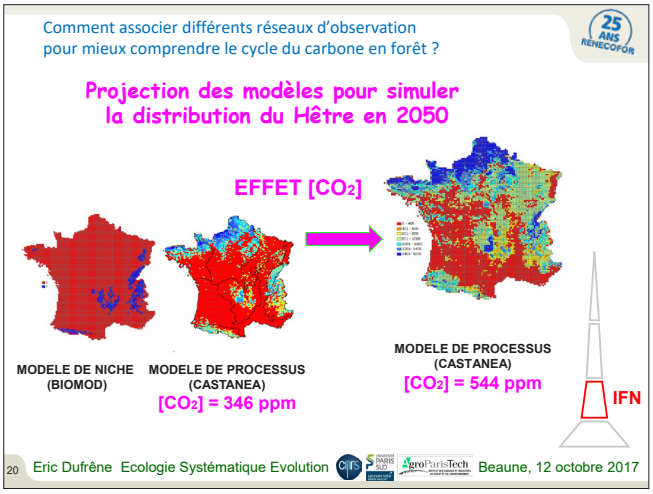
Plus récemment, Joannès Guillemot (pendant sa thèse aussi) a couplé le modèle CASTANEA avec un modèle forestier (dendrométrique), développé par Jean-François Dhôte et publié par Le Moguedec et Dhôte. L'idée est d'étudier, parce que c'est une question de science et une question de société, l'effet des interactions entre la gestion et le climat sur la croissance et éventuellement le dépérissement des forêts. Or CASTANEA, qui fait des flux et de la croissance mais ne prédit que le comportement d'un arbre moyen, ne permet pas de le faire.

Les données de RENECOFOR ont été utilisées pour tester et améliorer ce modèle couplé. C'est ce qui est illustré ici : à gauche pour l'accroissement en surface terrière du peuplement, à droite pour la croissance moyenne en circonférence, chez le hêtre en haut et le chêne en bas, avec les valeurs simulées en ordonnées et les valeurs mesurées en abscisse. Je ne détaille pas.

Grâce à ce travail sur les peuplements RENECOFOR on a pu poursuivre et appliquer des éclaircies. Ici je présente le cas des éclaircies les plus fortes, qui restent relativement modérées en conduisant à un RDI (indice de densité relative) final de 0,4. Joannès a simulé l'effet sur la production du chêne (à gauche) et du hêtre (à droite), sur l'ensemble de la France (en s'appuyant sur les données de l'IFN). Nous avons été un peu surpris : les effets sont relativement faibles, en particulier sur les zones à forte croissance. Sur les zones à forte croissance, on a un faible effet de l'éclaircie pour les deux espèces (vert). Sur les zones de faible croissance, on a aussi un faible effet de l'éclaircie (rouge). C'est sur les zones de croissance intermédiaire que l'effet de l'éclaircie est le plus fort. Notre interprétation c'est que, en gros, c'est lié à la sécheresse : en zone forte croissance on est sur sols profonds et on est rarement limité ; éclaircir n'améliore rien sur la production. En zone de faible croissance, on est tout le temps limité par la sécheresse donc éclaircir ne change pas grand-chose. Par contre, entre les deux, il y a une gamme de situations avec des effets plus nets. Attention : c'est un exercice de style sans prétention de vérité. Je veux juste montrer que, maintenant qu'on a ce modèle couplé, on continue à travailler dessus et on veut aller vers des prédictions plus fiables.







Test et amélioration de CASTANEA sur les données IFN – Distribution spatiale

En 2012 il y a eu un gros travail d'intercomparaison de modèles[1] sur la prédiction des changements d'aire de répartition, confrontant une gamme de 8 modèles dont CASTANEA. Or CASTANEA a la spécificité de ne pas prédire de distribution ; il prédit de la croissance. Comment avons-nous fait pour simuler des distributions ? À gauche vous voyez la distribution actuelle du hêtre pour l'IFN. Nous avons regardé les différents niveaux de croissance et nous avons pensé qu'en seuillant à un certain niveau (cette fois c'est du volume de bois en m³/ha sur 150 ans, donc sur une révolution), on pouvait obtenir une carte, disons de croissance seuillée, qui ressemblait bien à cette carte de distribution.

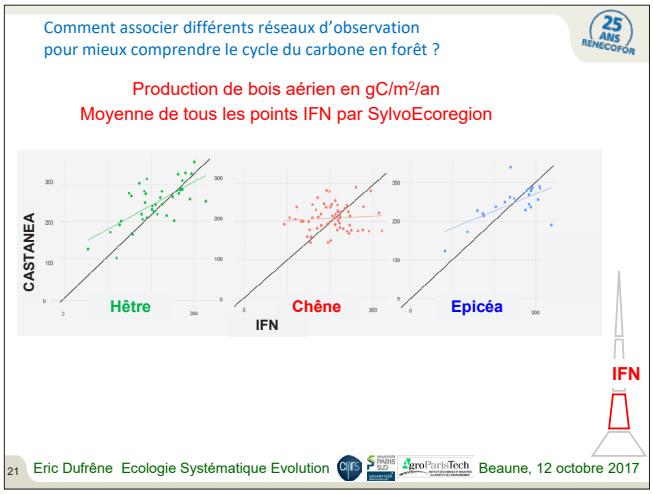
Dans un deuxième temps, nous avons utilisé ça pour faire des projections avec les climats futurs supposés. L'illustration concerne la simulation de la distribution du hêtre en 2050 : à gauche, avec un modèle de niche (ici c'est BIOMOD, mais j'aurais pu en prendre un autre) et à droite, avec CASTANEA, en bloquant le CO_2 atmosphérique à son niveau actuel (350 ppm). On voit que l'aire du hêtre se rétrécit beaucoup, et qu'elle « résiste » un peu mieux selon CASTANEA, en particulier là où il pleut plus. Ça c'est des petites différences entre modèles.

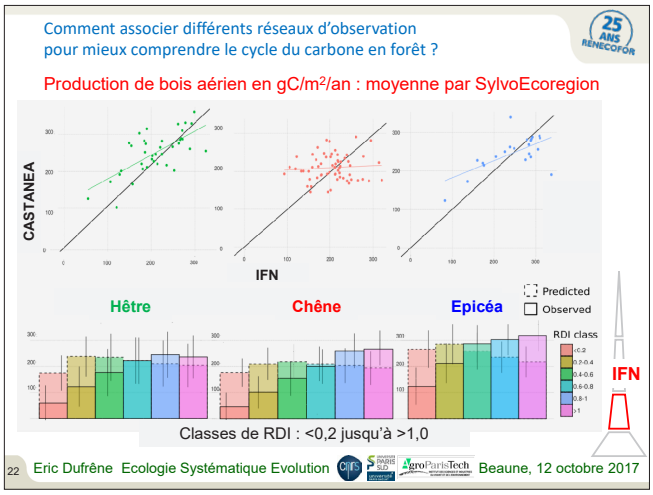
Là où ça devient plus intéressant, en tout cas pour moi, c'est que lorsqu'on fait la même chose en passant de 350 ppm à 540 ppm de CO_2 dans l'atmosphère, la distribution du modèle CASTANEA pour le hêtre change beaucoup ; or cet effet du CO_2 n'est pas pris en compte par les modèles de niche et ne peut pas l'être parce qu'il n'y a pas de gradient de CO_2 actuellement sur les zones climatiques. Je ne prétends pas que ce qui sort de CASTANEA est meilleur, je n'en sais rien et je ne veux pas parler de comparaisons, ce n'est pas le but ici. Mon message, c'est qu'un modèle comme CASTANEA, quand il est validé, permet d'éteindre ou allumer des effets pour les tester de manière indépendante ou en combinaison maîtrisée. On peut allumer ou éteindre l'effet CO_2, ou un effet sécheresse, ou un effet température, et on peut étudier les interactions entre ces variables. Il y a peu de modèles, en dehors des vrais modèles de processus, qui en soient capables. .

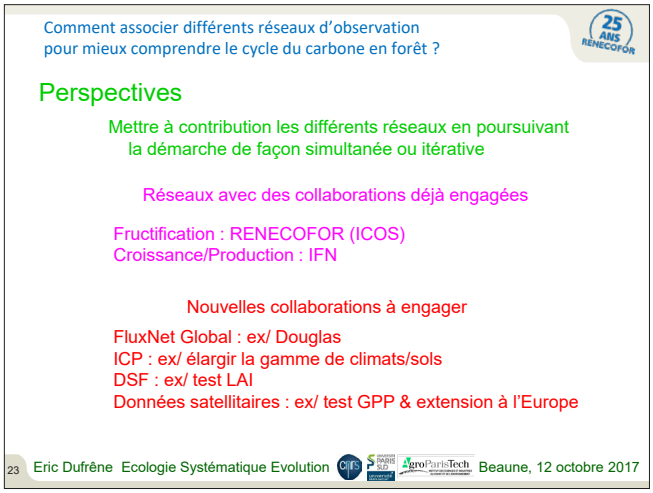
Photo : Luc Croisé, ONF

Données de base pour tester le modèle, les mesures de croissance (techniques en test sur la placette CHS77)

1 Cheaib A. Badeau V., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrene E., Francois C., Gritti E.S., Legay M., Page C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P., 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. Ecology Letters, vol. 15 (6), pp.533 - 544







Test et amélioration de CASTANEA sur les données IFN – Production de bois aérien

Nous avons aussi cherché à reproduire la croissance en bois aérien observée par l'IFN à l'échelle de la France et par SylvoEcoRégion (SER). Il se trouve que CASTANEA reproduit très bien la croissance moyenne à l'échelle de la France, mais pas au niveau SER. Vous voyez ici la croissance en bois aérien de chaque SER simulée par CASTANEA, en comparaison de l'estimation de l'IFN, pour le hêtre, le chêne et l'épicéa. Chaque point représente la moyenne de toutes les placettes d'une SER. Au mieux, le résultat est biaisé (hêtre, épicéa), au pire, il ne reproduit absolument pas les différences de croissance observées par l'IFN (chêne). Nous cherchons donc à comprendre pourquoi ; c'est un travail en cours.

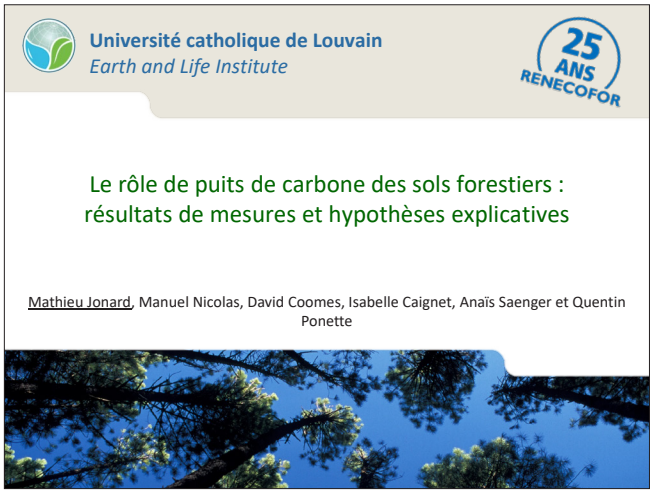
Par exemple, nous avons ventilé la production simulée et observée par classes de RDI (les densités) ; le RDI varie de 0,2 pour le plus bas, à 1,2 pour le plus haut. En gestion normale, il est à 0,6 – 0,8 (barres bleu turquoise) et on voit que pour le hêtre et le chêne il n'y a pas de différence dans cette classe entre les pointillés et le trait, ce qui signifie que pour une gestion normale CASTANEA reproduit bien la croissance. C'est logique : c'est là-dessus qu'il a été développé. On est dans le même cas qu'avec l'âge lorsqu'on est passé de Hesse à Fontainebleau, sauf qu'ici ce sont des effets densité (gestion). Notre idée c'est que, là encore, la quantité de biomasse de bois vivant (l'aubier) pourrait varier alors que le modèle la suppose simplement proportionnelle, en gros, à la quantité de bois total avec un effet âge. Peut-être que, quand on coupe plus, la proportion d'aubier change et ça respire beaucoup plus ; ça expliquerait qu'avec le modèle on ne retrouve pas cet abaissement de croissance aux faibles densités. Mais ce n'est qu'une hypothèse, et c'est compliqué à tester.

Perspectives

Ne croyez pas que le cheminement soit linéaire. En changeant quelque chose dans le modèle pour l'améliorer sur les données IFN, on peut dégrader les prédictions aux échelles/étapes précédentes. On procède donc en boucles itératives et tous les réseaux sont mis à contribution, selon la question qu'on se pose. Les perspectives ? Continuer. Car il n'y a pas, en France ou en Europe, de modèle de processus qui sache faire ce qu'on vise avec CASTANEA. Si on y arrive, c'est une avancée considérable pour répondre à de nombreuses questions posées par les changements climatiques. Actuellement, nous travaillons sur la fructification avec RENECOFOR, et sur la croissance/production avec l'IFN. Nous aimerions aussi explorer les effets densité grâce aux données du GIS Coop*, un des rares réseaux sylvicoles avec des densités faibles, mais ses peuplements sont encore un peu jeunes.
Nous avons quelques projets avec d'autres réseaux : le réseau FluxNet* aux USA, par exemple, pour adapter CASTANEA au Douglas (il n'y a pas de site à flux Douglas en Europe). On a vu (discussion de la session 2) que les transpositions de modèle entre les USA et la France peuvent être hasardeuses, mais ce n'est pas le cas sur les flux parce qu'on est proche des processus. Nous envisageons aussi d'élargir la gamme pédoclimatique en travaillant sur le PIC Forêts* ; nous aimerions tester l'indice foliaire (LAI), un paramètre important du modèle, avec les données DSF sur le dépérissement, par exemple. Et il y a bien sûr les données satellitaires, dont j'ai dit (session 2) qu'elles ont leurs limites, mais qui peuvent être profitables si on veille à la manière de les utiliser... Merci.

LE RÔLE DE PUITS DE CARBONE DES SOLS FORESTIERS : RÉSULTATS DE MESURES ET HYPOTHÈSES EXPLICATIVES

Mathieu Jonard
Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute

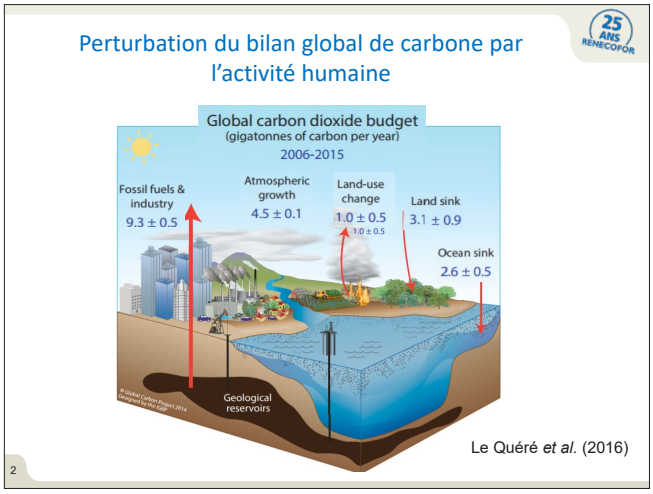


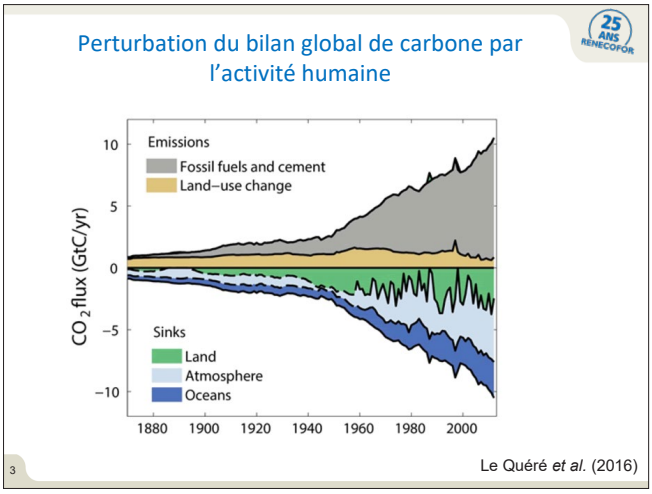
Au nom d'une petite équipe de recherche, je vais vous parler des sols forestiers et de leur rôle dans le cycle du carbone. Agissent-ils comme des puits ou des sources et quels sont les processus en jeu ?

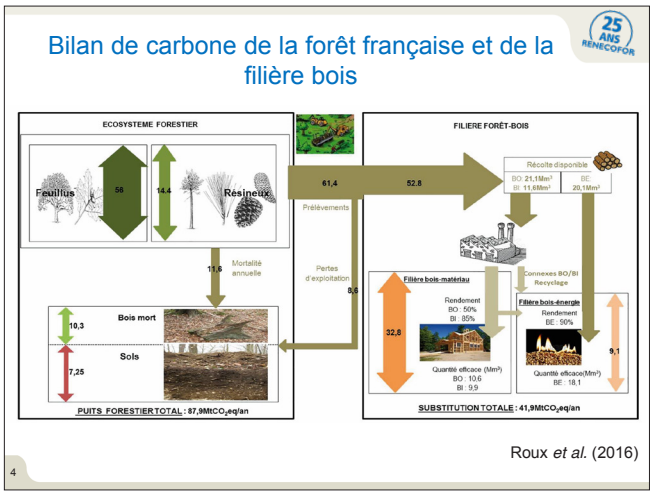
Pourquoi cette étude ?

L'activité humaine perturbe fortement le cycle du carbone en générant des émissions par combustion des énergies fossiles, et aussi par changement de l'utilisation des terres.

Ainsi les émissions de CO_2 ont augmenté peu à peu depuis la révolution industrielle et de manière accélérée à partir du milieu du 20e siècle. Ce carbone émis se retrouve dans la végétation, les océans et de plus en plus dans l'atmosphère, ce qui génère le réchauffement climatique que l'on connaît. On peut dire en moyenne **à l'échelle planétaire** qu'un tiers du carbone émis se retrouve dans la végétation.

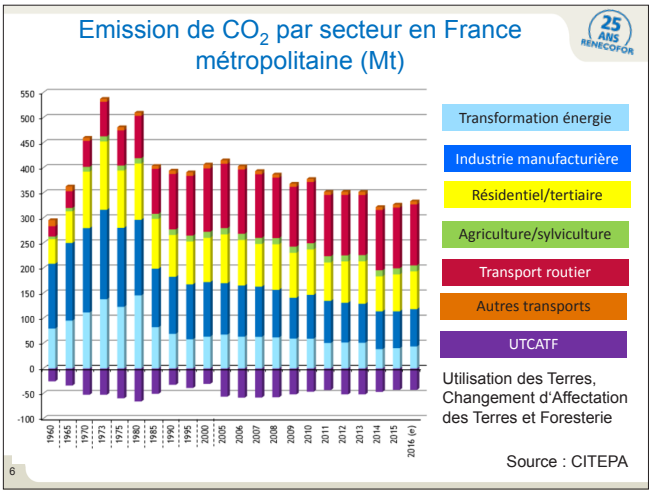


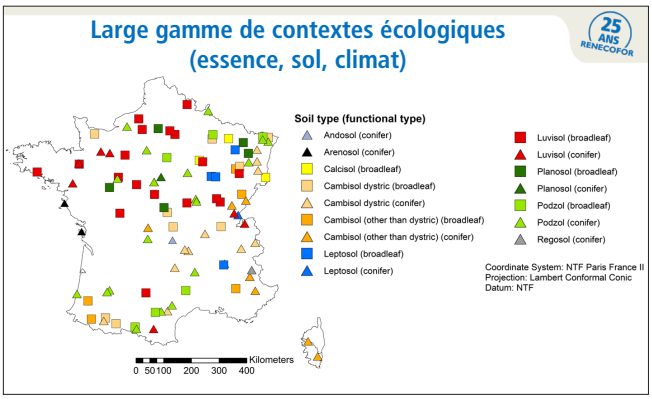


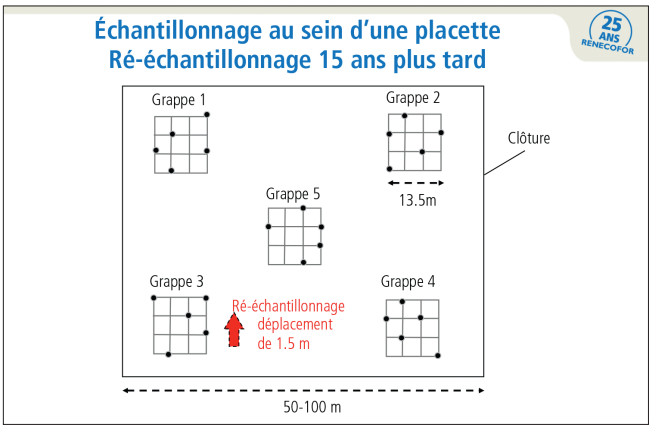


À l'échelle française, Christine Deleuze en parlait en introduction, une étude INRA/IGN a montré qu'environ 20 % des émissions de CO_2 sont « fixées » par la forêt, en tenant compte des effets de substitution de la filière bois.

Pour ce qui relève des écosystèmes forestiers uniquement, les auteurs de l'étude ont montré qu'environ 8 % du carbone fixé par la végétation se retrouvent dans le sol. Cette estimation de 8 % est basée sur une analyse approfondie de la littérature, mais elle mérite d'être affinée, notamment en ce qui concerne la comptabilisation des émissions de CO_2 en France dans le cadre du protocole de Kyoto.







Rappelons que les pays signataires du protocole de Kyoto se sont engagés à limiter leurs émissions au niveau de 1990 pour la période 2008-2012. Et pour la période d'engagement supplémentaire 2013-2020, ils ont l'ambition plus grande de les réduire de 20 % par rapport au niveau de 1990, avec la possibilité de prendre en compte, de manière optionnelle, l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF). C'est ce que la France a choisi de faire : elle prend en compte cette rubrique qui, contrairement à toutes les autres agit comme un puits. En ce qui concerne les sols forestiers, l'hypothèse qui a été faite c'est que les sols ont un rôle neutre vis-à-vis des émissions de CO_2. Mais il fallait vérifier ou étayer cette hypothèse et c'est pourquoi le ministère de l'Agriculture a commandé et financé cette étude.

Objectifs et données utilisées

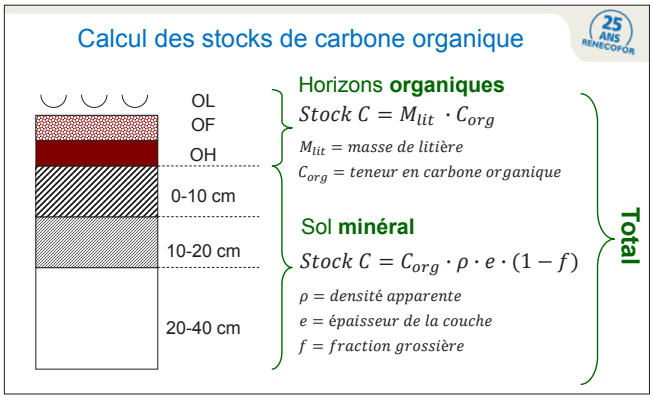
Concrètement, l'objectif de l'étude était de répondre à 3 questions :
- Les sols forestiers français sont-ils des sources ou des puits de carbone ?
- Quel est le taux de séquestration/émission de carbone pour le sol ?
- Quels sont les facteurs et processus responsables des évolutions observées ?

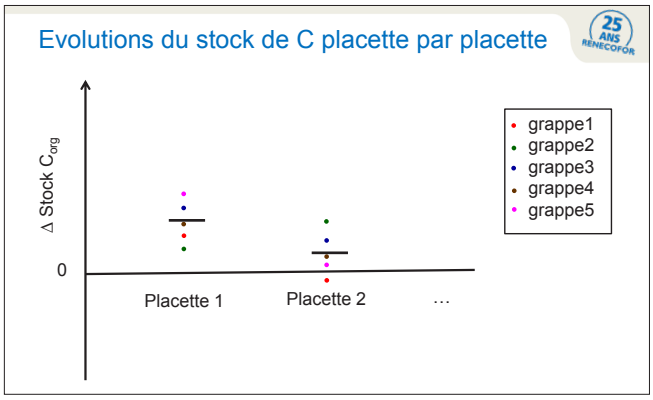
Pour y parvenir, nous disposions des données du réseau RENECOFOR, qui couvre une large gamme de contexte écologiques en termes d'essences, de sols et de climats. Vous avez ici une carte des placettes, qui montre la diversité des sols.

Nous disposions des données de deux campagnes d'échantillonnage des sols. La première campagne a eu lieu entre 1993 et 1995. Au sein d'une placette, l'échantillonnage est réalisé par « grappes » : 4 grappes en périphérie et une au centre. Chaque grappe repose sur une grille à 16 nœuds et de ces 16 nœuds on choisit 5 points représentatifs de la grappe. La seconde campagne, environ 15 ans plus tard (de 2007 à 2012), a suivi le même plan d'échantillonnage, sauf que les grappes ont été décalées de 1,5 m dans une direction fixée.
Le prélèvement des échantillons s'est fait par couche et tous les échantillons d'une même grappe ont été rassemblés de manière à faire un échantillon composite de chaque couche. Selon les sites, on a 1 à 3 couches organiques, et le sol minéral a été prélevé par couches de profondeur fixée : 0-10 cm ; 10-20 cm ; 20-40 cm.

La teneur en carbone organique a été déterminée par combustion sèche pour les horizons organiques et la couche 0-10 cm, et par la méthode Anne, qui est une adaptation de la méthode Walkley-Black pour les couches 10-20 et 20-40 cm.

Photo : Luc Croisé, ONF



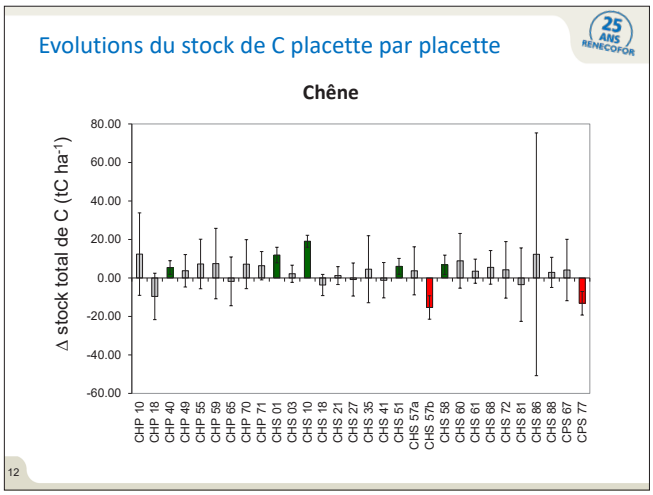


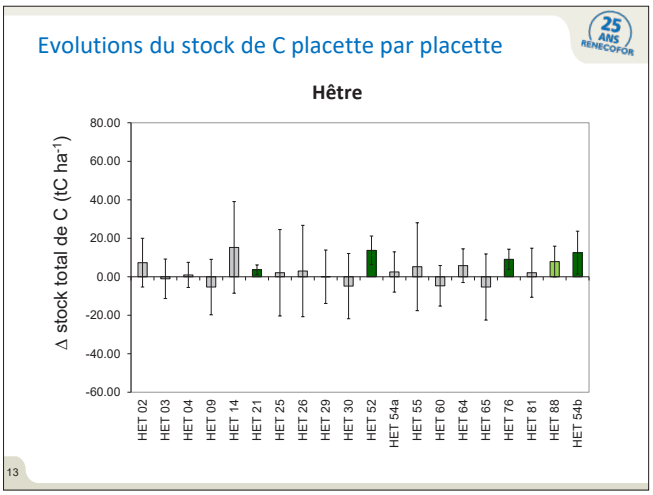
Calcul de la variation du stock de carbone

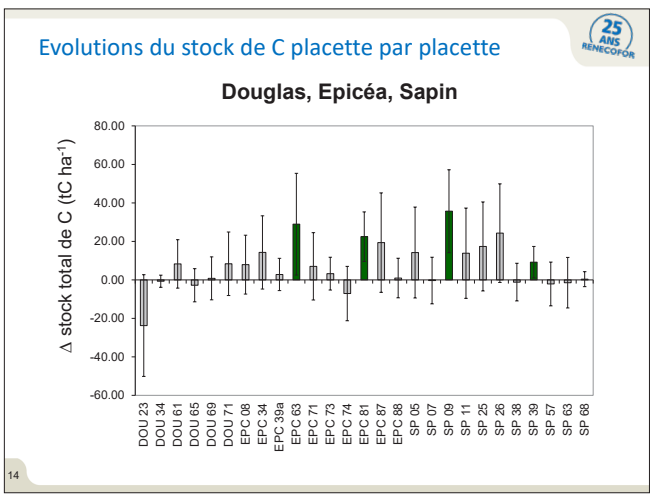
Nous avons commencé par calculer les stocks pour les deux campagnes. Pour les horizons organiques, c'est facile : c'est la masse de litière multipliée par la teneur en carbone organique. Pour le sol minéral, c'est la teneur en matière organique multipliée par la densité apparente et l'épaisseur de la couche, en tenant compte aussi de la fraction grossière qui n'est pas prise en compte dans la mesure de la densité apparente.

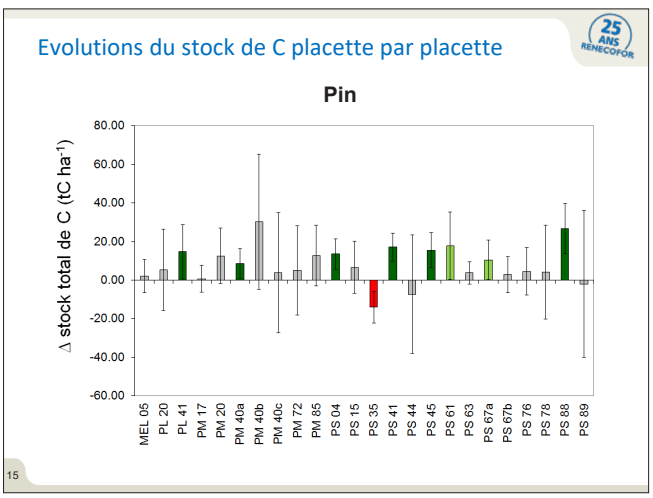
Ce calcul nous a permis d'estimer la variation de stock entre les deux campagnes. Et grâce aux répétitions au sein d'une même placette nous avons pu tester si cette variation de stock était significativement différente de 0 ou pas, d'abord placette par placette.

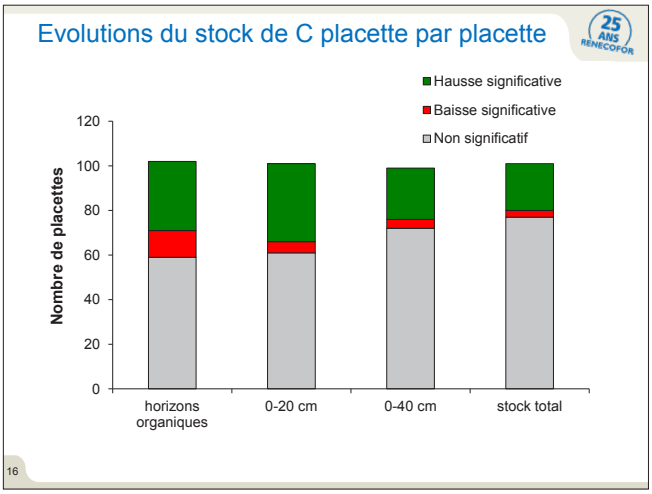
Voici le résultat, en ce qui concerne la variation de stock total, pour les placettes de chêne, pour le hêtre, pour le Douglas, l'épicéa et le sapin, et enfin pour les pins : quand l'évolution est significative à la hausse, elle est représentée en vert, et quand c'est significatif à la baisse, c'est en rouge.

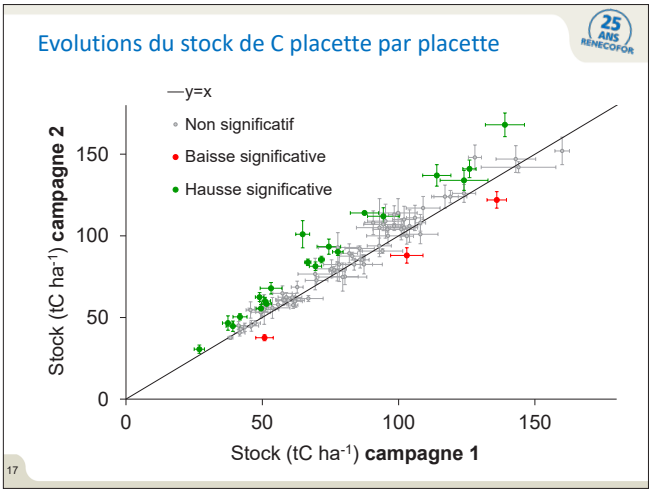


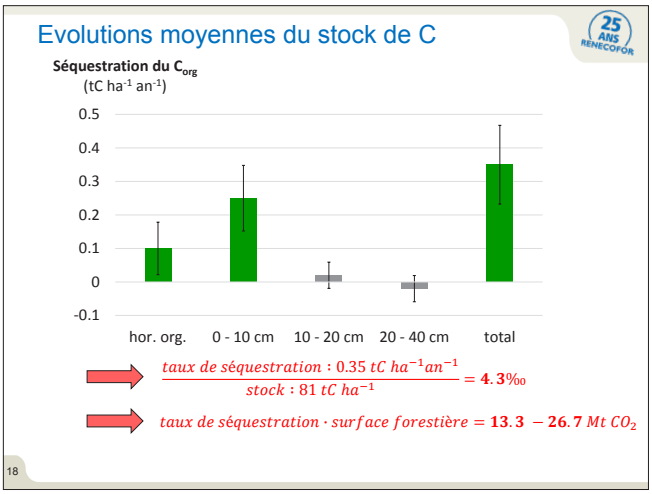












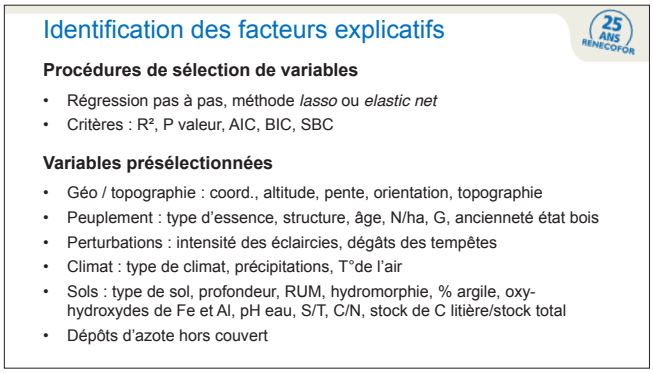
Les résultats par placette

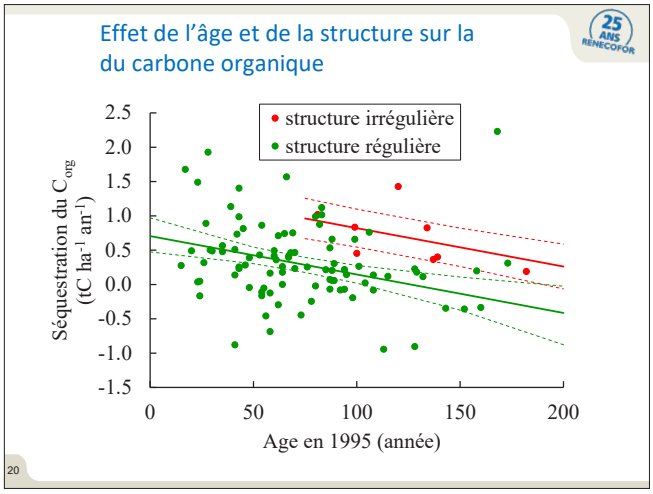
Regardons maintenant couche par couche : examinons la proportion de placettes où on a une évolution significative à la hausse (en vert) ou à la baisse (en rouge) et celle des placettes où on n'a pas d'évolution significative.
On voit que les évolutions significatives sont plus nombreuses pour les couches organiques ; ça diminue à peine dans la couche 0-20 cm, et bien plus nettement sur 0-40 et c'est pour le stock total qu'on a le moins d'évolutions significatives. On voit aussi que les évolutions significatives sont en grande majorité des évolutions à la hausse, mais que les évolutions non significatives restent prépondérantes.

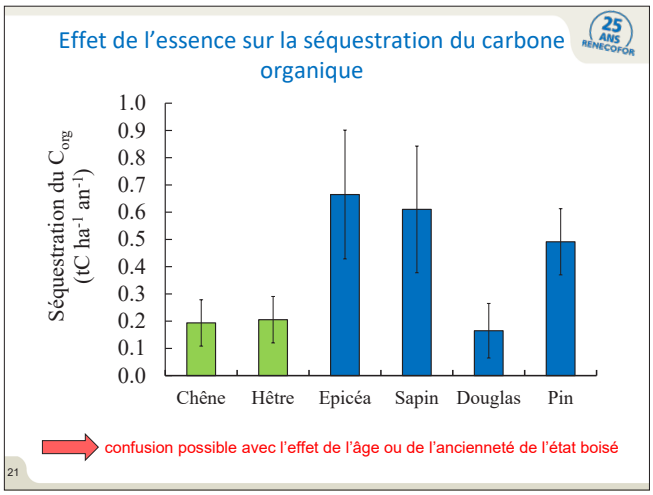
Une autre manière de représenter les choses, ici pour le stock total, c'est de mettre en relation le stock à la campagne 2 avec le stock à la campagne 1. Tous les points qui se trouvent au-dessus de la diagonale concernent des placettes ou le stock s'est accru, mais seules les placettes représentées par des points verts ont une évolution significative. De même, tous les points qui sont sous la diagonale ont une évolution à la baisse, mais qui n'est significative que pour 3 placettes (points rouges). Vous pouvez voir avec la barre d'erreur qu'il y a une forte incertitude, due à l'hétérogénéité spatiale au sein d'une placette ; 15 ans c'est une durée qui est encore relativement limitée pour mettre en évidence une évolution à l'échelle de la placette.

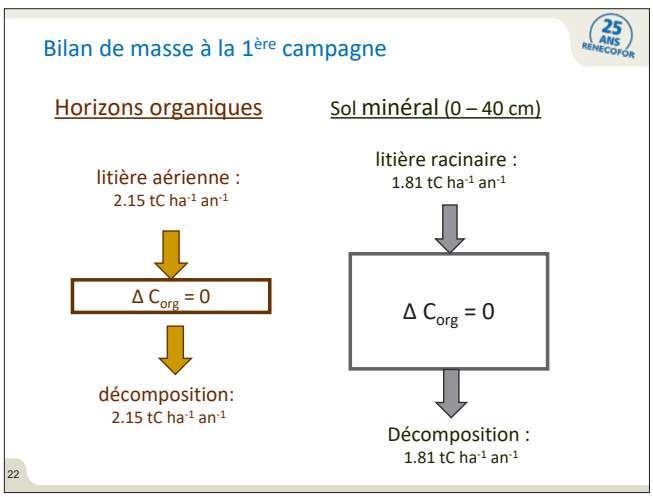
Les résultats à l'échelle du réseau

C'est pourquoi nous avons aussi fait des analyses à l'échelle du réseau en regroupant l'ensemble des placettes. Ces analyses ont montré que la séquestration du carbone, j'entends par là la variation de stock rapportée au nombre d'années entre les deux campagnes, cette séquestration est significative à l'échelle de la France. Pour les horizons organiques, elle est de l'ordre 0,1 tonne de carbone par hectare et par an. Pour l'horizon 0-10 cm, c'est-à-dire l'horizon minéral superficiel, elle s'élève à 0,25 tC/ha/an. Il n'y a pas d'évolution significative entre 10 et 40 cm et au total on a une séquestration de C qui est de l'ordre de 0,35 tC/ha/an.
Qu'est-ce que ça représente ? Si on rapporte ça au stock total moyen calculé pour la première campagne, ça équivaut à 4 pour 1000 pour les sols forestiers du réseau. Si je fais un exercice un peu plus périlleux, en considérant que le réseau est représentatif de la forêt française, et que je multiplie ce taux de séquestration par la surface forestière, j'obtiens un chiffre qui est de l'ordre de 20 millions de tonnes de CO_2 fixées chaque année. C'est un chiffre qui varie, si on tient compte de l'incertitude, entre 13 et 27 millions de tonnes de CO_2 par an et ça représente environ 5% des émissions. C'est juste pour donner un ordre de grandeur.
Ceci dit, nos estimations trouvent une petite confirmation chez les Allemands qui ont fait, eux, l'analyse sur un réseau systématique : ils n'ont pas de séquestration dans les couches holorganiques mais la séquestration obtenue pour la couche 0-10 cm est du même ordre de grandeur ou même plus (je crois que c'est de l'ordre de 0,22 tC/ha/an). Nous sommes vraiment au même niveau.









Les facteurs explicatifs de la séquestration du carbone dans le sol

Pour identifier les facteurs qui sont responsables de cette séquestration du carbone, ou bien différencier les placettes vis-à-vis de cette séquestration, nous avons utilisé toute une série de variables qui caractérisent la position géographique, le peuplement, le sol… et nous avons mis en œuvre une procédure statistique de sélection de variables pour faire ressortir les facteurs les plus importants. Il en ressort deux facteurs : l'âge du peuplement et la structure du peuplement.

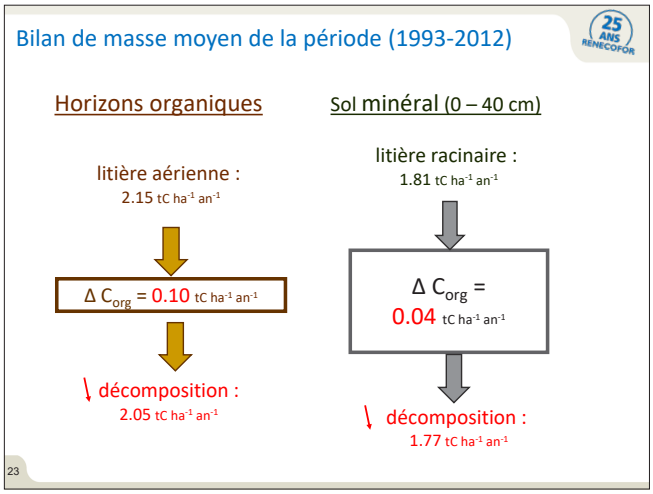
La séquestration du carbone dans le sol a tendance à diminuer avec l'âge du peuplement. Je dis bien la séquestration, pas le stock. Le stock de carbone du sol, lui, augmente avec l'âge du peuplement, mais il augmente moins vite à mesure que le peuplement vieillit. La séquestration diminue donc avec l'âge du peuplement et elle est plus élevée dans les structures irrégulières que dans les structures régulières. Nous avons peu de placettes en structure irrégulière mais vous voyez que quasiment tous les points sont plus hauts que la moyenne des points pour la structure régulière.

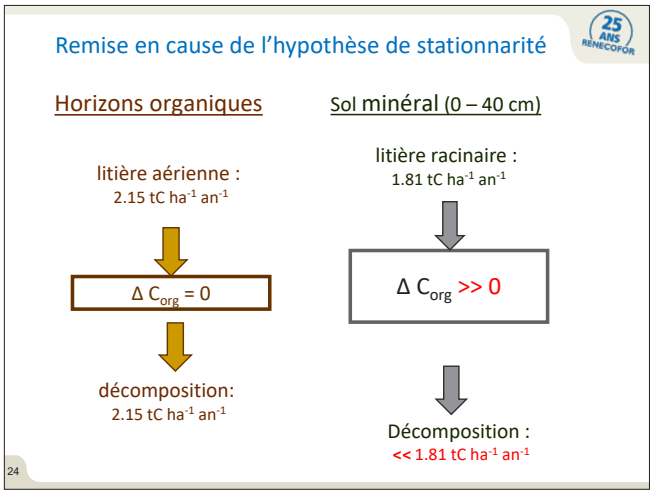
De l'analyse ne ressort pas l'effet essence. Pourtant quand on s'intéresse à l'effet essence, on voit que les peuplements résineux séquestrent dans leurs sols nettement plus de carbone que les peuplements feuillus. Nous supposons que cet effet ne ressort pas de l'analyse statistique parce qu'il est confondu avec un effet âge : les résineux sont en général plus jeunes et ont un historique de boisement plus récent. Il y a donc un effet essence en forme de point d'interrogation : l'effet essence est-il bien réel ou confondu avec l'effet âge et ancienneté de l'état boisé ?

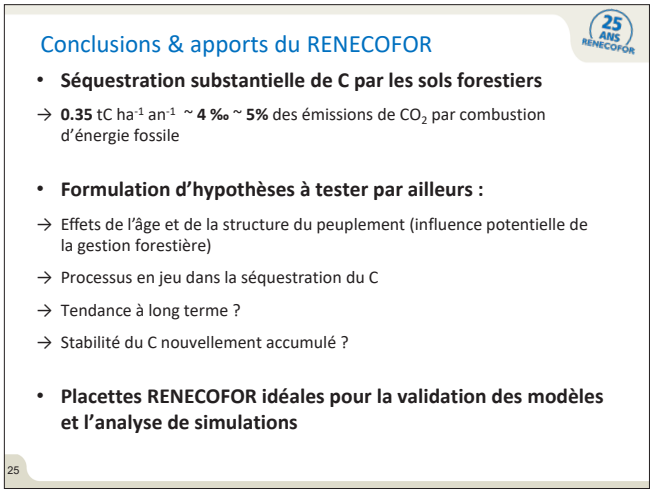
Quels pourraient être les processus sous-jacents ?

Pour comprendre les processus qui génèrent cette séquestration de carbone, nous avons appliqué une approche par bilan de masse. Nous l'avons appliquée à la partie aérienne (les horizons organiques) et à la partie souterraine (le sol minéral) en considérant deux moments clés : le début de la période d'observation (la 1re campagne de prélèvements) et le milieu de la période d'observation (entre les deux campagnes).

En ce qui concerne le bilan de masse réalisé à la première campagne, nous nous sommes basés sur les mesures du réseau pour estimer l'apport de litière aérienne. Et comme nous n'avions pas d'estimation pour la litière racinaire, nous avons utilisé des relations empiriques à partir des retombées de litière aérienne. Et nous avons fait une hypothèse assez forte de stationnarité, en considérant qu'à la première campagne les stocks étaient à l'équilibre (pas de variation de stock). Du coup, il était facile de déduire la perte de carbone par décomposition : s'il n'y a pas de variation de stock, elle est égale aux apports de litière.







Puis nous avons essayé de voir comment ces flux ont évolué au cours du temps, s'ils ont évolué au cours de la période d'observation. Pour les litières aériennes, nous n'avons pas détecté de tendance dans les mesures du réseau RENECOFOR, donc nous n'avons pas considéré de tendance à ce niveau-là et nous en avons déduit, par hypothèse, qu'il n'y avait pas non plus de tendance au niveau des litières racinaires.
Mais en ce qui concerne les pertes par décomposition, comme la qualité de la litière s'était dégradée, notamment au niveau du rapport C/N (diminution relative de la teneur en azote), nous avons estimé, sur la base de modèles relativement simples une réduction plausible de la vitesse de décomposition. Finalement, nous obtenons par cette méthode un taux de séquestration pour les horizons organiques qui est du même ordre de grandeur que ce qu'on observe (environ 0,1 tC/ha/an).
Par contre, en ce qui concerne le sol minéral, cette approche de bilan de masse conduit à une estimation de séquestration du C nettement inférieure à ce qui est observé.

Ça nous a donc conduits à remettre en question notre hypothèse de base sur le fait que les sols étaient à l'état stationnaire à la première campagne. Du coup, on explique plutôt la séquestration de carbone comme résultant d'un déséquilibre préexistant entre les apports de litière et la décomposition. Et cette explication est bien corroborée par la diminution du taux de séquestration du carbone avec l'âge puisque, pour les peuplements les plus âgés on s'approche de plus en plus de l'état d'équilibre.

Conclusion

En conclusion, les données du réseau ont permis de répondre au moins partiellement à une question d'actualité en ce qui concerne le cycle du carbone. Les écosystèmes forestiers agissent-ils comme des puits de carbone ? Pour moi la réponse est oui. Et quel est l'ordre de grandeur ? C'est l'ordre de grandeur du 4 pour 1000.

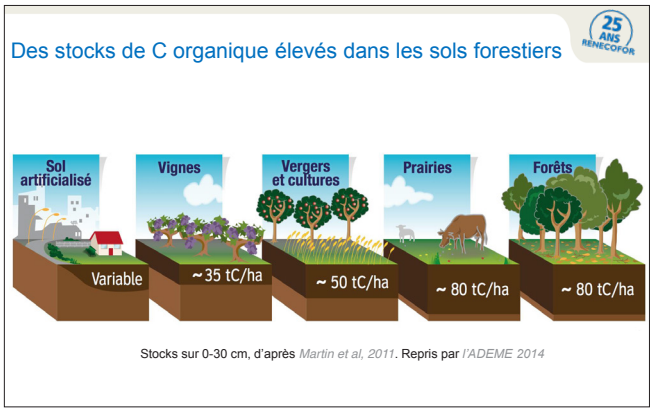
Par ailleurs cette étude a permis de formuler des hypothèses, et c'est là pour moi un des grands intérêts du réseau : il permet aux chercheurs de se poser les bonnes questions. Les hypothèses ici sont relatives à l'effet de l'âge, de l'essence, de la structure du peuplement et tous ces effets devront être vérifiés et testés de manière plus approfondie dans des dispositifs de recherche en conditions contrôlées. Mais il reste aussi des questions : les tendances vont-elles se poursuivre à long terme, quelle est la stabilité du carbone nouvellement accumulé ?

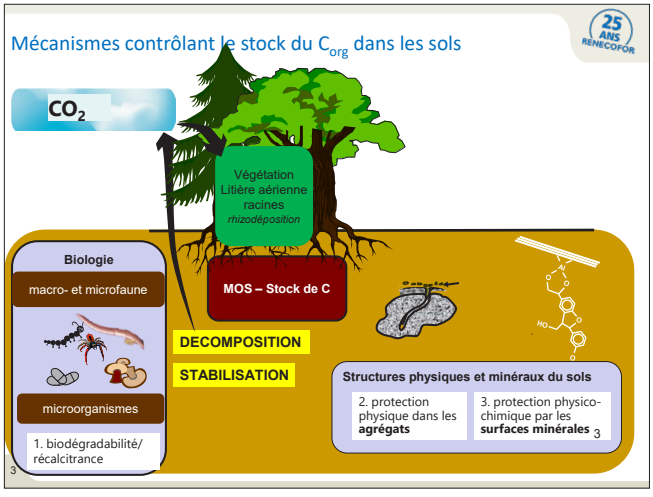
Pour finir je dirai que les données du réseau RENECOFOR m'ont apporté beaucoup, m'ont permis de faire de nombreux travaux de recherche, et je vous en suis très reconnaissant à vous qui avez collecté les données jour après jour. Merci aussi à Erwin Ulrich et à Manuel Nicolas de m'avoir donné l'opportunité de traiter ces jeux de données très précieux et de grande qualité. Je compte bien les utiliser encore à l'avenir, notamment dans des recherches de modélisation mécaniste, parce que je considère que les placettes du réseau sont idéales pour la validation des modèles et l'analyse de simulations sur des cas d'étude bien particuliers.

Merci pour votre attention.

COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DES MATIÈRES ORGANIQUES DES SOLS, UN COMPARTIMENT-CLÉ DANS L'ÉQUILIBRE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Delphine Derrien
INRA, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers





L'exposé que je vais vous présenter résulte en grande partie des travaux conduits par le « collectif CarboSMS » (Carbone des Sols, Mécanismes de Stabilisation). C'est un collectif de chercheurs qui s'est structuré à l'occasion de l'initiative 4 pour 1000 et qui s'intéresse à l'explicitation des mécanismes de dynamique du carbone dans les sols.

Je vais d'abord rapporter l'état actuel des connaissances sur les mécanismes de dynamique des matières organiques dans les sols, plus précisément dans les sols forestiers. Puis je vais essayer de voir avec vous comment les pratiques de gestion peuvent impacter ce stock de carbone dans les sols, si on peut l'augmenter tel que le prône l'initiative 4 pour 1000. Nous verrons ensuite comment on peut essayer de prédire les évolutions des stocks de carbone, notamment en s'appuyant sur les données du réseau RENECOFOR.

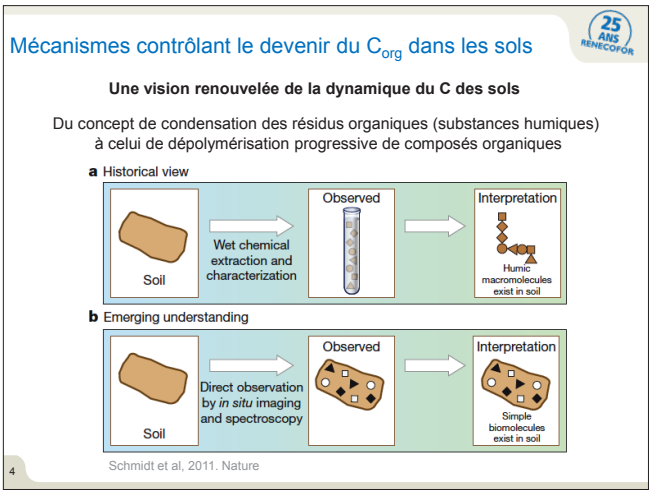
Les sols forestiers stockent environ 80 tonnes de carbone par hectare dans leurs 30 premiers centimètres, ceci pour les territoires métropolitains. À ces 80 tC/ha s'ajoutent environ 10 tC/ha dans la couche organique de surface, que vous appelez peut-être humus, ou couche de litière… Les prairies stockent à peu près la même chose dans leur sol et vous pouvez remarquer que les sols agricoles, eux, stockent beaucoup moins, de l'ordre de 50 tC/ha.

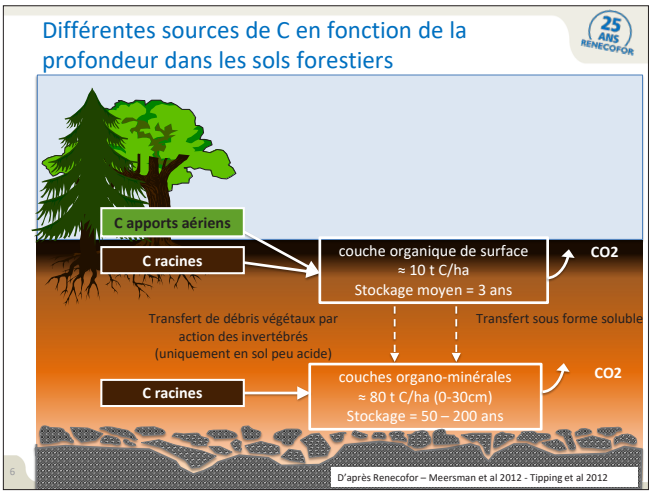
Voyons quelles sont les sources du carbone des sols et ce qui arrive à ce carbone qui entre dans les sols.

Les mécanismes de la dynamique du carbone dans les sols

Le carbone entre dans les sols par apport de litière, litière aérienne mais aussi souterraine, c'est-à-dire les racines fines qui meurent et les exsudats racinaires.
Ce carbone d'origine végétale est utilisé par les organismes vivants du sol qui le transforment pour produire du CO_2 ou pour créer leurs propres métabolites. Les résidus végétaux, les métabolites des microorganismes vivants peuvent ensuite potentiellement être stabilisés dans les sols par interaction avec les structures minérales : ils sont encapsulés dans des agrégats ou bien ils peuvent être sorbés sur les surfaces minérales.

Notez que je n'ai pas parlé pas d'un processus de décomposition des matières organiques du sol qui s'appelait, qui s'appelle toujours, l'humification. C'est un concept qui a eu beaucoup de succès pendant des décennies : il considérait que les fragments en cours de décomposition s'assemblaient pour former de grosses molécules denses, les substances humiques, qu'on pouvait d'ailleurs extraire par des extractions séquentielles dans des milieux acides puis basiques. On appelait ça les acides fulviques, les acides humiques et les humines.





Les progrès analytiques d'observation des matières humiques ont permis de démontrer que ce concept d'humification était faux, que ces grosses molécules condensées qu'on pensait voir par extraction dans les acides et les bases étaient créées artificiellement en raison de la force ionique de ces acides et de ces bases. En fait, ce sont des petits composés en cours de décomposition qui formaient des assemblages supramoléculaires, mais de façon artificielle. Aujourd'hui, ce concept d'humification est révolu et on sait que la matière organique se dépolymérise au cours du temps.

Revenons-en aux différents processus, et intéressons-nous d'abord aux **entrées de carbone dans les sols forestiers.**

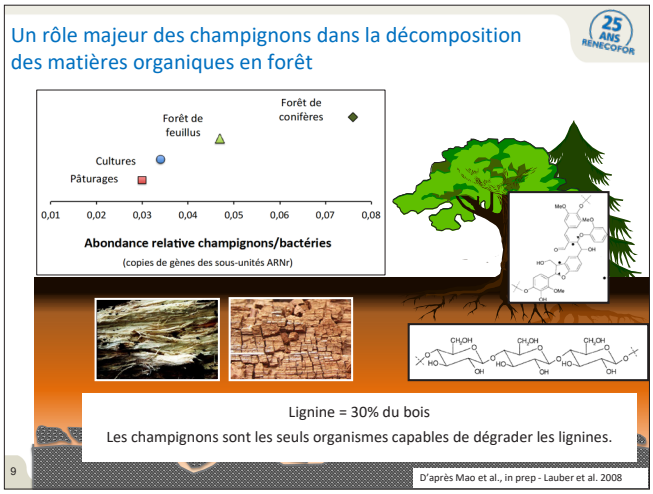
Les sols forestiers sont structurés en horizons, en raison du non travail du sol. **La couche organique de surface** a pour sources les apports aériens des litières mais aussi des apports racinaires parce qu'il y a aussi des racines dans cette couche. Elle contient environ 10 tC/ha, avec de très fortes variations, et le stockage y est en moyenne de l'ordre de 3 ans. Bien entendu, c'est très variable, ça dépend des organes végétaux qui sont dedans : une feuille va se décomposer plus vite qu'une branche, par exemple.

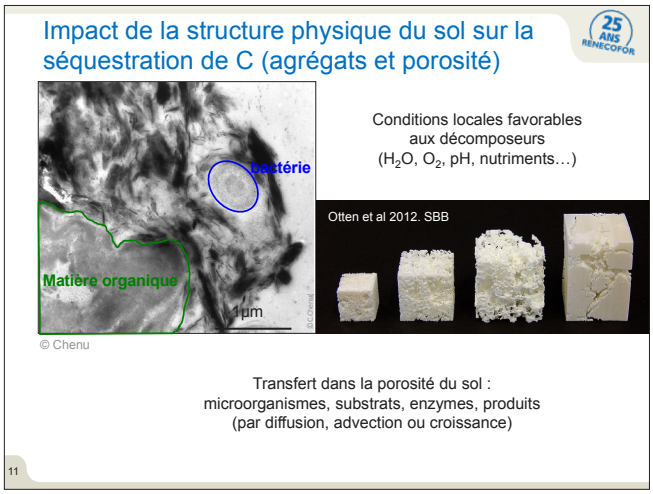
Dans **la couche du sol minéral,** les apports sont principalement des apports racinaires, mais il y a aussi des transferts verticaux depuis la couche de surface, soit sous forme soluble, soit en raison de transfert par la faune du sol si les conditions du sol, le pH, permettent l'existence de ces organismes fouisseurs. Les horizons profonds contiennent environ 80 tC/ha, et il faut remarquer que la durée de stockage y est de l'ordre de 50 à 200 ans. Donc les processus de renouvellement des stocks de carbone sont extrêmement lents.

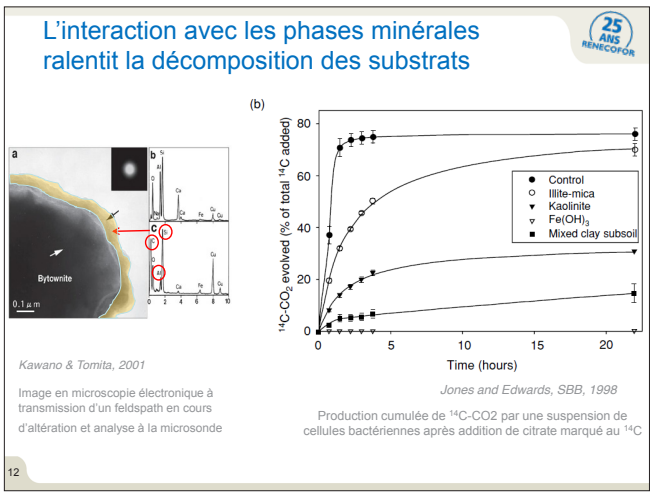
Ici je rebondis sur le commentaire de Mathieu Jonard, qui disait qu'on n'est peut-être pas encore à l'équilibre dans les placettes résineuses afforestées récemment : si elles étaient auparavant sous culture, avec seulement 50 tC/ha, il faut plus de 100 ans pour arriver au stock à l'équilibre de 80 tC/ha sous forêt. Donc en effet, on n'est peut-être pas encore à l'état d'équilibre.

Intéressons-nous maintenant au **rôle des organismes vivants**, comment ils vont modifier les matières organiques et impacter le stock de carbone.

Je vais parler en premier lieu de **la faune du sol**, qui a deux actions antagonistes. D'un côté, elle favorise la minéralisation des matières organiques dans le sol, par fragmentation des débris végétaux et aussi par le passage dans le tube digestif : il y a mise en contact avec des enzymes et des bactéries, et donc dépolymérisation et minéralisation des produits organiques. Mais en parallèle, la faune du sol inclut les débris végétaux dans des structures biogéniques et ça produit des agrégats qui vont protéger les débris organiques de l'action des décomposeurs. Quant à la faune fouisseuse, elle enfouit les matières organiques en profondeur ; or on sait qu'en profondeur les conditions deviennent défavorables à la décomposition. Enfin, les organismes vivants synthétisent leurs propres métabolites et la structure chimique des molécules ainsi produites est différente de celle des composés végétaux ; cela favorise la rétention de ces molécules sur les surfaces minérales, et elles sont donc globalement plus stabilisées.



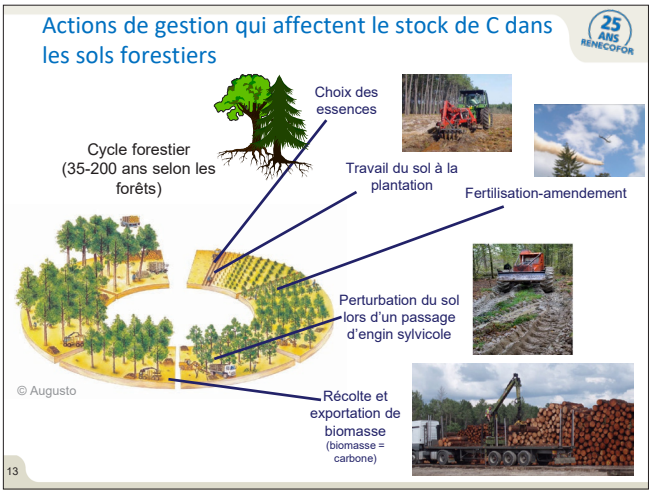


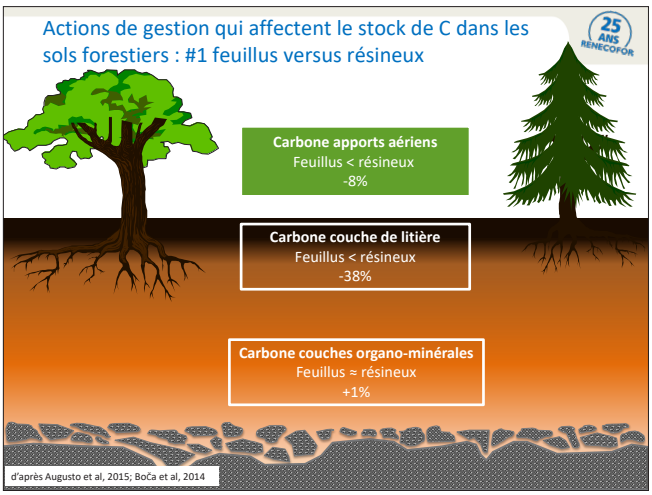


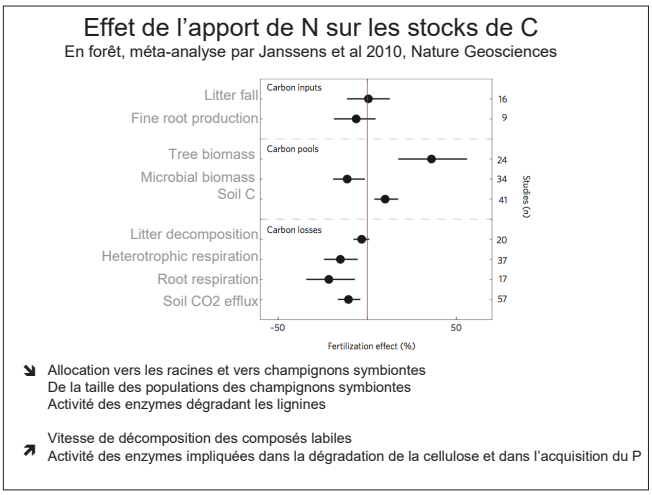
Outre la faune du sol, les autres organismes très importants dans la décomposition des matières organiques sont les **micro-organismes**. Le graphique en haut montre l'abondance relative des champignons par rapport aux bactéries sous différents usages. On remarque que dans les sols forestiers l'abondance relative des champignons est plus forte que dans les sols de cultures ou pâturages, et qu'elle est plus prononcée encore sous les forêts de conifères que sous les forêts de feuillus.
C'est que les champignons ont une spécificité qui concerne les apports végétaux. En forêt, les apports végétaux sont constitués à 30% de lignine, une molécule relativement dense, composée de cycles aromatiques avec beaucoup de types de liaisons chimiques différentes. Pour la décomposer, un organisme doit avoir beaucoup d'outils (d'enzymes) très différents. *A contrario*, la cellulose, qui est le composé majoritaire des feuilles et qu'on trouve également dans les systèmes agricoles, est un motif répétitif d'une structure simple (le glucose) : il suffit d'une ou deux enzymes, pour la décomposer. C'est donc beaucoup plus facile à dégrader que la lignine. Mais il se trouve que les champignons sont parmi les rares organismes à pouvoir décomposer la lignine. Et finalement, bien que les apports de lignine soient très importants en forêt, on n'a pas plus de lignine dans les sols forestiers que dans les sols agricoles.

Par ailleurs, **les structures physiques du sol** ont un rôle dans la protection des matières organiques et dans la genèse d'un stock important de carbone dans les sols. En, fait la structure physique du sol va conditionner l'activité des micro-organismes.
L'activité des décomposeurs s'exerce dans des conditions optimales de pH, de température, de disponibilité en eau et bien sûr de disponibilité en nutriments. Encore faut-il qu'il puisse y avoir un contact direct entre les décomposeurs (ou leurs enzymes) et la matière organique : vous voyez sur l'image de gauche une bactérie qui ne peut pas accéder à la matière organique quand bien même les conditions seraient favorables à son activité, parce que des argiles font écran. Il faut qu'il y ait dans le sol une porosité qui permette les interactions entre la matière organique et le décomposeur. Les outils type scanner médical permettent aujourd'hui de représenter le réseau de porosité d'un sol, puis d'en faire une impression 3D, comme on en voit sur l'image de droite. À cette échelle des agrégats, du micromètre, on se rend bien compte que certains sols sont plus poreux que d'autres.

À une autre échelle, inférieure au micromètre, les surfaces minérales ralentissent la décomposition des matières organiques. À droite, vous avez le résultat d'une expérience qui consiste à ajouter un composé organique très simple, du citrate, dans une suspension de bactéries et à mesurer au fil du temps la production de CO_2 correspondant à la décomposition du citrate ; et on répète l'opération en ajoutant à ce mélange différents types de minéraux. Vous voyez que la production de CO_2 par rapport au témoin (*control*) est ralentie par l'ajout des minéraux, à un degré qui dépend des types de minéraux. Je veux donc souligner ici l'importance des contextes pédoclimatiques : la minéralisation va être plus ou moins atténuée en fonction des différents minéraux. Comment ça marche ? Vous avez à gauche une particule minérale en cours d'altération et à sa surface (en marron), des composés organiques qui sont très fortement attachés. C'est là que se jouent les interactions et la protection des matières organiques ; les microorganismes ne peuvent pas, ou difficilement, attaquer cette matière organique sorbée.







Les actions de gestion qui affectent le stock de carbone des sols forestiers

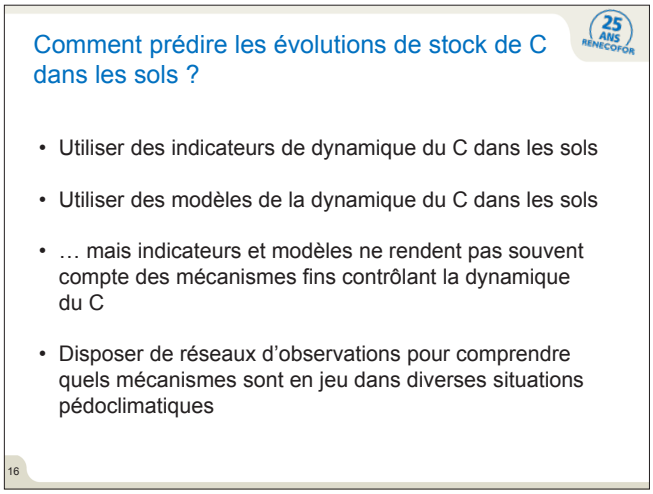
Cette illustration passe en revue quelques actions de gestion qui peuvent affecter le stock de carbone dans les sols forestiers. Mais je vais m'intéresser plus particulièrement à l'impact du choix des essences et à celui de la fertilisation azotée. Je vous présente ici des données issues de compilations d'études.

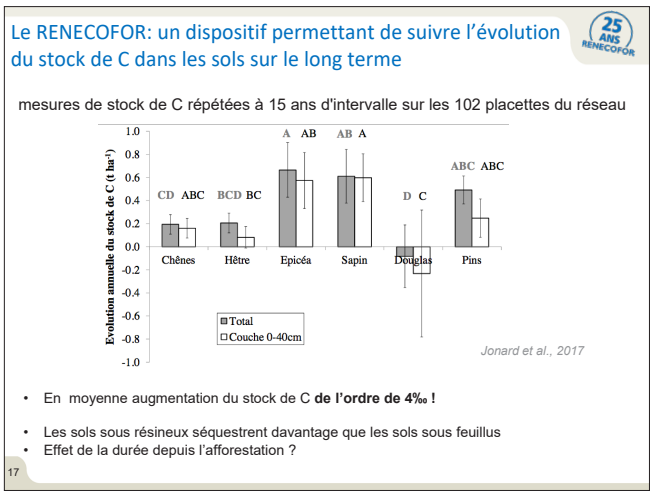
Quel va être **l'impact du choix d'une essence feuillue ou résineuse** sur les stocks de carbone dans les sols ? Les apports de litière sont plus faibles sous feuillus en général que sous résineux (- 8%). Cela se traduit dans la couche de litière : le stock de carbone dans cette couche est également plus faible sous feuillus que sous résineux, et même beaucoup plus faible : on n'est plus à 8 % mais à 38% de différence. Ceci est lié aux conditions notamment de pH, qui sont souvent plus acides sous résineux et qui ralentissent l'activité des décomposeurs, et aussi à la qualité chimique des apports sous résineux : il y a des cires qui sont plus difficiles à décomposer et il y a plus de lignine.

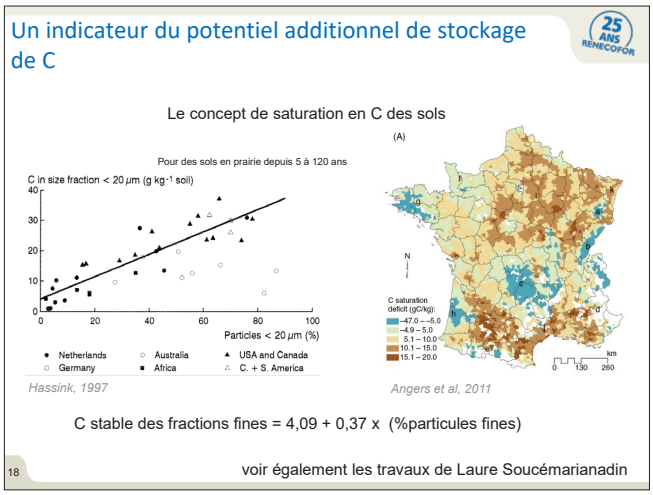
Mais dans les horizons organo-minéraux du sol, les stocks sont relativement similaires sous résineux et sous feuillus : on n'a pas de propagation de cette différence avec la profondeur. C'est quelque chose qu'on ne sait pas encore vraiment expliquer ; il est possible que les organismes fouisseurs soient absents ou moins présents sous résineux parce que les sols sont plus acides.

En ce qui concerne **l'impact d'une fertilisation azotée** sur les stocks de carbone, on constate que dans des sols forestiers fertilisés, la biomasse (le carbone) de l'arbre augmente et le stock de carbone dans les sols augmente aussi. Comment expliquer ça ? Quand on fertilise (en azote), la production de racines a tendance à diminuer. L'arbre a moins besoin de produire des racines pour aller chercher les nutriments. Donc il y a moins de racines produites, moins d'apports de matière organique fraîche sous terre. De surcroît, quand il y a de l'azote disponible, l'arbre interagit moins avec les micro-organismes symbiontes pour aller chercher l'azote donc il y a moins de microbes et ces microbes en moindre nombre vont moins minéraliser la matière organique.

Globalement cette étude montre que la fertilisation azotée des sols forestiers a tendance à réduire la biomasse microbienne et donc à augmenter le stock de carbone dans les sols.







Comment prédire les évolutions des stocks de carbone dans les sols ?

Nous avons des outils disponibles pour cela : utiliser des indicateurs qui vont prédire l'évolution, ou utiliser des modèles, comme Eric Dufrêne l'a montré. Mais pour pouvoir utiliser des indicateurs et des modèles il faut au préalable les valider. Vous avez eu une illustration des validations du modèle CASTANEA qui ont été faites sur le réseau RENECOFOR, moi je vais vous parler de travaux en cours qui utilisent ou ont utilisé les données RENECOFOR pour valider des indicateurs et modèles sur la dynamique du carbone dans les sols. Mais je vais surtout vous présenter des travaux en cours.

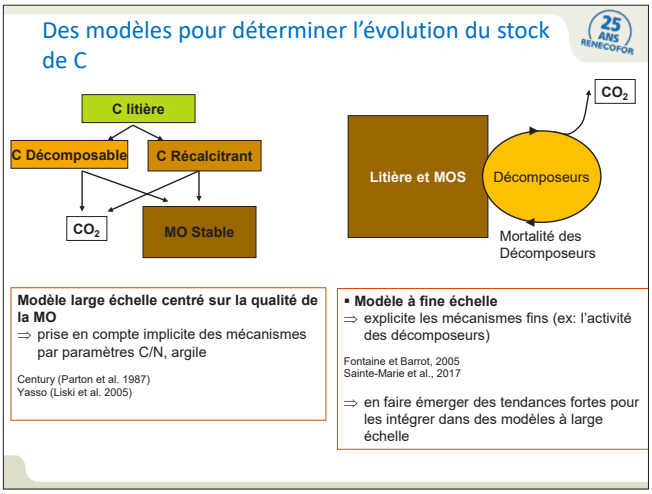
J'ai emprunté à Mathieu Jonard cette figure qui illustre l'apport du réseau d'observation RENECOFOR sur le stockage de carbone dans les sols forestiers, grâce aux mesures de stock répétées à 15 ans d'intervalle.

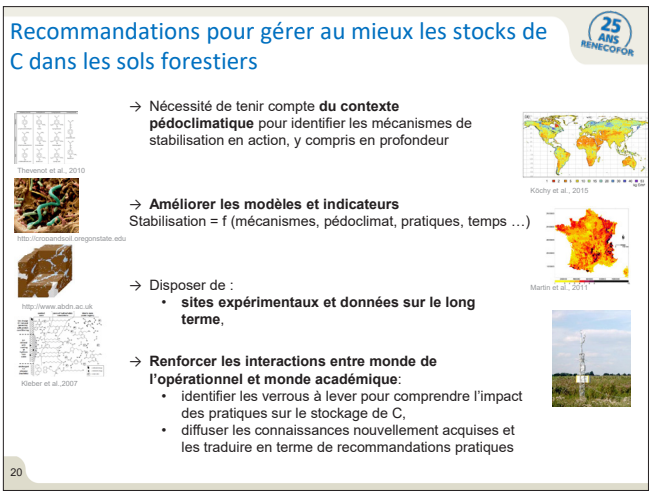
Elle montre en particulier que le stockage est plus fort sous les peuplements de résineux, à l'exception du Douglas, que sous feuillus, et je rappelle l'interprétation avancée : si on estime que nombre de placettes résineuses correspondent à d'anciennes terres de cultures afforestées plus récemment, on peut penser que, puisque le stock des sols agricoles est très inférieur à celui des sols forestiers, le stockage actuel est important parce qu'il faut du temps pour passer de l'un à l'autre et qu'on n'est pas encore à l'équilibre

Et j'en viens maintenant aux travaux en cours sur les données RENECOFOR pour chercher à prédire les évolutions de stock.

Voyons d'abord **l'indicateur des taux de saturation des sols en carbone.** Des chercheurs ont observé une relation linéaire (à gauche) entre la quantité de particules fines dans un sol et la quantité de carbone associée à ces particules fines, dans des sites considérés à l'état stable. Sur la base de cette observation, ils se sont dit qu'il devait y avoir une quantité maximale de carbone associée à ces particules fines, « protégée » par les mécanismes que j'ai expliqués précédemment. De cette droite, ils ont donc déduit une équation qui donne le stock maximal de carbone qui peut être protégé par les particules minérales. À l'échelle d'un territoire, comme ici à l'échelle de la France, on peut quantifier la proportion de particules fines des sols, regarder la concentration effective en carbone organique de la fraction fine du sol et voir si on est à la valeur maximale ou en-dessous. Si on est en-dessous, il y a un potentiel de stockage additionnel et on peut théoriquement stocker davantage en adoptant des pratiques vertueuses. Sur la carte, les zones à potentiel de stockage additionnel sont en marron, mais il y a aussi quelques secteurs en bleu qui seraient en surstockage… L'indicateur est un outil, ce n'est pas la vérité, ça ne marche pas toujours. Le réseau RENECOFOR va permettre de tester précisément la robustesse et l'utilité de l'indicateur.

À signaler aussi les travaux de Laure Soucémarianadin sur des indicateurs d'évaluation de la stabilité ou de la « décomposabilité » des stocks de carbone.





Par ailleurs nous avons des modèles pour déterminer l'évolution des stocks de carbone dans les sols. Des modèles à grande échelle qui ont été testés sur le réseau RENECOFOR et qui distinguent, parmi les processus que j'ai mentionnés, la matière organique en fonction de sa qualité : facilement décomposable ou pas. Mais ils n'utilisent pas vraiment les mécanismes : ils les prennent en compte de façon implicite avec des paramètres de type rapport C/N, ou rapport lignine/azote, et ils ont également des paramètres qui tiennent compte de la teneur en argile. Ce sont donc des modèles relativement limités au regard de l'état actuel des connaissances en termes de mécanismes.

À une échelle beaucoup plus fine, celle d'une placette du réseau RENECOFOR ou d'un horizon de sol dans les placettes, on peut développer des modèles qui intègrent les mécanismes ; des modèles qui, par exemple, explicitent la dynamique du carbone en fonction de l'activité des microorganismes du sol parce que ce sont eux, vraiment, qui gèrent la décomposition. Mais on ne peut pas appliquer ces modèles fins à une large échelle comme celle du territoire : ce serait beaucoup trop lourd. Notre démarche actuelle est donc de développer ces modèles, de les faire tourner pour essayer d'en tirer de grandes tendances qu'on pourra introduire dans les modèles précédents, plus faciles à mettre en œuvre à large échelle.

En conclusion

Je termine en vous donnant mon point de vue pour gérer au mieux les stocks de carbone dans les sols forestiers, essayer d'éviter de déstocker et, au mieux, stocker du carbone. Sur le réseau RENECOFOR on observe actuellement un stockage qui est de l'ordre de ce que le ministre a donné comme objectif. C'est parfait, tout va bien !

Plus sérieusement, mes recommandations, c'est d'abord, au vu de nos connaissances sur les mécanismes de séquestration du carbone dans les sols, de tenir compte du contexte pédologique y compris dans les horizons profonds. Parce que les minéraux, le pH, etc., tout ça joue sur la séquestration du carbone et l'activité du vivant. Ensuite, nous les scientifiques, nous devons travailler à améliorer nos modèles et indicateurs en tenant compte des mécanismes, du pédoclimat, des pratiques de gestion et, bien entendu, du temps parce que les processus à l'œuvre se déroulent sur de très longues durées. Vous avez vu qu'il y a encore du travail. Pour cela, nous avons besoin de sites expérimentaux générant des données sur le long terme, soit plusieurs décennies (un siècle idéalement) ; nous devons aussi renforcer les interactions entre personnes de l'opérationnel et du monde académique, de façon à identifier les verrous pour comprendre l'impact des pratiques sur le stockage de carbone et réciproquement pour diffuser la connaissance et la traduire en recommandations pratiques.

À ce titre, je trouve que ce qui se fait au niveau du réseau RENECOFOR satisfait à toutes ces recommandations de par le design du dispositif, qui couvre une large gamme de contextes pédoclimatiques en France, de par la qualité des résultats que vous collectez sur le terrain, de par les travaux scientifiques qui y sont menés et de par l'animation telle qu'elle est faite aujourd'hui, qui nous permet de nous rencontrer et d'échanger.

Merci pour votre attention.

Discussion

Questions / Réponses

Etienne Dambrine, INRA - Je profite de cette histoire passionnante de stockage de carbone dans les sols pour dire qu'il y a une autre manière un peu curieuse de stocker du carbone en forêt, c'est de le faire quitter la forêt par les rivières. Vous savez que chaque fois qu'il tombe des litières il en tombe aussi dans les rivières et ces litières alimentent une chaîne trophique dans les rivières et les lacs. Elles se décomposent… ou pas, et vont se stocker dans les lacs ou les barrages, où elles peuvent occasionner soit un stockage à très long terme, soit des minéralisations sous forme de CO_2 voire de méthane, de sorte qu'on a des effets différés du transfert de carbone dans les écosystèmes aquatiques. Grâce en particulier au travail de RENECOFOR, les chutes de litière et les litières en forêt sont très bien connues, mais les flux de litière qui transitent dans les rivières sont très mal connus. C'est pourquoi j'ai présenté un poster qui propose, si ça vous intéresse, un protocole d'observation très simple, en particulier si vous êtes pêcheur ou si vous avez une rivière à proximité de la maison forestière. Je n'en dis pas plus, c'est un projet en construction.

Jean-Luc Dupouey - Le réseau RENECOFOR a été installé dans des peuplements en bon état, fermés, et n'a connu que très peu de coupes de régénération (ou aucune ?). Mais il y a eu les tempêtes qui ont touché de façon importante une trentaine de placettes, qui ont été un événement de perturbation important. Mathieu Jonard a-t-il étudié l'impact des tempêtes ? Quel a été le statut de ces placettes, ont-elles été exclues ou non des analyses ? Théoriquement on devrait pouvoir observer des pertes de carbone. Et à Delphine Derrien, que devient le 4 pour 1000 quand on inclut l'ensemble du cycle forestier, avec ses phases de renouvellement ? Ce qui a été présenté est basé sur des peuplements en vieillissement qui ne représentent qu'une partie limitée du cycle de la forêt française.

Mathieu Jonard (MJ) - 10% des placettes ont été renouvelées en 25 ans, et si on considère un cycle forestier de 100 ans, ça fait quand même la moitié de ce qu'il y aurait eu normalement. Et oui, nous avons fait la distinction entre les placettes qui avaient été perturbées et les autres, et nous n'avons pas vu d'effet. Ça ne veut pas dire qu'il n'y en a pas, parce que l'hétérogénéité, l'incertitude sur l'estimation du taux de séquestration est grande, mais c'est ainsi : nous n'avons pas vu de différence entre les placettes qui ont subi les tempêtes et les autres.

Delphine Derrien (DD) - J'ajoute que nous avons également mené des travaux de modélisation des stocks de carbone du sol avec YASSO, un modèle plutôt forestier (développé et validé par d'autres auteurs), en tenant compte des événements de tempête ; c'est Laurent Saint-André qui a généré les données d'apport de litière au sol en lien avec les tempêtes. On est capable de reproduire l'impact des événements de tempête, et pour autant on n'arrive pas à reproduire les observations du RENECOFOR. Ce qui ressort de ces travaux c'est qu'on manque d'une connaissance de la distribution du carbone à l'installation du réseau (dans les années 92).

Quant à la 2e question, bien entendu les placettes du RENECOFOR, en termes de stock de carbone dans les sols forestiers, ne sont pas représentatives de ce qui se passe sur l'ensemble du territoire français. Et même si c'est un des meilleurs outils qu'on ait pour étudier le carbone des sols, je dois reconnaître qu'on n'est pas en mesure de répondre à la question : qu'est-ce qui se passe dans les autres sols forestiers ? Il va falloir résoudre la question très importante de l'ancienneté de l'afforestation - ça va jouer sur l'évolution des stocks au cours du temps - et s'intéresser aussi à l'effet de l'âge du peuplement et des actions de gestion. Un certain nombre de projets ont été initiés à peu près au moment du lancement de l'initiative 4 pour 1000, donc il y a des groupes de chercheurs qui travaillent là-dessus et le réseau RENECOFOR, pour ce qui est de l'étude des mécanismes fins, est vraiment un outil de choix parce qu'on va pouvoir affiner les hypothèses et les replacer dans des contextes de gestion sur d'autres parcelles à partir de ces données.

Eva Simon, responsable UT de Thonon-les-bains (74) - Question de gestionnaire à l'ensemble des chercheurs. Est-ce qu'il y a des travaux d'étude sur l'impact des travaux du sol, de type scarification, sur le fonctionnement des sols et sur leur fertilité. C'est en-dehors des placettes RENECOFOR, mais j'ouvre la question.

Christine Deleuze (CD) - On peut citer le projet CAPSOL (financé par l'Ademe dans le cadre de l'appel à projets REACCTIF) qui a démarré en 2015. Ce projet s'intéresse à la « dynamique du carbone et de la croissance après préparation du sol dans les plantations forestières », en s'appuyant sur deux réseaux implémentés depuis quelques années : le réseau Alter qui vise à tester des alternatives aux traitements herbicides par le travail du sol (test de plusieurs méthodes) en contexte de végétation monopoliste, et le réseau Pilote, qui est plutôt sur des démonstrations d'autres outils. Dans le cadre de ces deux réseaux, on fait des analyses pour essayer d'appréhender l'hétérogénéité du carbone dans ces sols, le déstockage qu'on peut mesurer ou pas. L'idée étant de minimiser les impacts du travail du sol, on cherche à savoir s'il y a vraiment des différences entre les modalités, sachant qu'il y a chaque fois un témoin sans travail du sol. On aura des éléments de réponse d'ici 2 ans peut-être.

DD - La difficulté d'envisager l'impact du travail du sol sur la séquestration de carbone, c'est que dans un premier temps on va peut-être déstocker (c'est ce qui va être montré dans les résultats du projet CAPSOL) mais qu'en parallèle, la biomasse vivante (y compris souterraine) va être favorisée et qu'à long terme, après plusieurs décennies, ça va probablement avoir un impact positif sur le stock de carbone dans le sol. Donc on a des hypothèses mais pour l'instant c'est assez difficile d'apporter la réponse sur le sol à long terme.

Andreas Prinzing, université de Rennes - Si j'ai bien compris, vous n'avez pas de mesure directe de taux de décomposition de la litière, le pourcentage de masse perdue en un an par exemple. (1) Est-ce que vos mesures sur les stocks et leur évolution sont globalement compatibles avec des mesures qui existent sur les taux de décomposition dans d'autres études ? (2) Comment voyez-vous l'effet de la diversité des essences sur le taux de décomposition ? Vous avez parlé d'essences feuillues ou résineuses mais on peut aussi imaginer un effet du mélange entre les essences. On a mis en évidence par exemple que des mélanges qui contiennent plutôt des espèces apparentées se décomposent relativement mieux parce que les décomposeurs sont plus efficaces.

MJ - Nous avons montré que les structures irrégulières conduisaient à un taux de séquestration plus élevé dans le sol (ce sera à vérifier dans des dispositifs plus contrôlés). Du coup je pense que si on mélange les essences, ce qui va dans le sens d'une structure plus complexe, le taux de séquestration pourrait être meilleur, avec des essences qui favorisent l'accumulation plus en surface, comme les essences résineuses, et d'autres plus en profondeur. Si je devais faire une recommandation « en bon père de famille », il me semble que le mélange et l'irrégularité des structures, a priori, sont favorables à la séquestration de carbone. En ce qui concerne la décomposition, disons que l'approche que j'ai montrée est un cadre théorique qui permet de quantifier un peu une réflexion plus qualitative, pour savoir si c'est au niveau des apports ou de la décomposition que les changements ont lieu et quels sont les processus responsables de la séquestration. Je n'ai pas vraiment vérifié les taux de décomposition, j'ai plutôt estimé un changement du taux de décomposition.

Hubert Schmuck, ONF, agence de Sarrebourg - Est-ce que quelqu'un a pu vérifier, en matière d'impacts de gestion, l'impact des modalités d'exploitation ? Je pense en particulier aux problèmes de tassement de sol qu'on a de plus en plus fréquemment.

DD - Il y a des projets qui ont été menés, notamment avec le soutien de l'ONF, sur l'impact du tassement du sol. Noémie Pousse a d'ailleurs réalisé sa thèse là-dessus et continue d'être impliquée dans ces travaux. Bien entendu, le tassement des sols conduit à des conditions défavorables pour l'activité des microorganismes : ça peut paraître bien pour stocker du carbone et atténuer le changement climatique, mais ça pénalise sérieusement la minéralisation des matières organiques et la fourniture en éléments nutritifs.

Noémie Pousse, pôle RDI ONF de Nancy - C'est assez compliqué d'évaluer l'impact du tassement sur le stockage de carbone puisqu'en fait il va y avoir plusieurs effets. On va diminuer la respiration du sol parce que l'activité biologique va souffrir du manque d'aération du sol. Donc on diminue la quantité de CO_2 émise par le sol, mais on diminue aussi sa capacité à absorber le méthane ; or le méthane est un gaz à effet de serre (GES) beaucoup plus puissant. Pour le protoxyde d'azote (autre puissant GES) on n'a pas encore assez de données. Quoi qu'il en soit, il faut intégrer tous ces facteurs pour essayer d'y voir un peu plus clair sur l'impact du tassement sur les émissions de GES. Pour ça, le réseau RENECOFOR n'est pas forcément le bon candidat. Il n'y a actuellement en France que deux sites expérimentaux sur cette thématique : ce n'est pas beaucoup mais c'est tout de même énorme. C'est une réponse très incomplète mais, désolée, on pourra difficilement faire plus. En tout cas, en ce qui concerne le stock de carbone, 10 ans après l'opération de tassement on ne voit pas encore de changement significatif.

Nicolas Delpierre, université Paris Sud - Question sur l'augmentation des stocks dans les horizons de surface. Mathieu Jonard a dit qu'il n'y a pas de modification de l'apport de litière foliaire et que ce serait lié à une augmentation du rapport C/N : c'est une hypothèse ou bien c'est démontré ? Et comment comprendre cette augmentation du rapport C/N, dans le contexte des dépôts azotés ?

MJ - Notre hypothèse de base, c'était plutôt de chercher à savoir s'il n'y avait pas une augmentation des dépôts de litière suite à une augmentation de la productivité en lien avec l'effet fertilisant des dépôts d'azote et du CO_2 atmosphérique. En regardant en moyenne sur le réseau il n'y a pas d'évolution ou de tendance très claire au niveau des retombées de litière. Expliquer pourquoi le C/N augmente, je vous renvoie à mon exposé sur l'évolution de la nutrition foliaire (session 7) et à celui de Quentin Ponette, qui parlera de cette évolution du C/N dans les sols forestiers (session 4)… Ça reste un peu une énigme, on ne sait pas trop où est parti l'azote peut-être dans la strate herbacée, comme me l'a suggéré Jean-Luc Dupouey ?

Myriam Legay - Est-on capable avec les modèles dont on dispose, d'évaluer l'effet, sur la période de temps entre les deux campagnes sol, de l'évolution des retombées acides à la baisse et du maintien des retombées azotées ?

DD - Il existe des modèles capables de simuler l'évolution des nutriments et de l'acidité du sol et donc de prédire sur le long terme l'impact de la diminution des dépôts acides (en incluant la matière organique, mais de façon simplifiée). C'est le cas du modèle ForSAFE, que l'INRA-BEF a calibré sur les données RENECOFOR. Il en est question dans l'exposé d'Anne Probst (session 4), qui montre ce qu'on peut faire actuellement avec des modèles, en essayant de recouper des effets de dépôts atmosphériques, de climat, et des questions de nutriments. Mais les modèles ne sont qu'une représentation simplifiée de la réalité…

Claudy Jolivet, INRA Orléans - Quid du stockage de carbone dans les horizons profonds ? Vous n'avez parlé que des horizons organo-minéraux, jusqu'à 30 ou 40 cm. Mais dans la littérature il y a des travaux qui montrent que le stockage potentiel dans les horizons profonds, c'est-à-dire au-delà de 40 cm et jusqu'à 1 m voire plus, peut être du même ordre de grandeur que ce qu'on mesure dans les 30 premiers cm. Avez-vous tenu compte de ces questions de stockage de carbone profond ?

DD - J'ai participé à une étude de compilation de données menée par Jérôme Balesdent sur la détermination de l'âge du carbone dans les horizons profonds. Comme vous l'avez dit, il y a 50% du stock de carbone qui sont sous les 30 premiers cm mais c'est un carbone stable, dont l'âge moyen à 1 m de profondeur est de l'ordre de 2000 ans. Il y a quand même une petite proportion de ce carbone profond, de l'ordre de 10%, qui va être renouvelée sur une durée de l'ordre de quelques décennies, mais l'essentiel est inerte à l'échelle d'une vie humaine. Sur 20 ans, le carbone atmosphérique qui est intégré dans le sol se retrouve à 80% dans les 20 premiers cm. Les horizons dynamiques à l'échelle de nos vies humaines, ce sont les horizons de surface.

MJ - Il faut vraiment distinguer le stock et la variation de stock. Pour estimer le stock il faudrait effectivement aller voir plus bas, mais la variation de stock, en tout cas sur l'échelle de temps qui nous intéresse, se limite aux horizons superficiels.

Christophe Mouy, ONF, responsable d'UT dans l'Yonne - On semble considérer comme une bonne chose l'augmentation du stock de carbone dans les horizons de surface. Mais la matière organique, c'est aussi ce qui revient en nutriments au niveau des arbres : n'a-t-on pas une dégradation de cette faculté de minéralisation qui va à terme avoir un impact sur la croissance des arbres ?

MJ - On a ce schéma que plus le cycle se fait rapidement, meilleure est la nutrition. Mais je pense que cette vision doit être renouvelée. Il faut savoir que les horizons organiques sont des horizons à part entière qui, bien souvent sur les sols acides, sont plus favorables à la croissance des racines et en tout cas au prélèvement des nutriments, notamment de l'azote et surtout du phosphore. Phosphore qui dans les horizons acides est fortement retenu sur les particules minérales du sol. Dans ces couches organiques, il est beaucoup plus disponible. Il faut donc voir ça aussi comme un horizon qui permet une meilleure nutrition… toutes proportions gardées ; il faut bien sûr que la minéralisation se fasse également.

DD - Cette nécessaire balance entre stockage de carbone et nutrition, c'est un message sur lequel nous insistons dans les discussions avec les décideurs ; c'est vraiment un point très important, pour les sols forestiers notamment.

Jean-Luc Dupouey - Je voudrais faire une réflexion d'ordre général. La forêt française est peut-être actuellement à un point haut, historiquement, en termes de stock de carbone puisqu'on n'a pas connu, depuis longtemps, une surface forestière aussi élevée et un niveau moyen global de prélèvement (relativement à la croissance) aussi bas. Je rappelle que le niveau relatif de prélèvement a baissé continument depuis quelques dizaines d'années et qu'il est actuellement en-dessous de 50% de l'accroissement. Ce n'est pas le cas en forêt publique, ou plus précisément domaniale, mais le domanial ne représente que 10% de la forêt française. Dans ce contexte, l'idée de stocker du carbone dans les écosystèmes forestiers n'est pas forcément des plus opportunes. Si on est à un point haut, on risque plus de déstocker que l'inverse. On pourrait repartir vers une diminution des surfaces forestières, ou des stocks à l'hectare plus faibles… Les scénarios Afterres 2050, négaWatt envisagent par exemple de changer en partie l'utilisation des terres pour des usages différents, cultures de légumineuses, taillis à courte rotation, etc., qui ne vont pas tous dans le sens d'une séquestration accrue de carbone dans les sols ou la biomasse. Pour moi, il y a là une question de fond sur la possibilité de stocker à long terme du carbone dans les forêts, à un point « haut » de leur histoire. Je voudrais dire aussi que RENECOFOR n'est probablement pas le meilleur endroit pour observer les effets des changements d'usage des sols. Il a été dit plusieurs fois que le stockage observé pouvait être lié à des changements historiques d'affectation des sols (une afforestation récente par exemple) ; en fait, il y a très peu de placettes issues d'anciennes zones agricoles dans RENECOFOR, et ce sont surtout d'anciennes pâtures. Donc il y est difficile d'étudier les effets des changements d'usage des sols.

Nathalie Korboulewsky, Irstea Nogent - Question à Mathieu Jonard. D'après vos travaux, la séquestration annuelle dans les sols forestiers français serait de l'ordre de 20 mégatonnes équivalent CO_2 par an. Ces résultats, si j'ai bien compris, ont été repris par l'étude INRA/IGN (citée par Christine Deleuze et vous-même), mais je crois savoir qu'ils ont abattu de deux tiers parce que le réseau RENECOFOR ne serait pas représentatif de l'ensemble de la forêt française. Qu'en pensez-vous ?

MJ - C'est du racisme, parce que les chiffres avaient été produits par un chercheur belge ! [rires] Mieux vaut laisser la parole à Laurent Saint-André, co-auteur de l'étude INRA/IGN.

Laurent Saint-André, INRA BEF - C'est typiquement du dire d'expert. Jean-Luc Dupouey a rappelé les limites de représentativité du réseau : on ne pouvait décemment pas généraliser le 4 pour 1000 à l'échelle de la France, ce n'était pas raisonnable du tout. Par contre, il y a probablement du stockage mais on ne sait pas vraiment où. Donc à dire d'expert nous avons divisé par 3. Il faut parfois prendre des décisions sur des prospectives et voilà comment nous avons raisonné.

CD - On peut rappeler que les sols ne sont pas considérés pour l'instant dans les estimations nationales de séquestration de carbone. Ceci dit, il me semble que dans RENECOFOR on observe sans doute un flux plutôt faible parce qu'on est surtout dans des forêts assez anciennes ; tandis que dans des forêts plus jeunes, qui représentent quand même une grosse quantité de nouvelles surfaces, on a un potentiel de stockage de carbone assez conséquent, du moins si elles succèdent à d'anciennes cultures. Mais RENECOFOR n'est effectivement pas le bon réseau pour appréhender cet effet de changement d'usage. Je pense qu'on aura d'ici 2 ans des réponses avec le réseau RMQS et ça pourra donner des indications importantes pour les décisions de gestion : comment répondre aux besoins en biomasse supplémentaire, mais de manière intelligente pour ne pas amenuiser les stocks de carbone.

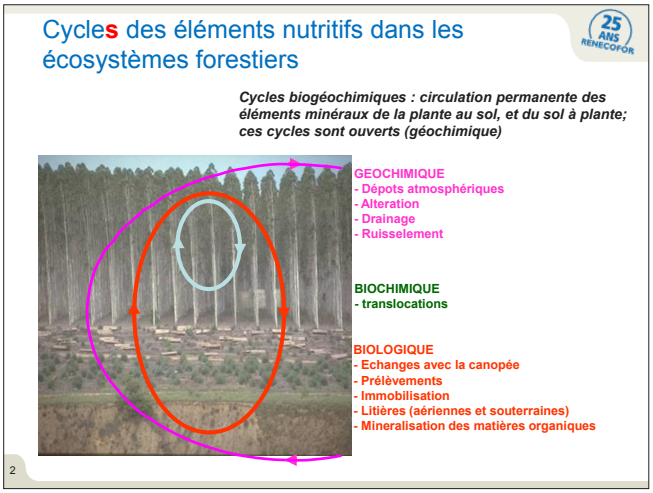
***Pour conclure,** cette session a fait apparaître le rôle encore plus crucial si c'est possible du suivi à long terme. Parce que le carbone du sol - ou le carbone en général - a une dynamique assez longue et on voit bien qu'on a vraiment besoin de ces réseaux d'observation à long terme avec des remesures aux mêmes endroits pour observer les flux. On a besoin de continuer ce travail pour répondre aux enjeux qui nous sont posés.*

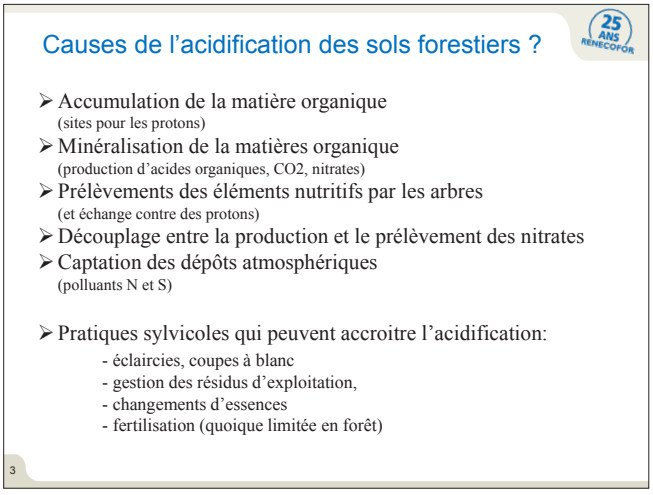
Photo : Luc Croisé, ONF

SESSION 4 - ACIDIFICATION ET CYCLE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

INTRODUCTION

Laurent Saint-André
INRA, Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers





Je vais faire une introduction un peu rapide sur l'acidification et les cycles des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers, mais je dois dire que je ne suis pas du tout expert. Je vais simplement raconter ce qui se fait dans l'unité INRA-BEF en me basant sur les sites atelier du réseau F-ORE-T* dont a parlé Eric Dufrêne, parce que les mêmes éléments vont être illustrés sur le réseau RENECOFOR par les trois intervenants qui vont me succéder.

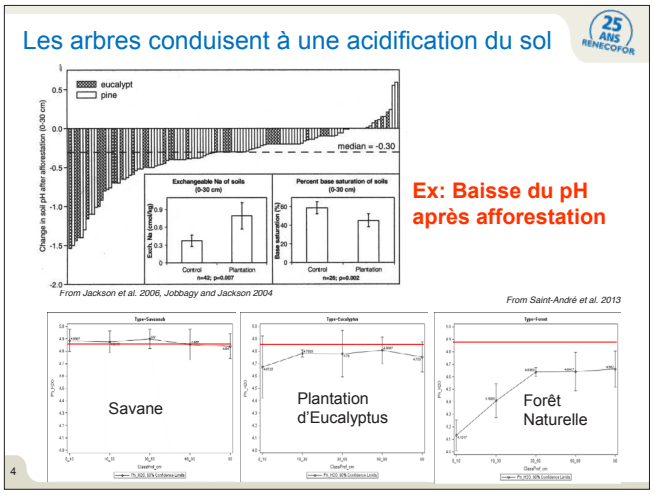
Par rapport au titre de la session, j'insiste sur le fait qu'il n'y a pas un mais plusieurs cycles des éléments nutritifs. Les cycles biogéochimiques, c'est la circulation permanente des éléments minéraux de la plante au sol et du sol vers la plante. Et ces cycles sont ouverts, du moins les **cycles géochimiques**, qui incluent les dépôts atmosphériques, l'altération des minéraux du sol, et ce qui sort c'est le drainage et le ruissellement. Mais il y a deux autres cycles : **le cycle biologique** qui concerne les échanges de la plante avec le sol (chutes de litière, minéralisation des litières, immobilisation dans l'arbre, prélèvement par les arbres des éléments minéraux), et puis **le cycle biochimique**. C'est un cycle très important pour les arbres, qui permet par exemple au Congo aux eucalyptus de faire 30 m de haut et 20 cm de diamètre au bout de 7 ans sur un sol où on ne pourrait même pas faire pousser une carotte. C'est lui qui permet de faire les translocations d'éléments minéraux des organes sénescents vers les nouveaux. C'est donc un facteur important qui permet aux arbres de pousser sur des sols pauvres et souvent impropres à l'agriculture.

Quelles sont les causes de l'acidification des sols forestiers ?

L'acidification des sols forestiers a plusieurs causes. Il y a d'abord l'accumulation de la matière organique, ça fait des sites de fixation pour les protons, et puis la minéralisation de la matière organique avec production d'acides organiques, de CO_2 et de nitrates.

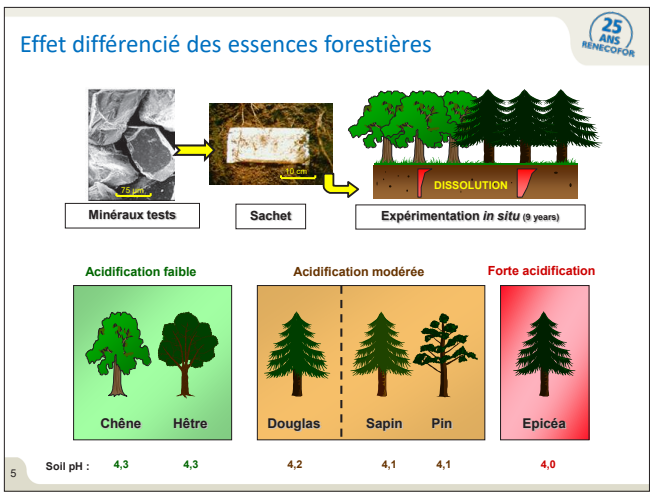
Il y a le prélèvement des éléments nutritifs par les arbres et en particulier les cations (ça permet les échanges des cations contre des protons) ; il y a quelquefois un découplage entre la production et le prélèvement des nitrates ; et il y a aussi la captation des dépôts atmosphériques, notamment les polluants azotés et soufrés. Je vais revenir plus précisément sur ces trois aspects.

Enfin certaines pratiques sylvicoles aussi peuvent accroître l'acidification (je dis bien « peuvent ») : les éclaircies et les coupes à blanc, la gestion des résidus d'exploitation, le changement d'essence et la fertilisation (qui est en fait très limitée en forêt).



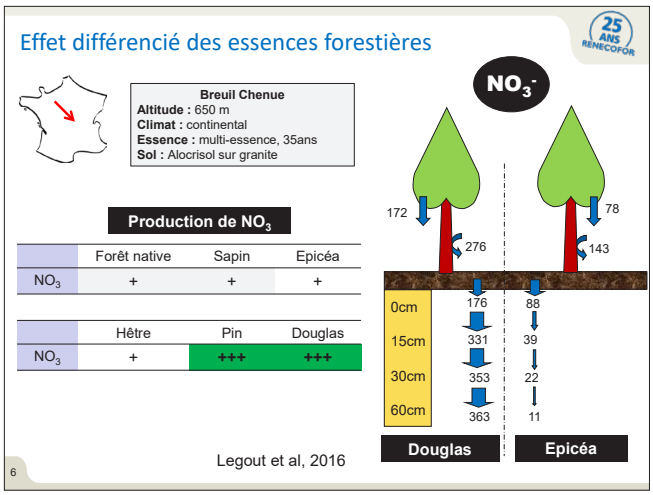
En ce qui concerne **le prélèvement des éléments nutritifs par les arbres**, voici deux illustrations sous les tropiques. En Amérique du Sud (en haut), les chercheurs ont mesuré la différence de pH entre prairie et forêt plantée sur des couples de sites proches : ils constatent que le pH baisse avec le temps depuis l'afforestation, que ce soit en pin ou en eucalyptus, et que la baisse de pH est liée à cet échange de protons contre des cations. La figure est complexe, je ne détaille pas. Même genre de schéma au Congo (en bas) où on a comparé les sols de savane et de forêt à différentes profondeurs (la profondeur augmente de gauche à droite) : le pH est bien plus bas en forêt naturelle que dans la savane, et les plantations d'eucalyptus sur la savane commencent aussi à faire baisser le pH quelle que soit la profondeur.

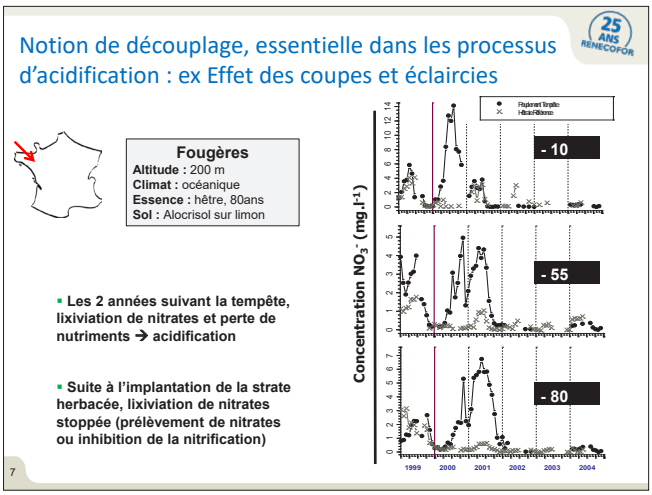
Ces échanges de protons contre des cations, ont un **effet différencié selon les essences**. Si on met des minéraux tests dans le sol et qu'on les laisse se dissoudre pendant 15, 20 ou 30 ans, il y a des essences qui conduisent à une forte acidification (épicéa), d'autres à une acidification intermédiaire, et d'autres encore à une faible acidification ; on le mesure en quantifiant ce qui a été dissous à partir de ces minéraux tests.

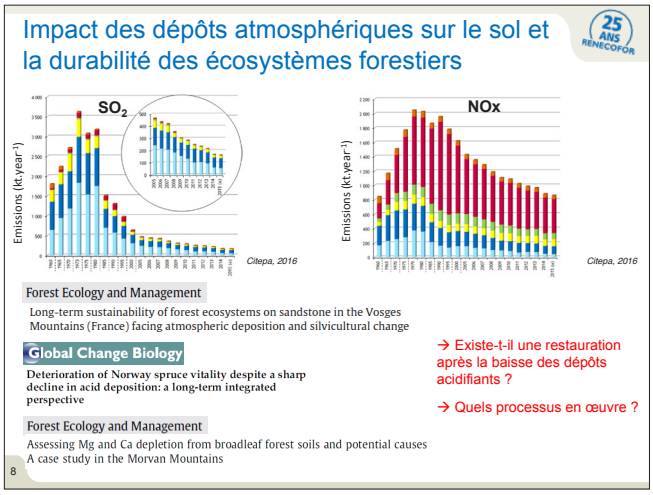


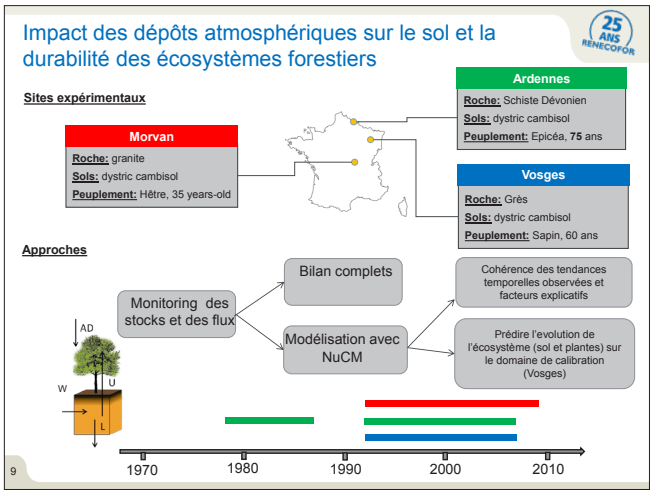
Les essences ont aussi un effet sur **la production et le prélèvement de nitrate** (NO_3) comme le montre le site-atelier de Breuil, dans le Morvan. L'ancien taillis-sous-futaie à base de hêtre a été coupé (en gardant un témoin) pour installer de l'épicéa, du Douglas, des pins, du sapin et du hêtre. La production de nitrate est forte sous Douglas et sous les pins alors qu'elle est assez faible sous les autres essences. De plus, le nitrate est bien prélevé par les épicéas mais pas par les Douglas, et il se retrouve alors dans les eaux de drainage. Pas d'inquiétude, on verra que ça peut se corriger.

Le site-atelier de Fougères illustre un autre cas de **découplage** entre production et prélèvement, notion essentielle dans les processus d'acidification. La tempête de 1999 a abattu une partie des peuplements, ce qui a permis d'étudier l'effet d'une « coupe rase » en matière d'acidification. Après la tempête, on voit une forte lixiviation des nitrates (hausse des concentrations dans les solutions de sol) quelle que soit la profondeur, avec une perte de nutriments, le tout conduisant à une acidification. Mais on retrouve en deux ans le niveau du témoin, épargné par la tempête : pourquoi ? On fait l'hypothèse qu'une strate herbacée s'est mise en route et que, soit elle participe au prélèvement des nitrates produits, soit elle a une action sur les microbes qui inhibe la nitrification.







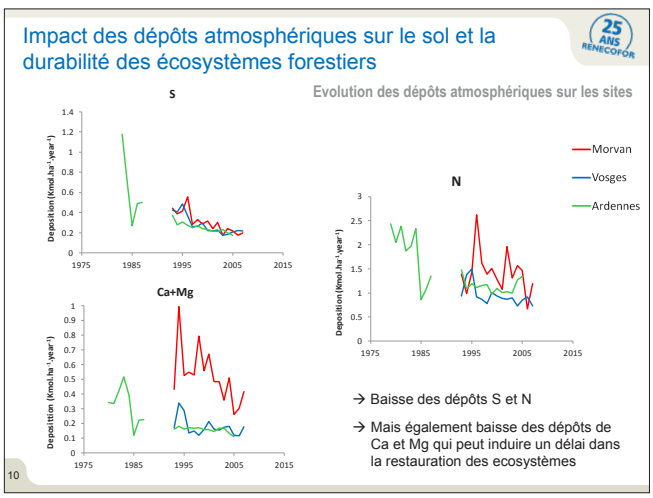


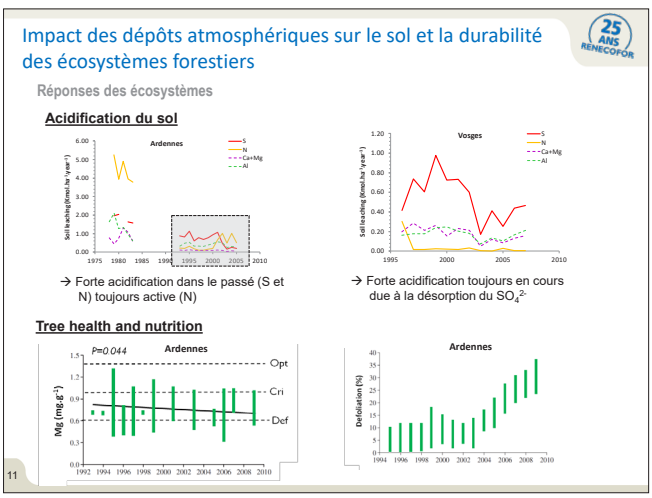
Un autre facteur susceptible de conduire à l'acidification des sols, c'est **l'impact des dépôts atmosphériques,** ceux-là même qui sont à l'origine de la création du RENECOFOR (cf. pluies acides, etc.). On voit sur ces graphiques du CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique) qu'il y a eu une forte diminution des émissions de soufre depuis les années 2000 ; pour l'azote, ça a diminué aussi mais moins, parce que la plus grosse part des émissions vient des véhicules (secteur transport routier, en rouge), et comme il y en a encore beaucoup, ça reste à un niveau élevé. Cette baisse conduit-elle ou pas à une restauration des sols ? Et quels sont les processus à l'œuvre ?

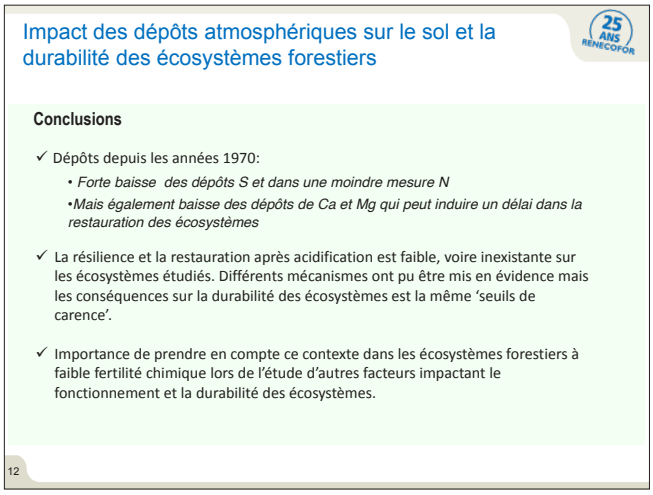
Je m'appuie encore sur les sites-ateliers : dans le Morvan (c'est toujours Breuil), les Ardennes et les Vosges. Vous avez en bas les séries temporelles correspondantes. Sur ces 3 sites on a des données sur plus de 10 ans ; on fait un monitoring des stocks et des flux, ça permet de faire des bilans complets. On utilise aussi des modèles : ici c'est NuCM. Ce modèle permet de regarder s'il y a bien une cohérence des tendances temporelles observées et des facteurs explicatifs ; il permet aussi de prédire l'évolution de l'écosystème, sol et plantes, évidemment dans le domaine de calibration, Eric Dufrêne l'a bien illustré.

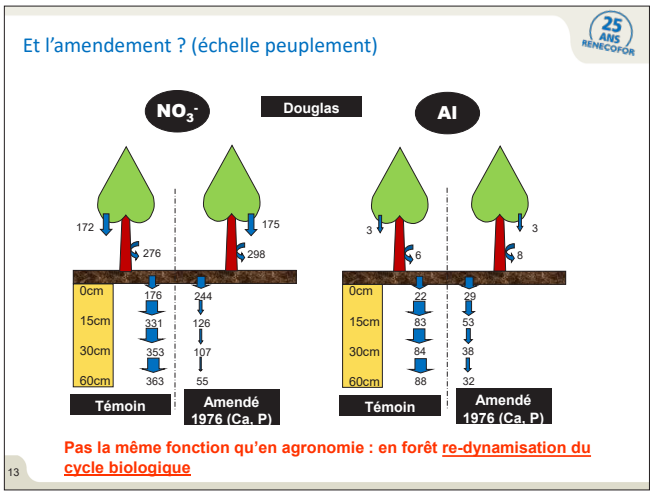
Les dépôts sur ces 3 sites suivent la tendance générale moyenne des émissions suivies par le CITEPA. On a une baisse des dépôts soufrés (à gauche, en haut) et azotés (à droite) mais on voit aussi (en bas à gauche) que sur tous les sites il y a une baisse des dépôts de cations (calcium et magnésium). Donc le déséquilibre peut se maintenir.

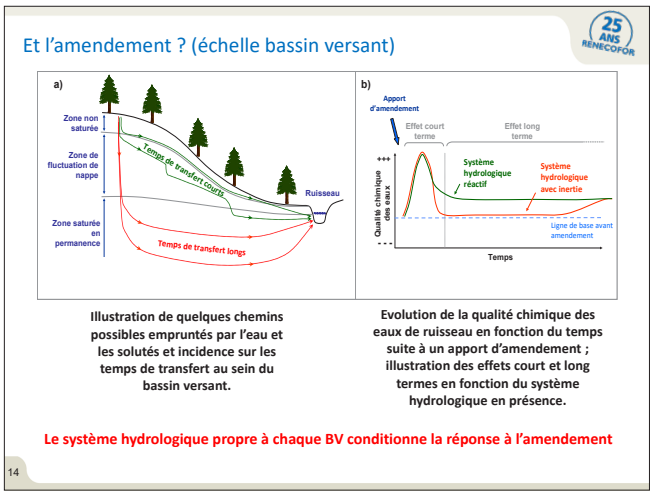
On a vérifié cet éventuel déséquilibre en regardant ce qui sort dans les eaux de drainage. C'est ce qui est illustré dans les graphiques du haut : j'ai choisi de représenter les sites Ardennes (à gauche) et Vosges (à droite), parce qu'ils sont différents au niveau des processus. On a toujours une acidification dans le sol. Dans le passé, elle venait de l'azote (jaune) et du soufre (rouge) ; dans les Ardennes, elle est toujours active pour l'azote. Dans les Vosges aussi on a toujours une acidification, mais qui est due à la désorption du SO_4 dans le sol : la charge qui s'est créée au moment des forts dépôts (dans les années 70) s'est accumulée dans le sol, et maintenant elle se désorbe petit à petit donc le processus d'acidification continue. Si on regarde dans les Ardennes ce que ça donne pour les arbres (graphiques du bas), on commence à passer en-dessous des seuils critiques dans les analyses foliaires (à gauche), et on commence à voir apparaître des phénomènes de défoliation (à droite) depuis les années 2005.

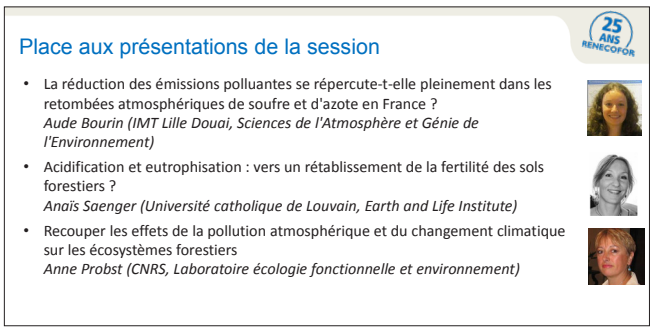












Ce qu'il faut retenir de cette étude, c'est que depuis les années 1970 il y a une forte baisse des dépôts polluants, mais également une baisse des cations ce qui induit un délai dans la restauration (d'autant que la charge continue). Actuellement la résilience est faible, la restauration est faible voire inexistante sur certains des écosystèmes observés. Du coup il faut prendre en compte ce contexte dans les écosystèmes où il y a une faible fertilité chimique - ceux qui sont basés essentiellement sur le cycle biologique - parce que ce contexte cumulé avec les autres facteurs (sylviculture, changement climatique, etc.) peut conduire à une accélération des phénomènes.

Est-ce que ça se corrige ?

Oui. Revenons sur le Douglas à Breuil : le peuplement Témoin « crache » du nitrate, comme je l'ai dit ; il n'arrive pas à prélever tous les nitrates. On a rajouté 800 kg/ha d'amendement calcium-phosphore et ça a suffi à ce qu'il n'y ait quasiment plus de nitrate dans les eaux de drainage. Il ne faut pas imaginer que l'amendement a remonté le pH, ce n'est pas du tout ça ; l'amendement a redynamisé le cycle biologique et on a à nouveau des arbres qui sont capables de prélever le nitrate en même temps qu'ils le produisent, grâce à une activation des microorganismes (ce n'est pas encore tout-à-fait clair, mais on y travaille).

L'atténuation du drainage de nitrates par l'amendement conduit aussi à l'atténuation du drainage de cations et notamment d'aluminium (toxique).

À l'échelle d'un bassin versant, on va avoir des réponses qui sont soit courtes soit à plus long terme. On a étudié deux bassins versants, un sur grès et un sur granite. Dans les deux cas on a eu un effet rapide de l'amendement sur la qualité chimique des eaux de drainage, et ensuite cette amélioration s'est stabilisée dans le système granitique (courbe verte) alors que dans le système sur grès (courbe rouge), après dissipation des premiers effets, l'amélioration ne commence vraiment que maintenant, 20 ans après l'amendement. Vous voyez que les réponses ne sont pas forcément immédiates, ça dépend des contextes pédoclimatiques.

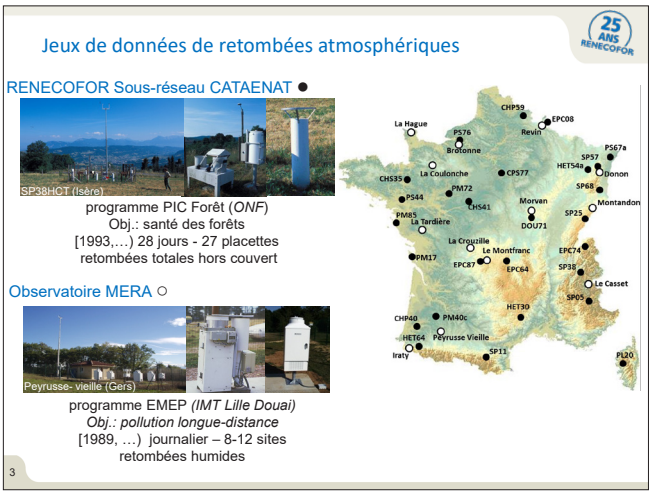
Ici se termine cette introduction…

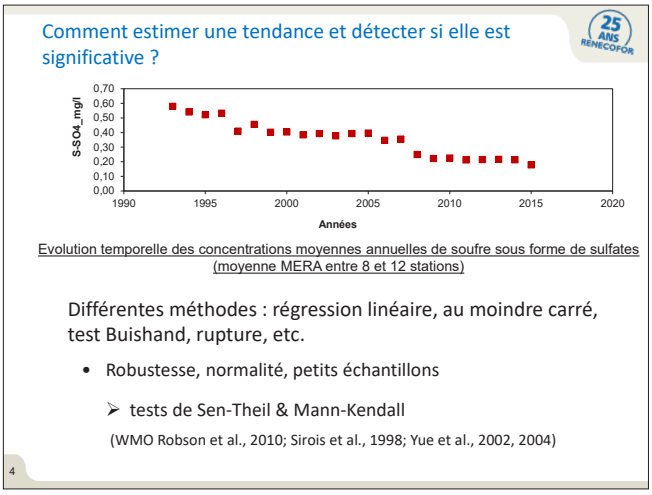
…place maintenant aux intervenants

C'est Aude Bourin qui commence en nous parlant de la réduction des polluants et de l'impact sur les écosystèmes forestiers. Ensuite Quentin Ponette se substituera à Anaïs Saenger pour parler d'acidification, eutrophisation et rétablissement de la fertilité des sols forestiers. Enfin Anne Probst parlera des travaux en cours pour simuler les effets combinés de la pollution atmosphérique et du changement climatique.

LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS POLLUANTES SE RÉPERCUTE-T-ELLE PLEINEMENT DANS LES RETOMBÉES ATMOSPHÉRIQUES DE SOUFRE ET D'AZOTE EN FRANCE ?

Aude Bourin
IMT Lille Douai, Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement (SAGE)





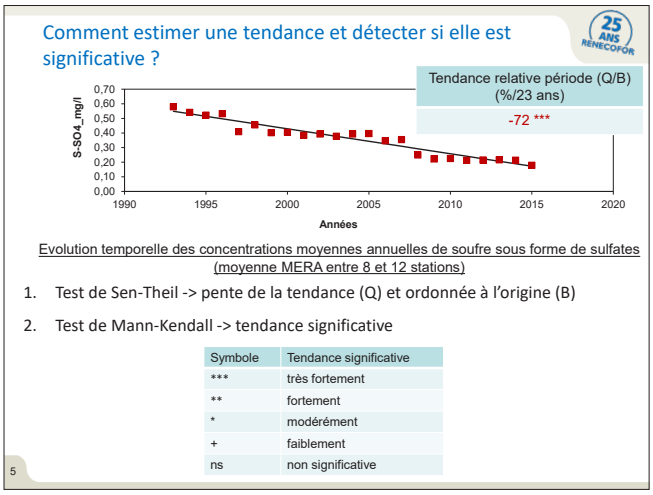
Les résultats que je vais présenter sont issus du projet SESAME (2010-2014), dans le cadre du programme PRIMEQUAL* « Pollution longue distance » piloté par l'Ademe et le ministère de l'Écologie. Projet multipartenarial coordonné par le département SAGE de l'IMT* Lille-Douai et qui associait notamment le laboratoire EcoLab (incarné ici par Anne Probst) et l'ONF (RENECOFOR). Ces travaux ont perduré ensuite avec la collaboration de l'ONF et d'EcoLab.
Pour rappel, le département SAGE est le coordinateur technique et scientifique de l'observatoire de Mesure et d'Évaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance, le réseau MERA.

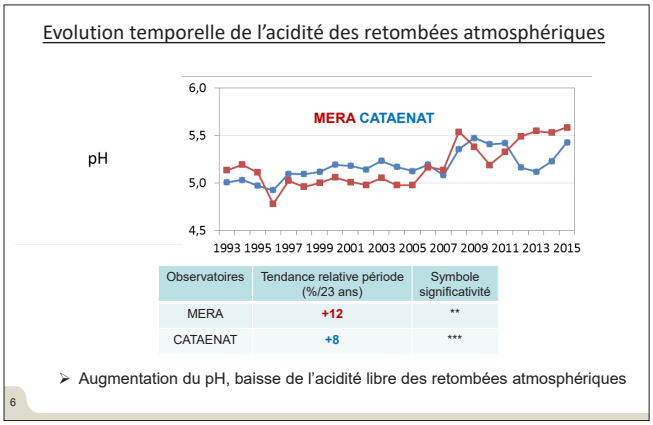
L'objectif de ces travaux était de savoir si, à partir des réseaux d'observation installés maintenant depuis un certain nombre d'années, on parvenait à estimer des tendances temporelles, des évolutions en termes de concentrations de soufre et d'azote dans les précipitations, et également en termes de dépôts. On a tenté de comprendre les déterminants et on verra par la suite que c'est plus complexe qu'on ne le croit. Tout ça pour évaluer les politiques de réduction des émissions polluantes.

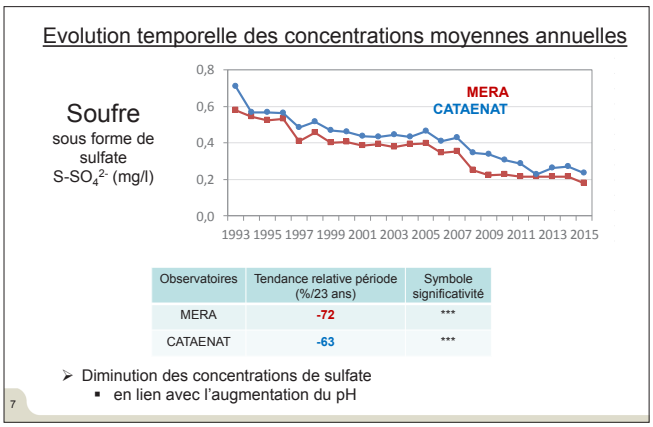
Jeux de données et méthode d'estimation des tendances

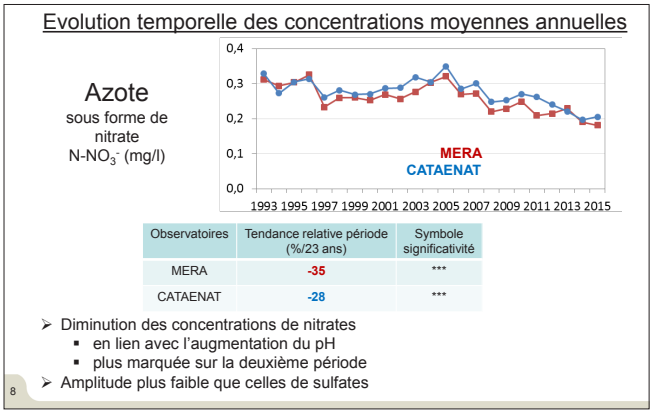
Pour ces travaux, nous avons utilisé – et comparé – les données sur les retombées atmosphériques produites par RENECOFOR sur le sous-réseau CATAENAT et par l'observatoire MERA*.
CATAENAT comprend 27 placettes réparties de façon assez homogène sur l'ensemble du territoire comme on le voit sur la carte (points noirs) : il s'agit des retombées totales, hors couvert, mesurées sur 28 jours. De son côté, l'observatoire MERA fait partie du programme EMEP* pour la mesure et l'évaluation des pollutions à longue distance à l'échelle européenne. C'est un peu comme le PIC Forêts* mais l'objectif est de caractériser les pollutions à longue distance sur tout le réservoir atmosphérique : on est vraiment au-dessus de l'interface sol. Les mesures sur cet observatoire MERA sont réalisées de manière journalière et ne concernent que les retombées humides ; grâce à un couvercle qui ne s'ouvre qu'en cas de pluie, on ne récupère que la pluie, pas les dépôts secs. Il y a une douzaine de sites en France (points blancs) en tout cas sur la période qui nous intéresse, de 1990 jusqu'à 2015.

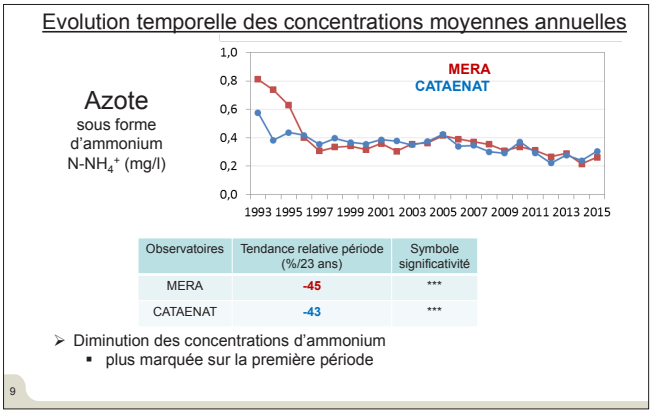
Voyons sans entrer dans le détail comment on estime une tendance. Voici une série temporelle des concentrations moyennes de soufre, sous forme de sulfate, dans les pluies de l'observatoire MERA. On voit bien qu'il y a une tendance mais par quelle méthode l'estimer et comment la quantifier, pour savoir si elle est significative ? Il existe différentes méthodes. Celle que nous avons adoptée consiste en deux tests statistiques : tests de Sen-Theil et de Mann-Kendall.











Le test de Sen-Theil permet d'avoir la pente de la tendance et une ordonnée à l'origine qui permet d'estimer une tendance relative sur une période donnée, ici de 23 ans (1993-2015). Le test de Mann-Kendall permet de connaître la significativité de cette tendance : de très fortement significative (***) à modérément significative (*) ou non significative (ns).

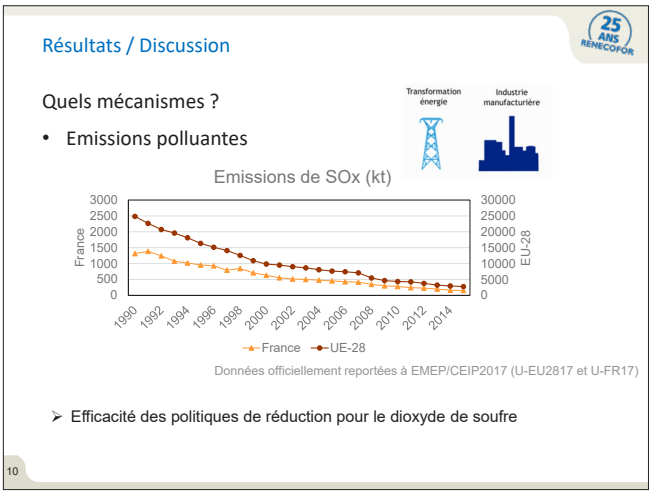
Résultats : estimation des tendances

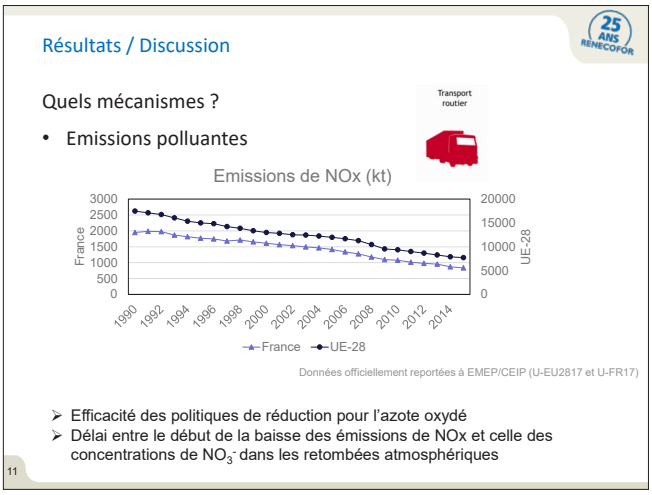
Entrons dans le vif du sujet. Commençons par les mesures de pH dans les retombées atmosphériques du réseau MERA (en rouge) et du réseau CATAENAT (en bleu) entre 1993 et 2015. On voit une évolution, qui a été caractérisée : 12 % sur la période de 23 ans pour MERA et 8 % pour CATAENAT, soit un ordre de grandeur similaire. Cette augmentation de pH indique une baisse de l'acidité libre des retombées atmosphériques sur le sol : ce qui va tomber hors couvert et en zone rurale.

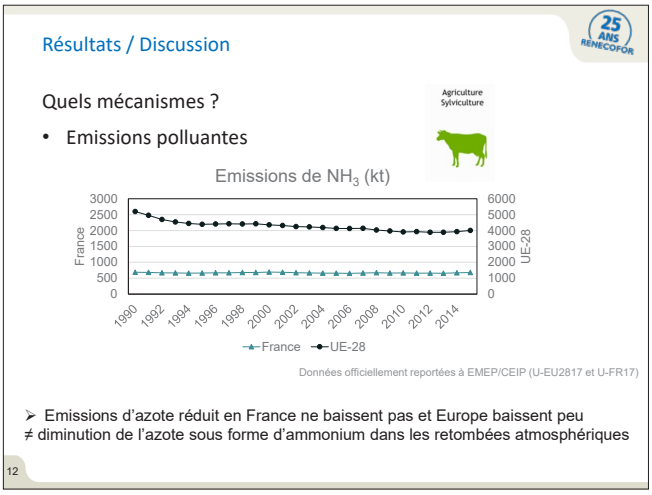
Pour les concentrations de soufre sous forme de sulfate, on voit une baisse importante, avec une significativité très forte : -72 % sur MERA et -63 % sur CATAENAT, et cette baisse est en lien avec l'augmentation du pH.

Pour l'azote sous forme de nitrate, on a encore des tendances comparables, mais assez différentes de celles des sulfates. Globalement la baisse est de -35 % sur MERA et -28 % sur CATAENAT, également en lien avec l'augmentation du pH, mais on peut distinguer deux périodes avec une diminution plus marquée en seconde période (à partir des années 2003-2005). L'amplitude de la baisse est deux fois moins importante que celle des sulfates.

Enfin pour l'azote sous forme d'ammonium : tendance à la baisse assez marquée, très significative, comparable entre MERA et CATAENAT (environ -44 %) et cette diminution est plus marquée en début de période, essentiellement sur les premières années.







Quels sont les mécanismes de ces évolutions ?

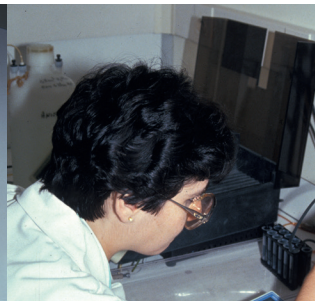
Les sulfates des retombées atmosphériques sont liés aux émissions de dioxyde de soufre, principalement par les industries de transformation de l'énergie et l'industrie manufacturière. Le graphique présente l'évolution des émissions de dioxyde de soufre en France (orange, échelle de gauche) et dans l'Europe des 28 (en rouge, échelle de droite). On peut en conclure qu'effectivement les politiques de réduction ont été efficaces pour le SO_2.

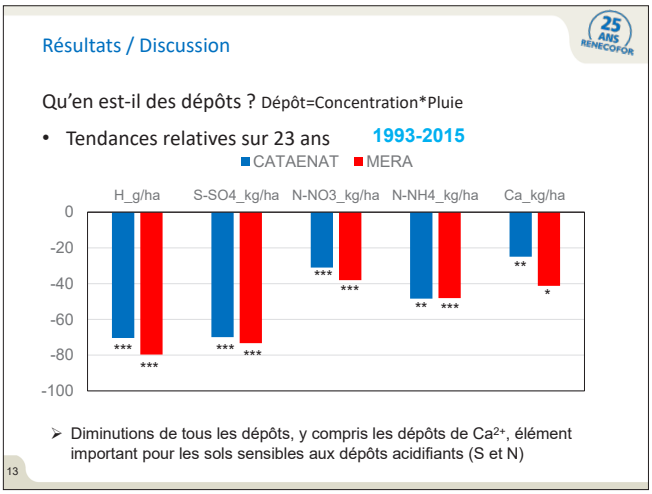
En ce qui concerne les émissions d'oxydes d'azote (NOx) par le transport routier, en France (bleu clair, échelle de gauche) et en Europe (bleu foncé, échelle de droite), on a également des tendances à la baisse. Ces émissions de NOx sont à rapprocher des retombées de nitrate, et on a vu que les dépôts azotés sous forme de nitrate avaient diminué (environ -35 %) entre 1993 et 2015, c'est donc important de voir que ces observations se corroborent. Par contre, on remarque qu'il y a eu un délai entre la baisse des émissions de NOx (qui ne manifeste pas de changement de pente) et celle des retombées azotées sous forme de nitrate qui ne diminuent de manière plus marquée qu'à partir de 2005.

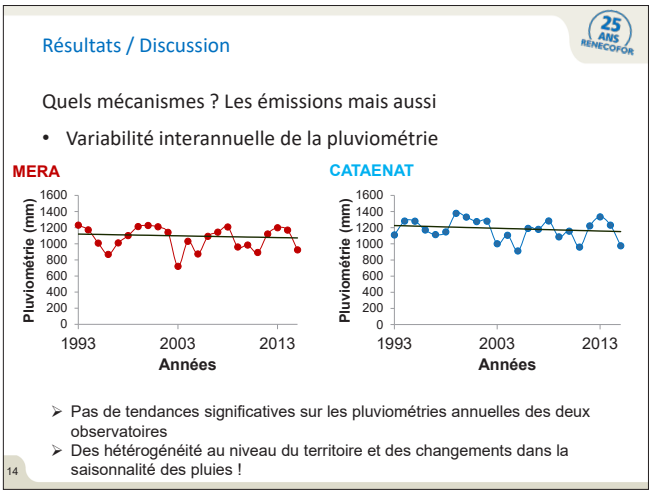
Pour l'ammoniac (azote sous forme réduite), qui est principalement issu de l'agriculture et de la sylviculture et qui est lié aux concentrations d'ammonium dans les retombées, le constat est très différent. Les émissions en France (bleu clair, échelle de gauche) n'évoluent pas depuis les années 1990 et en Europe (bleu foncé, échelle de droite), elles baissent, mais assez peu, alors qu'on a vu une diminution des retombées d'ammonium, surtout sur la première période.

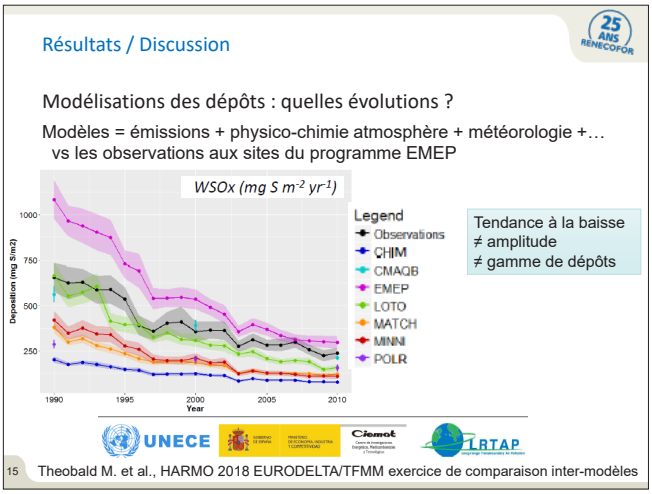
Photo : Sébastien Cecchini, ONF

Placette du sous-réseau CATAENAT (Aigoual, HET30) pour la mesure des dépôts hors couvert









Au final, ce qui intéresse la communauté des forestiers c'est le dépôt, c'est-à-dire la concentration multipliée par la quantité de pluie tombée, alors que la communauté de l'atmosphère s'intéresse plutôt à la concentration pour essayer de comprendre les processus impliqués.

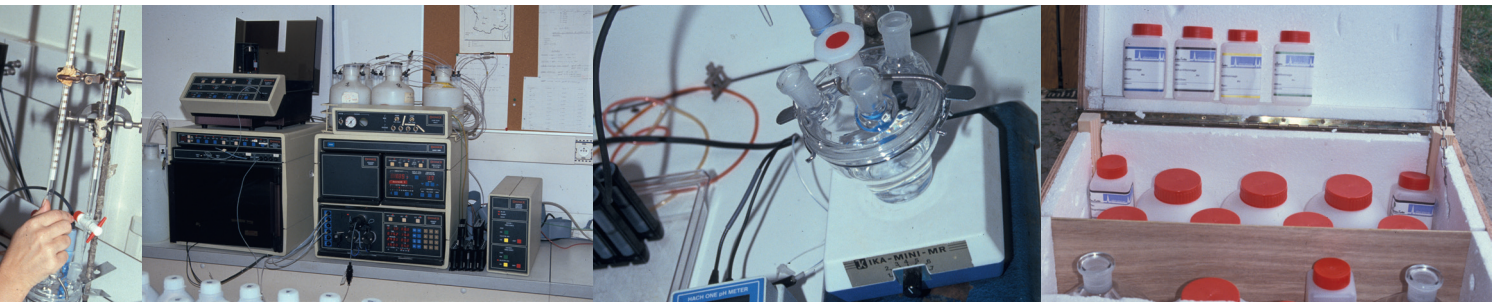
Pour les dépôts, les tendances sur les deux réseaux sont présentées différemment et de façon plus synthétique : ce graphique vous présente les tendances relatives, entre 0 et -100 %, pour les dépôts de H^+ (protons), de soufre sous forme de sulfate, d'azote sous forme de nitrate et d'ammonium, et de calcium. On constate que les diminutions sont avérées pour toutes les formes d'ions inorganiques et notamment, Laurent Saint-André l'a souligné précédemment, pour les dépôts de Ca^{2+} (calcium), qui est un élément très important pour les sols dits « sensibles aux dépôts acidifiants ».

Qu'y a-t-il derrière ces dépôts ? Les émissions bien sûr mais aussi la variabilité de la pluviométrie. Pour la pluie, la variabilité interannuelle est extrêmement forte et on ne voit pas de tendance significative sur la pluviométrie annuelle, en tout cas sur les 23 ans de données. Par contre il y a des choses intéressantes à regarder plus en détail (mais ç'aurait été trop long de le présenter ici), au niveau spatialisation du territoire et au niveau saisonnalité des pluies.

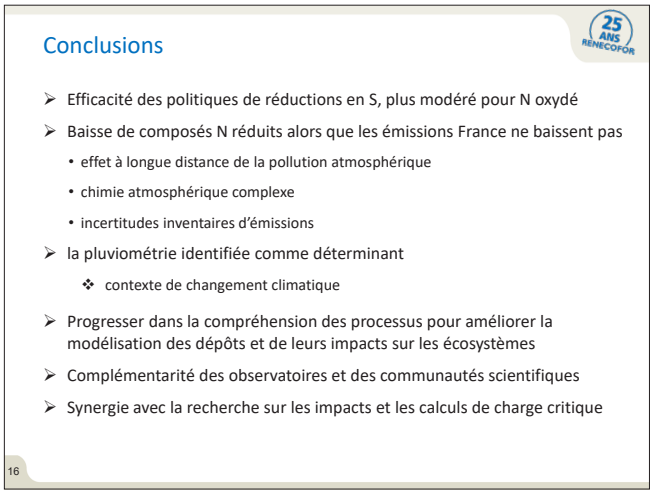
Pour finir, je vais **parler un peu de modélisation**. L'idée est de chercher à reproduire l'évolution observée des dépôts pour pouvoir faire ensuite des projections dans l'espace et le temps.

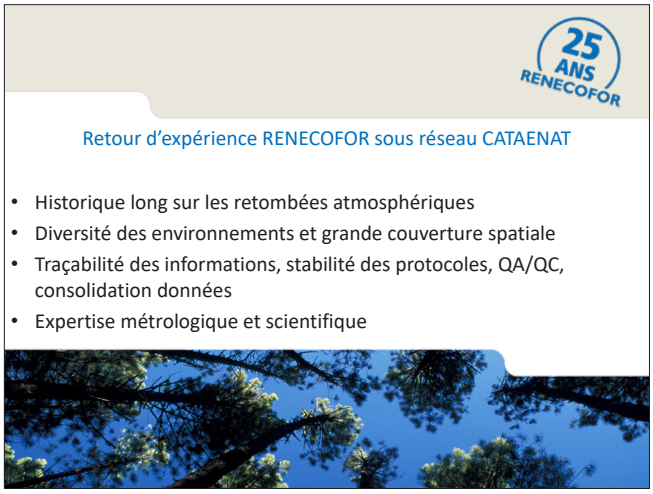
Il existe pour ça divers modèles, qui ont plusieurs variables d'entrée : les émissions, la physicochimie de l'atmosphère qui est plus ou moins connue, la météorologie qui a également ses incertitudes, etc. Voici les résultats d'un exercice de comparaison de modèles, que Marc Théobald vient de présenter à la conférence HARMO 18. Les évolutions simulées ont été comparées aux observations : la courbe noire représente les observations sur les sites du programme EMEP et les courbes colorées correspondent aux différents modèles. On se rend compte que la tendance à la baisse est bien captée par les modèles, par contre l'amplitude est très différente, notamment pour le modèle EMEP (en rose), et on a des gammes de dépôt, notamment dans les années 90, qui ne sont pas du tout comparables aux moyennes observées sur les sites.

Donc il y a encore du travail à faire et ça permet d'orienter les travaux de recherche sur différents mécanismes qui sont encore mal connus.



Photos : Erwin Ulrich, ONF





Conclusions

On a vu l'efficacité des politiques de réduction pour le soufre, plus modérée pour les oxydes d'azote. La baisse des composés azotés réduits (ammonium) n'est pas vue dans les émissions, en France en tout cas : on peut imaginer qu'il y a un effet à longue distance de la pollution atmosphérique ; il y a également une chimie qui est complexe dans le réservoir atmosphérique, il ne faut pas le négliger, et il y a également des incertitudes sur les inventaires d'émissions.

La pluviométrie est un déterminant important des dépôts, et il faut penser qu'on est dans un contexte de changement climatique : si la pluviométrie a tendance à augmenter en termes saisonniers ça peut avoir des impacts assez importants puisque la variabilité saisonnière de la charge atmosphérique est aussi très importante pour les dépôts.

Il faut donc progresser dans la compréhension des processus, améliorer la modélisation pour bien comprendre et bien prédire car les simulations sont utilisées pour calculer les impacts sur les écosystèmes (Anne Probst va en parler). Ce qui conduit à souligner la complémentarité des observatoires et des communautés scientifiques, et la nécessité de travailler en synergie avec la communauté des impacts et les calculs de charges critiques, etc.

Je voudrais remercier l'ensemble des collaborateurs : notamment Anne Probst (EcoLab) et Manuel Nicolas (ONF), mais aussi les personnes de Mines de Saint-Etienne qui ont contribué à ce travail, des personnes de Météo France, et de Atmo France. Et je rappelle que ces travaux ont été financés par le ministère de la Transition écologique et solidaire et l'Ademe au travers de PRIMEQUAL–Predit.

Retour d'expérience RENECOFOR-CATAENAT.

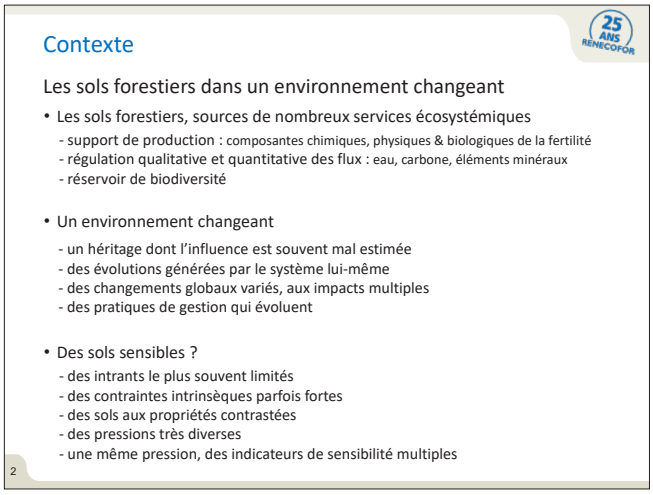
L'historique long sur les retombées atmosphériques est très précieux, de même que la diversité des environnements et la couverture spatiale, grâce à quoi nous avons pu également travailler sur la spatialisation qui permet de calculer les charges critiques. Je note aussi, et j'insiste là-dessus, la traçabilité des informations : sur un réseau qui a plus de 20 ans, c'est extrêmement important, de même que la stabilité des protocoles. Les contrôles qualité, les contrôles au niveau analyse, c'est aussi un très bel atout, avec la consolidation des données : quand on travaille sur des séries de données, on est heureux qu'elles soient bien consolidées !

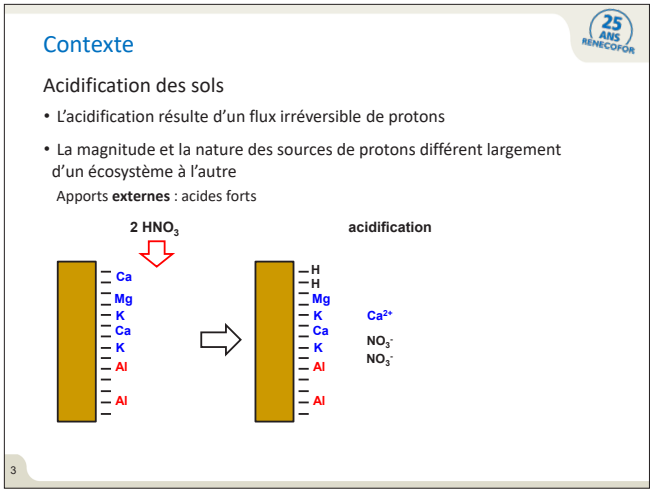
Et je salue l'expertise métrologique et scientifique de l'ensemble des personnes qui travaillent sur le réseau.

Je vous remercie.

ACIDIFICATION ET EUTROPHISATION : VERS UN RÉTABLISSEMENT DE LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS ?

Quentin Ponette
Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute





Bonjour à tous. Je me substitue à Anaïs Saenger, qui a changé de vie depuis l'époque où elle travaillait sur la thématique de la détection et de la quantification des changements temporels des caractéristiques des sols du réseau RENECOFOR. C'est au nom de toute l'équipe qui a travaillé à analyser ces données que je vais vous présenter ce sujet qui concerne l'évolution des sols forestiers en 15 ans de suivi.

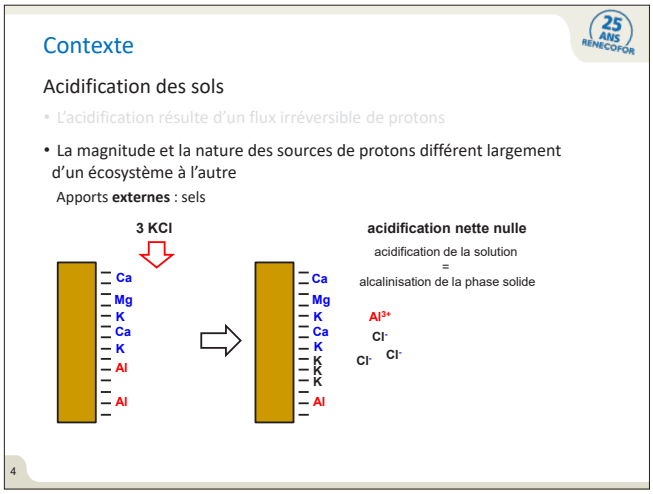
Contexte

Pour commencer, quelques rappels sur les sols, qui jouent un rôle très important en termes de services écosystémiques. Le sol est un support essentiel pour la production, par ses effets sur les différentes composantes de la fertilité : chimique, physique, biologique. Il tient un rôle très important dans la régulation des flux de carbone, comme on l'a vu dans la session précédente, mais aussi de l'eau et des éléments minéraux. Et en plus c'est un réservoir considérable de biodiversité.

Les sols forestiers évoluent sous l'influence d'une série de facteurs extrêmement variés et qu'on maîtrise assez peu. Il y a déjà tout ce qui a eu lieu dans un passé relativement lointain et qu'on ne connaît pas toujours (les antécédents culturaux, les coupes réalisées dans les décennies passées…). Il y a le système lui-même, l'évolution du peuplement, qui fait évoluer les propriétés des sols. Il y a bien sûr les changements globaux, et en particulier des apports acides et d'azote et leur diminution récente. Et il y a enfin les pratiques de gestion, qui elles-mêmes évoluent. Je passe vite, par manque de temps…

Disons aussi quelques mots de **l'acidification des sols,** pour compléter un peu ce qui en a été dit en introduction. L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons : c'est la notion de découplage dont parlait Laurent Saint-André. Elle peut être liée à différents apports d'acide, soit dans les sols, soit par les apports atmosphériques. Nous allons considérer ici principalement les apports atmosphériques, en distinguant les types d'apport.

Il y a d'abord les apports d'acide sensu stricto, ici sous forme d'acide nitrique (HNO3), qui acidifient le sol en déplaçant des cations basiques (Ca, Mg, K). On voit sur cet exemple que des protons (H) se sont substitués sur le complexe d'échange au calcium, lequel se retrouve en solution (Ca2+) et exposé de surcroît aux pertes par drainage.

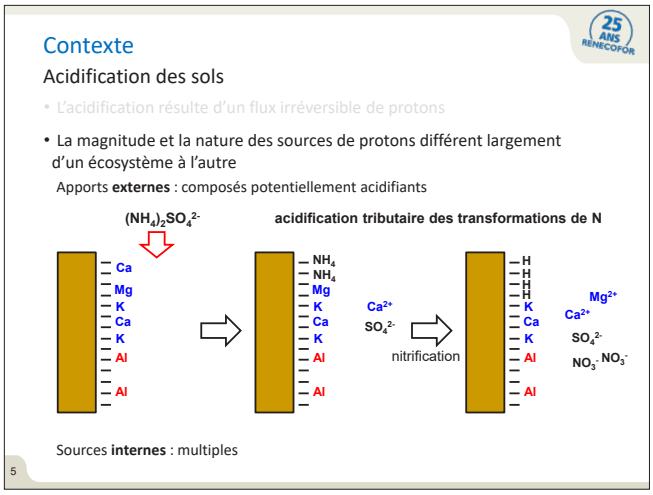


Mais les apports atmosphériques contiennent aussi des sels d'origine marine. Ici j'ai pris l'exemple du chlorure de potassium (KCl) : dans ce cas l'effet sur l'acidification des sols est nul parce que l'alcalinisation nette de la phase solide du sol consécutive à l'adsorption du potassium (K) sur le complexe d'échange correspond précisément à l'acidification nette de la solution.

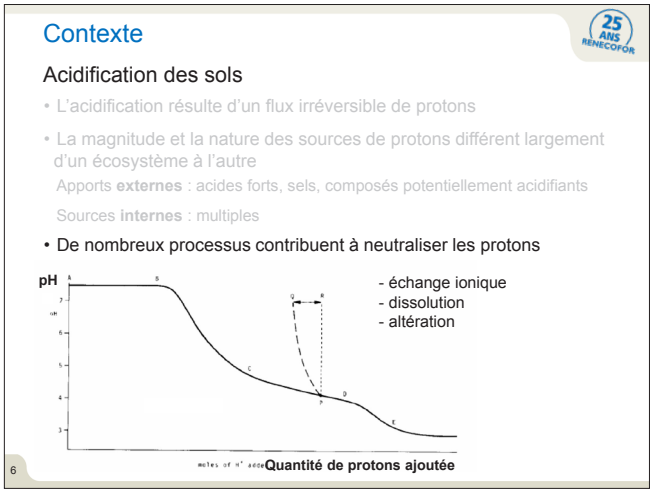
Enfin on a des cas intermédiaires de composés potentiellement acidifiants, où le devenir en termes d'acidification dépend très fortement de la forme de l'azote et des transformations de l'azote dans le sol. Par exemple, dans une première étape, l'ammonium (NH_4) peut se fixer au niveau du sol et, relativement plus tard, si les conditions le permettent, se nitrifier (oxydation en NO_3) et engendrer une acidification du sol, par la libération des protons (H).

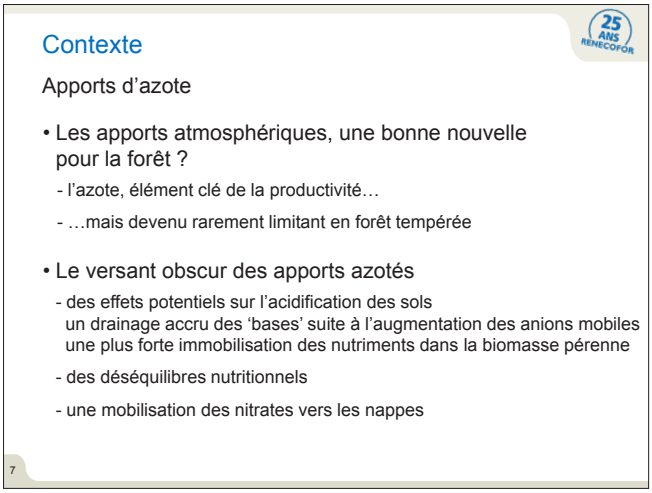
Le sol peut réagir face à un apport d'acide, mettre en place un certain nombre de systèmes tampons. C'est ce que vous voyez sur la courbe : il n'y a pas une baisse automatique et directe du pH selon la quantité de protons ajoutée, cette évolution est tamponnée par une série de réactions qui vont laisser des traces dans le sol, et ce sont ces traces qui vont nous servir d'indicateur et que nous allons analyser plus en détail. Ces processus affectent la qualité des sols et des eaux, mais de façon différenciée selon les caractéristiques initiales des sols :

- réduction des réserves minérales ;
- réduction de la capacité d'échange ;
- réduction des 'bases' échangeables et du taux de saturation en bases ;
- solubilisation de l'aluminium ;
- diminution du pH de la solution du sol.



Parlons enfin des **apports d'azote.** L'azote peut être considéré comme bénéfique compte-tenu de son impact potentiel sur la productivité, mais nos écosystèmes tempérés sont souvent saturés en azote. Du coup, cet azote constitue plutôt un problème par ses effets sur l'acidification, les déséquilibres nutritionnels et éventuellement par ses impacts négatifs via le lessivage des nitrates.





Contexte

Questions clés

- Les propriétés des sols ont-elles changé en 15 ans de suivi ?
- Les changements détectés sont-ils cohérents ?
- Ces changements peuvent-ils être attribués à l'évolution récente des dépôts atmosphériques ?
- Ces changements sont-ils susceptibles d'affecter :
  la forêt future ;
  les services écosystémiques attendus de celle-ci ?

Méthodes

Prélèvements des sols

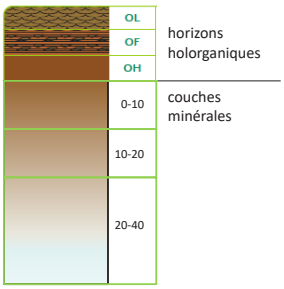
Principes

Chimie des sols : contrôle de la variabilité spatiale

- latérale
5 grappes (13,5 × 13,5 m)
5 points par grappe

- verticale
horizons holorganiques :
Ol, Of, Oh
couches minérales :
0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm

Description des sols : 2 fosses par placette (profondeur ≤ 1 m)
- analyses physico-chimiques ciblées
- estimation qualitative de la charge caillouteuse



9

Méthodes

Analyses chimiques

- Paramètres mesurés
  Mêmes méthodes et même laboratoire (LAS, INRA Arras) aux deux campagnes

Paramètre	Méthode	Hor. holorganiques		Couches minérales (cm)		
		Ol, Of	Oh	0-10	10-20	20-40
C organique[#]	Combustion sèche	×	×	×	(×)	(×)
	Méthode Anne				×	×
N total	Combustion sèche	×	×	×	(×)	(×)
	Méthode Kjeldahl				×	×
P extractible	Dyer (pH $CaCl_2$ ≤ 6,5) / Joret-Hébert (pH $CaCl_2$ > 6,5)		×	×	×	×
	Colorimétrie					
pH H_2O / $CaCl_2$	1 : 5 (V : V) H_2O ou $CaCl_2$ 0,01 M		×	×	×	×
Cations échangeables	$BaCl_2$ 0,1 M		×	×	×	×
	ICP (K, Ca, Mg, Mn, Al) ou titrage (H, Al)					
K, Ca, Mg totaux	$HF/HClO_4$	×	×			
	ICP					

[#] Dosage des carbonates si pH $CaCl_2$ > 6

- Paramètres calculés
  ECEC ($cmol_c\ kg^{-1}$) = $(K+Ca+Mg+Al)_{ech}$
  S/T (%) = $((K+Ca+Mg)_{ech}$ / ECEC) × 100

10

Méthodes

Estimation des stocks

$$Stock_x = Concentration_x \times Masse/ha\ (à\ 105°C) \times (1 - Cailloux\ hors\ DA)$$

Analyses chimiques en laboratoire sur un échantillon représentatif

Echantillonnage d'une surface (cadre de litière) ou d'un volume défini (cylindre de densité apparente)

Cailloux, pierres, blocs estimés sur fosses

Objectifs et méthodes

Quels sont les grands objectifs de l'étude par rapport à ces différentes questions ?

Nous avons d'abord cherché à savoir si les propriétés des sols avaient changé en 15 ans de suivi et quelles étaient ces propriétés. Nous avons ensuite voulu savoir si les changements détectés étaient cohérents, s'ils pouvaient être expliqués par les évolutions récentes des dépôts atmosphériques notamment. Enfin, dans une phase plus exploratoire, nous avons essayé de voir quelles pourraient être les conséquences de ces changements sur la forêt future et les services écosystémiques.

Pour répondre à ces questions, le réseau RENECOFOR est un outil magnifique. Mathieu Jonard a déjà présenté la méthode de prélèvement d'échantillons (cf. session 3). En deux mots, elle vise d'abord à maîtriser la variabilité spatiale, qui est fort importante pour les sols forestiers, à l'aide d'un échantillonnage par grappes. Et elle permet d'étudier comment les propriétés évoluaient avec la profondeur, puisqu'on soupçonne que l'évolution est plus importante en surface qu'en profondeur, avec un découpage par couche : les horizons holorganiques d'une part et les couches minérales de l'autre. Deux campagnes de prélèvement ont eu lieu : une en 1993-1995, l'autre en 2007-2012, soit 15 ans en moyenne après la première, en faisant migrer ces fameuses grappes dans une direction fixée pour réaliser le même type de prélèvements.

Ces sols ont été analysés par un laboratoire accrédité, le laboratoire de l'INRA à Arras. On a analysé un certain nombre de paramètres pour traduire les évolutions des sols : un pôle lié à la matière organique avec le carbone, l'azote et le phosphore, un indicateur de l'acidité (pH) et des indicateurs indirects de l'acidité, les cations échangeables, et enfin, pour les horizons de surface, les cations totaux.

À partir de ces paramètres on a pu en calculer d'autres : la capacité d'échange cationique des sols (somme des bases échangeables et de l'aluminium échangeable), et un indicateur de la saturation des sols en bases échangeables, ce qu'on appelle le taux de saturation.

Nous avons pu alors calculer des stocks et évaluer les changements de stocks au cours du temps, après avoir vérifié que les analyses donnaient des résultats comparables d'une campagne à l'autre : c'est tout l'aspect contrôle de qualité.

Photo : Erwin Ulrich, ONF

Méthodes

Quantification des changements

- Evolution des propriétés chimiques individuelles
  - Modèle statistique
    - campagne : effet fixe
    - placette : effet aléatoire
  - Analyse des effets
    - *P* valeur (< 0,05)
    - taille des effets : faible (↗, ↘), moyen (↗↗, ↘↘), fort (↗↗↗, ↘↘↘)
- Evolution conjointe des propriétés chimiques
  - Corrélations de rang sur les changements de propriétés entre campagnes
  - Analyses en Composantes Principales sur les valeurs centrées réduites par placette
- Divergence d'évolution selon le type de sol
  - Trois niveaux d'acidité - sols carbonatés exclus selon pH H_2O dans 0-10 cm :
    très acides (< 4,5), intermédiaires (4,5-5,5), faiblement acides (> 5,5)
  - Modèle statistique : interaction (campagne × type de sol)

Résultats

Horizons holorganiques

Stocks de C et N

Rapport C/N

Stocks de Ca, Mg & K totaux

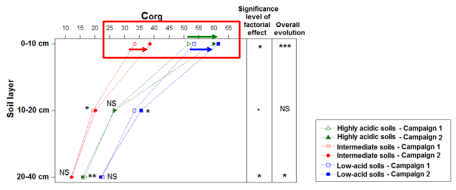
	Effet
C_{org}	↗
N_{tot}	NS
C/N	↗↗
K_{tot}	NS
Ca_{tot}	↗
Mg_{tot}	↗

Résultats

Couches minérales

C organique, N total, C/N ; P extractible

Couche (cm)	Paramètre chimique C_{org}	N_{tot}	C/N	P_{extr}
0-10	↗↗	↗↗	↗↗	NS
10-20	NS	↘↘	↗↗↗	NS
20-40	↘	↘↘↘	↗↗↗	NS
0-40	↗↗	↘	↗↗↗	NS



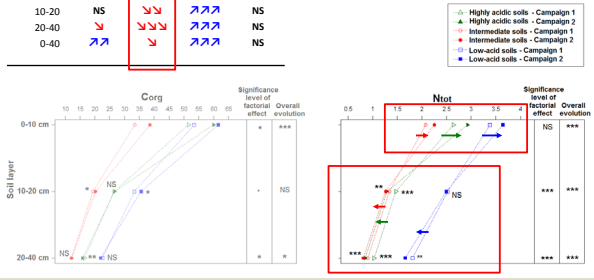
14

Résultats

Couches minérales

C organique, N total, C/N ; P extractible

Couche (cm)	Paramètre chimique C_{org}	N_{tot}	C/N	P_{extr}
0-10	↗↗	↗↗	↗↗	NS
10-20	NS	↘↘	↗↗↗	NS
20-40	↘	↘↘↘	↗↗↗	NS
0-40	↗↗	↘	↗↗↗	NS



15

Ces changements ont d'abord été quantifiés paramètre par paramètre, et comme on a beaucoup de données, la probabilité de mettre en évidence des changements est élevée. Par conséquent il ne suffit pas de se baser simplement sur la significativité des effets, il faut apprécier la « taille » de ces effets. C'est pourquoi vous verrez dans la suite un système de petites flèches : plus il y a de flèches plus l'effet est important d'un point de vue écologique, qu'il soit à la hausse (flèches bleues) ou à la baisse (flèches rouges).
Nous avons ensuite essayé de voir globalement comment les sols ont évolué en prenant en considération l'ensemble des propriétés. Et nous avons enfin essayé de voir dans quelle mesure les évolutions pouvaient diverger en fonction des types de sol et notamment des niveaux d'acidité. C'est pourquoi, dans les figures suivantes vous verrez les sols très acides sont représentés en vert, les sols faiblement acides en bleu (nous avons exclu de l'analyse les sols carbonatés) et les sols intermédiaires en rouge.

Résultats : les évolutions constatées

Dans les **horizons de surface** les changements sont relativement modérés : on a une augmentation du stock de carbone (déjà évoquée dans la session 3), une stabilité de l'azote et surtout une augmentation importante du rapport C/N qui est issue directement des deux effets précédents. Au niveau des bases totales, il y a relativement peu de changement.

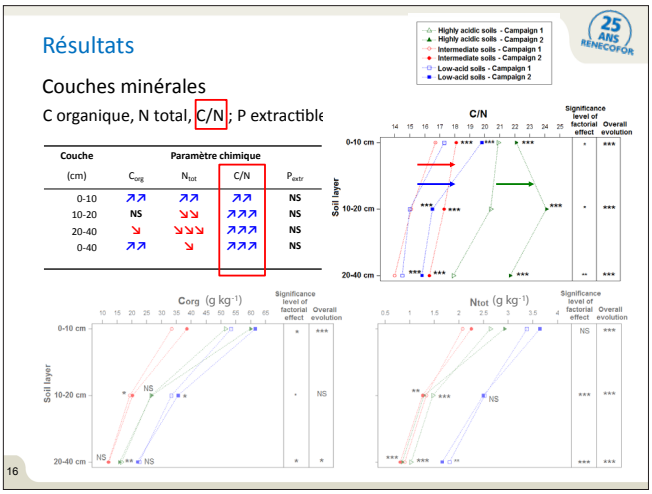
Passons aux **couches minérales,** en commençant par les éléments qui traduisent l'évolution du pôle organique. Je ne m'étends pas sur le cas du **carbone**, que Mathieu Jonard a présenté en détail. Je vais plutôt me concentrer sur l'azote, dont les évolutions sont très différentes en surface et dans les couches profondes.

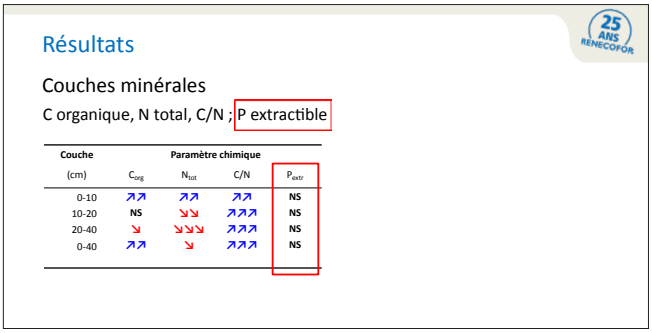
Dans la couche 0-10 cm, on constate une augmentation du **stock d'azote** alors que dans les couches profondes on constate une diminution importante de l'azote. Ces évolutions sont observées quel que soit le type de sol. Sur les graphiques, le sens des flèches va de la campagne 1 à la campagne 2 et montre pour les trois familles de sols une augmentation dans les horizons de surface et une diminution pour les horizons profonds. Le résultat mathématique de cette évolution relative du carbone et de l'azote, c'est une augmentation du **rapport C/N** dans tous les cas.

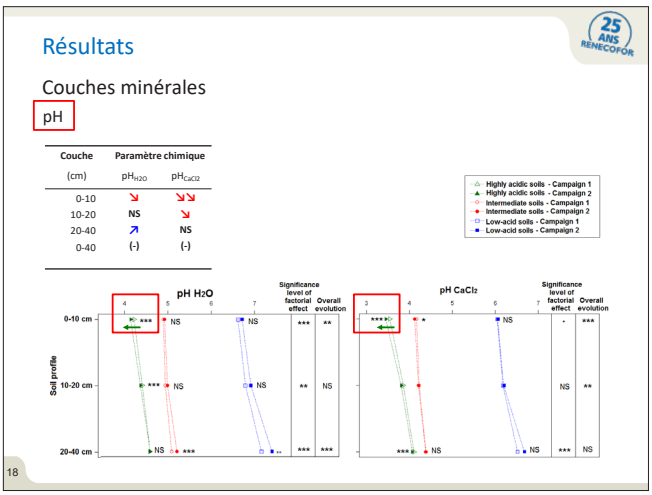
En ce qui concerne le **phosphore** nous n'avons pas observé d'évolution significative.

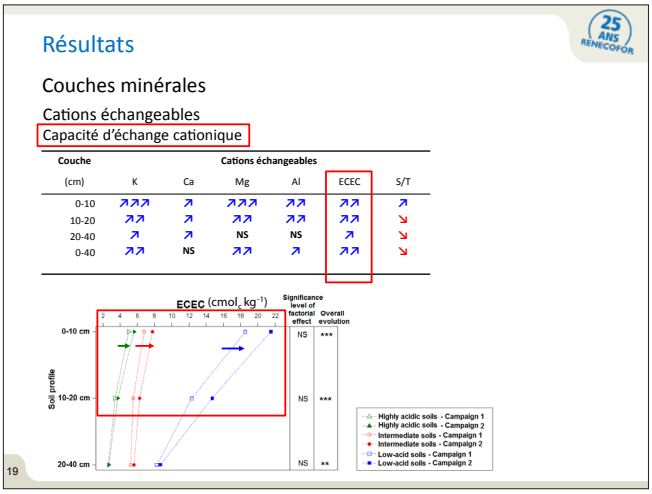
Le pH, lui, a baissé de manière relativement faible et seulement dans les horizons de surface (0-10 voire 10-20 cm), mais exclusivement dans les sols les plus acides (courbes vertes).

Quant à la **capacité d'échange** du sol, donc la capacité à retenir des éléments, on constate qu'elle a augmenté dans les deux horizons de surface. Là encore c'est un effet général qui s'observe quel que soit le type de sol. En moyenne, **le calcium** contribue très peu à cette augmentation de charge ; sa teneur diminue même dans certains cas comme dans les sols les plus acides, en profondeur.
Pour **le potassium et le magnésium**, en revanche, on a une augmentation importante, du même ordre de grandeur dans les deux horizons de surface, et là encore quel que soit le type de sol.



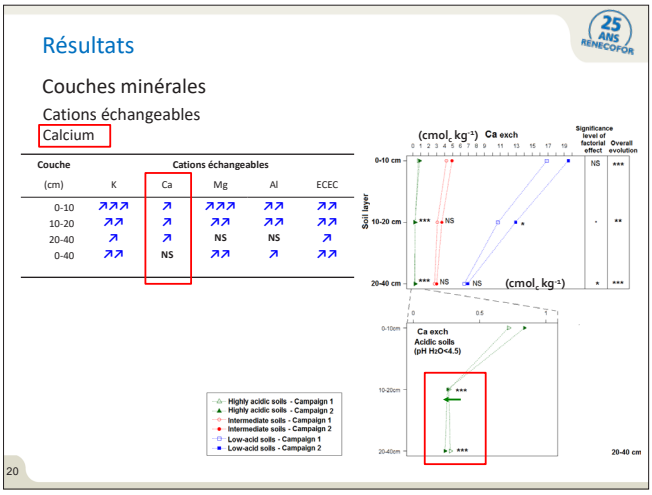


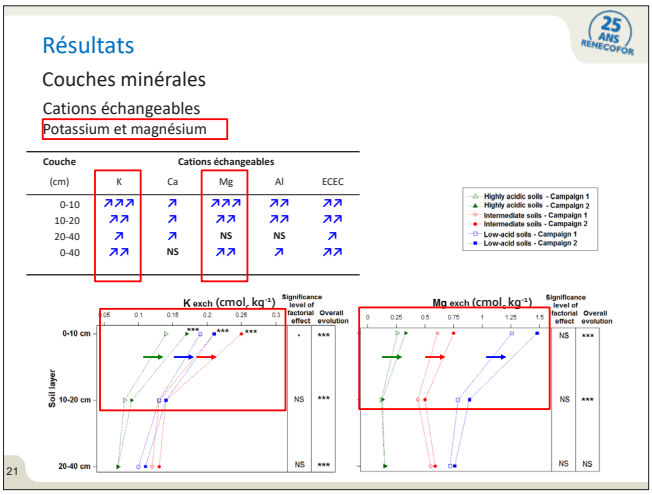


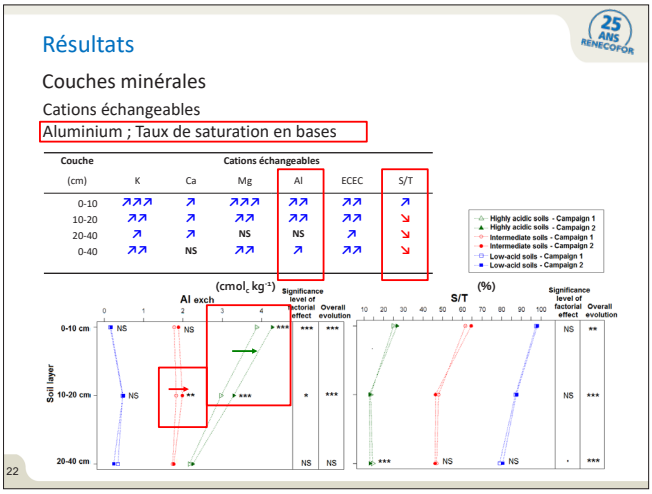


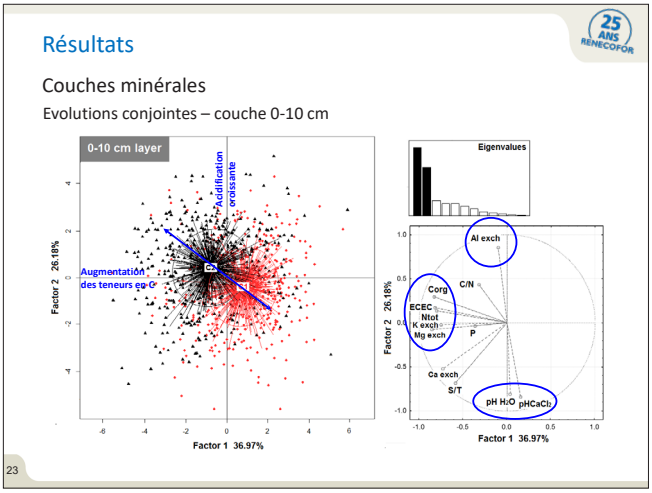
Enfin si on s'intéresse à **l'aluminium**, qui traduit l'acidité, on constate également en moyenne une augmentation, toujours dans les deux mêmes couches, mais avec des nuances importantes selon le type de sol puisque cette augmentation est assez logiquement observée surtout dans les sols les plus acides, en vert sur la figure.

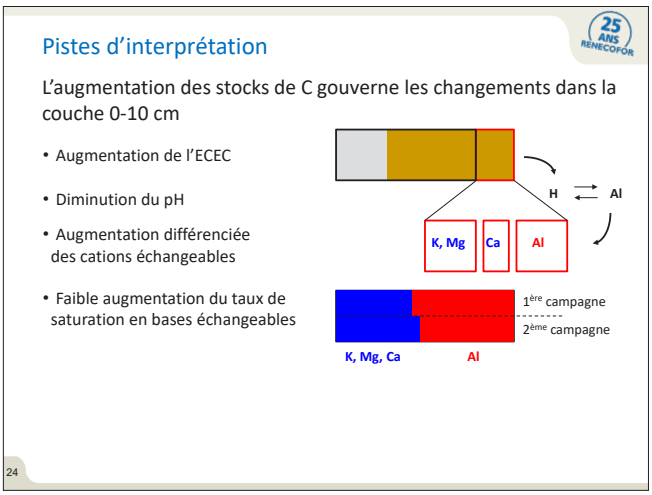
Le résultat des courses, c'est que globalement le **taux de saturation en bases** évolue relativement peu. Un peu à la hausse dans l'horizon de surface, et un tout petit peu à la baisse dans les horizons plus profonds.

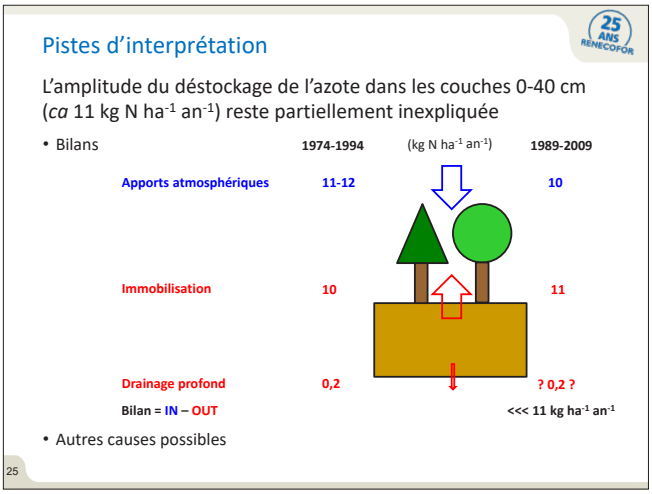












Quelles sont les causes de ces changements dans les couches minérales ?

Je vais passer rapidement sur ce type de figure qui montre l'évolution globale des propriétés des sols, ici dans l'horizon 0-10 cm : en rouge la position des sols à la campagne 1, en noir la position à la campagne 2. Vous voyez qu'il y a un 'déplacement' important des caractéristiques des sols dans deux directions : déplacement essentiellement vers la gauche, qui témoigne d'une augmentation des teneurs en carbone, et secondairement vers le haut, qui représente une augmentation de l'acidité. Je passe sous silence les couches sous-jacentes, où l'évolution est moins marquée, pour arriver directement à une tentative d'interprétation.

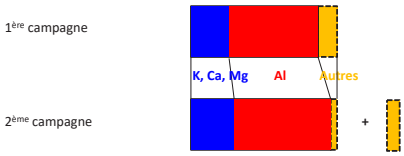
Tentative d'interprétation

Au niveau de la couche 0-10 cm, il semble que la dynamique du carbone soit le principal moteur des changements. Dans cette couche holorganique, les échangeurs sont essentiellement constitués de matière organique (c'est ce qui est représenté en brun), par opposition aux constituants minéraux. Le fait de rajouter du carbone organique va augmenter la charge et par conséquent l'ECEC (capacité d'échange cationique). D'autre part ce carbone organique va avoir un impact sur l'acidité du sol : il entraîne une baisse de pH qui, elle-même, peut conduire à relâcher des ions aluminium par solubilisation des phases solides. On a vu préalablement que l'augmentation de la charge était compensée principalement par du potassium, du magnésium et de l'aluminium, et relativement peu par du calcium. Globalement, le résultat c'est que le taux de saturation en bases augmente par rapport à ce qu'on observait en première campagne, mais très légèrement puisque le potassium et le magnésium augmentent mais également l'aluminium.

En ce qui concerne l'azote, nous avons été surpris de constater un déstockage si important dans les horizons profonds et les causes ne sont pas encore absolument élucidées. Nous avons d'abord examiné si ça pouvait être lié à l'évolution des apports et des sorties, en comparant ces apports et ces sorties sur deux périodes de référence : la période 1974-1994, d'une part, et 1989-2009, de l'autre. Comme Aude Bourin l'a souligné, les apports atmosphériques d'azote ont diminué. Du côté des sorties, l'immobilisation a pu augmenter puisque l'apport d'azote peut avoir un effet fertilisant sur la forêt ; nous avons donc supposé une immobilisation légèrement plus importante d'azote dans la biomasse. Par contre nous n'avons trouvé aucun indice d'augmentation des sorties d'azote par drainage. Donc en l'état, ce bilan ne permet pas d'expliquer ce déstockage important. D'où l'hypothèse que nous a soufflée Jean-Luc Dupouey : peut-être est-ce lié au développement de la végétation dans les placettes RENECOFOR ?
Quant à la capacité d'échange, dont on a vu qu'elle a augmenté en surface, elle augmente aussi dans la couche 10-20 cm, mais l'interprétation est différente : ça ne peut pas venir d'une augmentation des teneurs en carbone puisqu'on n'en a pas détecté. Ce qu'on pense c'est qu'elle est simplement liée au fait que les cations (K, Ca, Mg, Al) ont pu déplacer une partie des ions échangeables qui ne sont pas comptabilisés dans les analyses. C'est ce qui est représenté sur la figure : ce qui est comptabilisé, c'est ce qui est figuré en rouge et en bleu, pas ce qui est en jaune. Entre les deux campagnes, davantage de K, Ca, Mg et Al ont pu occuper des sites précédemment occupés par ces cations non comptabilisés, parmi lesquels il y a probablement de l'ammonium, qui a pu migrer ou se nitrifier et contribuer au déstockage d'azote que j'ai évoqué.

Pistes d'interprétation

L'augmentation de l'ECEC dans la couche 10-20 cm s'explique par des échanges avec des cations non / mal comptabilisés (H, Mn, Fe, NH_4, …)



La mobilisation de NH_4^+ pourrait contribuer au déstockage de N

26

Conclusions et perspectives

- Changements significatifs de nombreux paramètres après 15 ans
  - grande cohérence globale
  - changements détectés principalement dans les couches supérieures, sauf N
- Nature des changements différents selon la couche
  - 0-10 cm : changements gouvernés par l'augmentation des stocks de C
  - 10-40 cm : changements dominés par la réduction des stocks de N, à stock de C constant
- Lien avec évolution récente des dépôts atmosphériques complexe
  - acidification :
    en 0-10 cm, évolution partiellement liée à celle des stocks de C
    réponses contrastées selon l'indicateur : pH, éléments échangeables, S/T
  - déstockage de l'azote dans les couches 10-40 cm :
    sans lien apparent avec la réduction des apports azotés
    processus à clarifier
- Impacts possibles sur le fonctionnement des écosystèmes
  - changements significatifs mais évolutions relatives ou absolues contrastées
  - dynamiques de C et N largement affectées, avec nombreux impacts observés / attendus
  - intérêt d'un couplage observation-expérimentation-modélisation

27

RENECOFOR et moi…

- Ma première expérience professionnelle…
- De très nombreux points FORts
  - possibilité
    de détecter des évolutions temporelles
    de confronter la réponse de paramètres variés
    d'intégrer de nombreux processus dans l'interprétation des résultats
  - intégration dans des réseaux
    contextualisation et généralisation des résultats
- Des évolutions possibles
  - diversifier les écosystèmes forestiers suivis
  - tester et adopter des techniques de mesures innovantes
  - suivre de nouveaux paramètres

22

En résumé et en conclusion

Nous avons pu observer des changements importants de plusieurs paramètres physicochimiques, et de manière fort cohérente. La nature de ces changements diffère selon la couche considérée. Dans la couche 0-10, le changement est essentiellement lié à l'augmentation du stock de carbone ; dans la couche 10-40, il est principalement lié au déstockage de l'azote, à carbone constant. Les liens avec les évolutions récentes des dépôts atmosphériques sont assez complexes.

En ce qui concerne l'acidification, on a vu qu'il y a une diminution du pH assez contradictoire avec la diminution des apports acides et qui peut s'expliquer plutôt par une augmentation des stocks de carbone. Si on considère différents indicateurs, on observe parfois des réponses contrastées : une diminution du pH et par contre une augmentation des bases échangeables, une augmentation de l'aluminium échangeable et globalement une augmentation très légère du taux de saturation en bases. Pour le déstockage de l'azote, les processus restent à clarifier, probablement à l'aide de la modélisation.

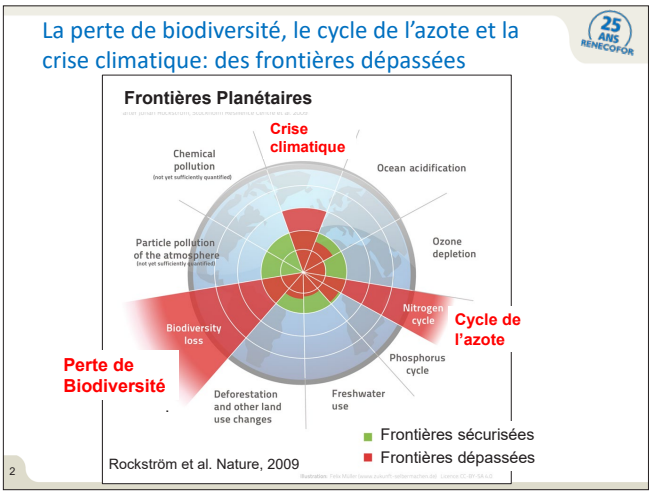
Que dire de **mon point de vue sur RENECOFOR ?**

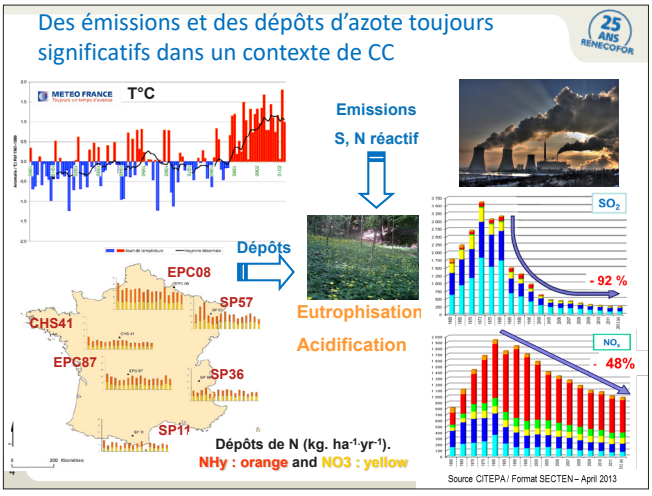
RENECOFOR a été ma première expérience professionnelle : j'ai passé une année à Fontainebleau, où j'ai pu analyser les données de la première campagne de sols.
À part ça, vous l'avez compris, le réseau a de très nombreux points forts, grâce à une collaboration efficace entre de très nombreux acteurs — les forestiers mais aussi tous ceux qui interviennent à toutes les étapes du processus pour les analyses chimiques, le contrôle des données, les analyses, etc. Grâce à la puissance de ce jeu de données on est en mesure de détecter des changements, et de confronter ces changements à l'évolution d'autres variables de réponse (voir si ça va dans le même sens ou non). Il est également possible d'intégrer de nombreux processus pour interpréter les résultats et comprendre les changements observés. Par ailleurs, RENECOFOR n'est pas isolé mais intégré dans un ensemble de réseaux, non seulement en France mais aussi à l'échelle internationale, ce qui permet de contextualiser les résultats et aussi, dans une certaine mesure, de les généraliser.
Il y a des pistes d'évolution possibles, notamment sur la question des âges dont on constate que c'est quelque chose de très important ; il faudrait pouvoir diversifier les écosystèmes en termes d'âge. On a vu aussi qu'il peut être utile de tester et mettre en place des techniques innovantes (télédétection par exemple) pour mesurer un certain nombre de paramètres, et on peut imaginer qu'il sera nécessaire de mesurer d'autres paramètres à l'avenir.

Je vous remercie pour votre attention

SIMULER LES EFFETS COMBINÉS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Anne Probst
CNRS, laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab)





Je vais avoir le plaisir de vous présenter des résultats de recherches collaboratives entre disciplines, qui impliquent des biogéochimistes, des écologues et des modélisateurs. Nous sommes ici à l'aboutissement d'une étape de cette démarche de modélisation, et je n'ai indiqué ici que les auteurs qui ont contribué le plus récemment, mais ça ne reflète pas tout le travail qui a été fait auparavant.

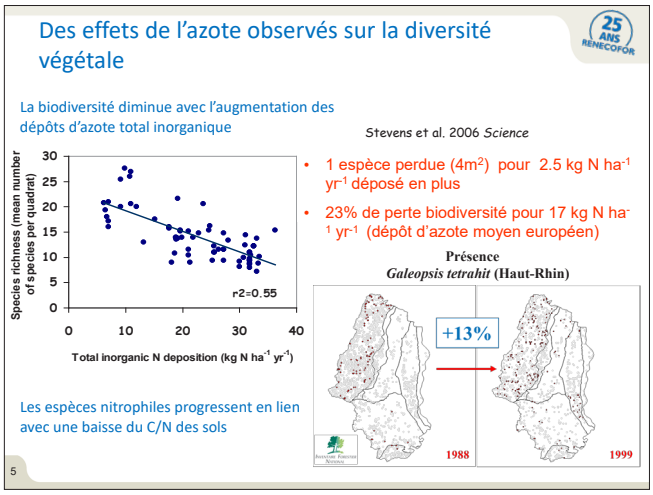
Je remercie Eric Dufrêne de nous avoir éclairés, dans sa présentation (session 3), sur ce qu'est un modèle et sur ses limites. Pour ma part, j'ai intitulé cette communication « simuler les effets combinés de la pollution atmosphérique et du changement climatique… » parce que simuler, c'est faire semblant : c'est ce qu'on fait avec la modélisation.

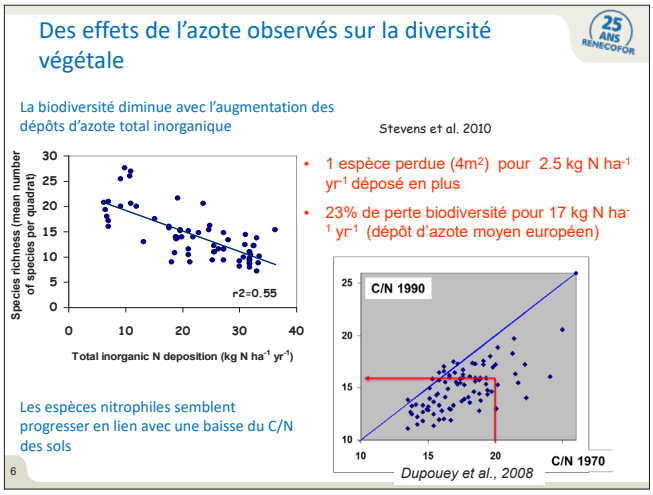
La forêt à la croisée des principales menaces globales

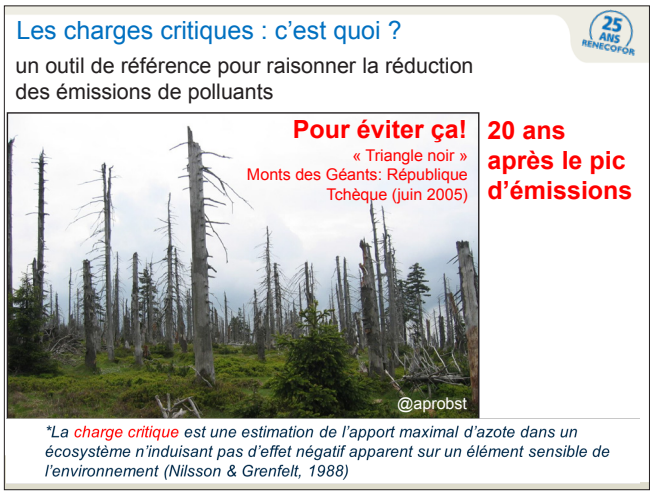
Ce schéma, publié par Rockström dans une « grosse revue » en 2009, nous montrait déjà les limites de notre planète et les grands enjeux auxquels elle est confrontée aujourd'hui. En vert, on a en gros les limites tolérables, et en rouge ce qui commence à être très problématique. Il y a 3 grands enjeux qui étaient déjà identifiés comme problématiques : la crise climatique, dont on a beaucoup parlé, la perte de biodiversité et le cycle de l'azote.

Vous savez tous qu'on était ces dernières décennies dans un cycle d'émissions très actives de SO_2 et de NOx dues à notre activité anthropique. Vous savez aussi que nous connaissons un changement avéré de température, comme le montre le grahique de Météo France (en haut à gauche) qui donne, depuis 1900, l'écart des températures moyennes annuelles à la moyenne décennale de la période de référence 1961-1990 : on voit que ces dernières années on est vraiment dans des anomalies positives systématiques de température (en rouge).

Les émissions de SO_2 et NOx, se traduisent par des dépôts sur des écosystèmes parfois très éloignés des sources d'émissions et participent à l'eutrophisation et à l'acidification de ces écosystèmes. Aujourd'hui les émissions de SO_2 ont largement baissé, et celles de NOx aussi mais dans une moindre mesure. Par contre pour les dépôts, comme l'a dit Aude Bourin, les baisses ne sont pas toujours significatives en fonction de l'« espèce » azotée qu'on considère. Et surtout c'est disparate en fonction des stations qu'on considère (Aude n'en a pas parlé mais ça ressort aussi de ses travaux sur RENECOFOR). Quoi qu'il en soit, on est toujours dans un contexte de dépôts azotés forts pour nos écosystèmes.







Ces dépôts azotés ont un effet avéré sur la diversité végétale. D'après les travaux de Stevens, publiés eux aussi dans une « grosse revue » en 2006, la richesse spécifique relevée sur des prairies naturelles de la façade ouest européenne diminue fortement avec les dépôts atmosphériques d'azote. Cela équivaut à une espèce perdue tous les 4 m² pour 2,5 kg d'azote supplémentaire déposé chaque année par hectare. En moyenne, ça représente 23 % de perte de biodiversité pour un dépôt moyen d'azote de 17 kg par ha et par an.

Plus près de nous, sur notre territoire, l'IFN a réalisé des relevés phytoécologiques dès 1988 dans le Haut-Rhin et a pu montrer par comparaison avec l'inventaire suivant (1999) qu'en onze ans l'espèce Galeopsis tetrahit, qui aime bien l'azote, avait augmenté de 13 % en terme de présence.

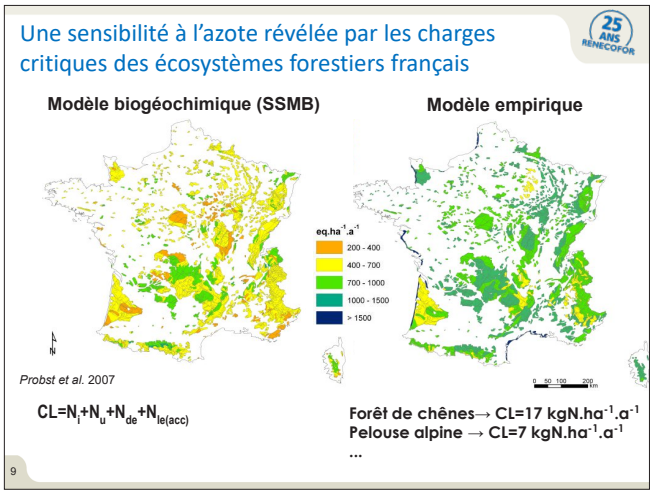
Ce constat a pu être relié à des travaux de Jean-Luc Dupouey et ses collaborateurs, qui ont fait des relevés sur des sols de la même région, et qui ont montré qu'il y avait une évolution à la baisse du rapport C/N entre les années 1970 et les années 1990. On pourra en discuter, puisque d'après Quentin Ponette (cf. exposé précédent), on observe aujourd'hui une hausse du C/N des sols.

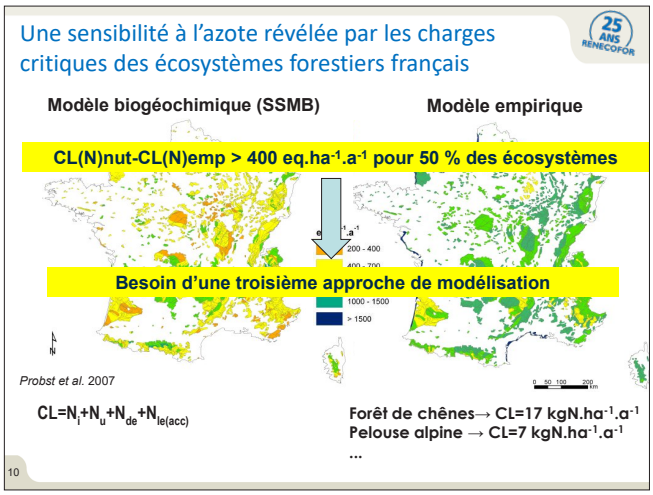
La notion de charge critique de pollution

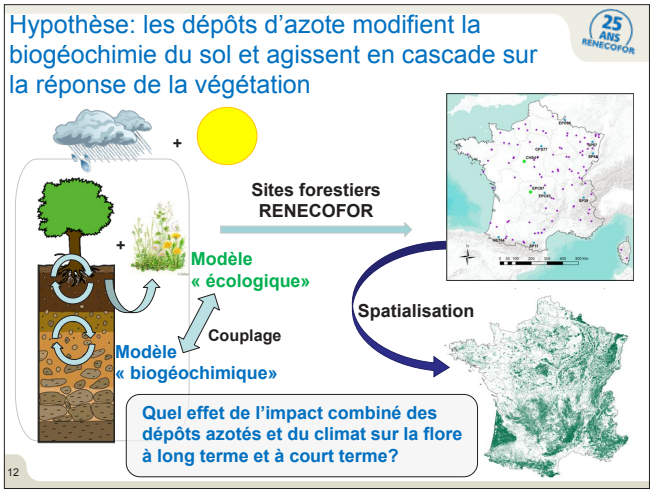
Pour tenter de réduire ces émissions et dépôts azotés, la communauté européenne s'est mobilisée au début des années 1990, suite au dépérissement des forêts et à tous les travaux qu'il a suscités. L'enjeu n'était pas de faire des réductions systématiques un peu « idiotes » mais d'essayer de les faire en fonction de la sensibilité des écosystèmes, pour éviter le type de situation illustré ici. C'est une photo prise dans le Mont des géants, en République Tchèque, 20 ans après le pic d'émissions de SO_2 : les sols sont toujours acidifiés et on a toujours ce paysage désolé de dépérissement de la forêt et de manque de régénération.

La méthode choisie pour tenter de réduire ces émissions de façon raisonnée, c'est d'essayer d'évaluer la sensibilité du milieu, donc de calculer un dépôt atmosphérique maximum que pourraient tolérer les écosystèmes en fonction de cette sensibilité.

Photo : Luc Croisé, ONF







Au départ, forts de l'expérience acquise sur les problèmes d'acidification et de charge critique d'acidité relative au soufre (sulfate), nous avons voulu adopter collectivement la même démarche pour l'azote au niveau de l'Europe, dans le cadre de l'*ICP M&M**. Nous avons utilisé un modèle de bilan de masse basé sur des flux en faisant l'hypothèse de l'état stationnaire (entrées = sorties) pour calculer la charge maximale acceptable pour l'écosystème. C'est ce qu'on a fait sur la carte de gauche, avec l'équation qui permet d'évaluer cette charge (CL = *critical load*), d'après les flux d'azote : immobilisé, prélevé par la végétation, dénitrifié et l'azote lessivé dit « acceptable ». Ça donne donc cette carte qui est assez « sensible » pour à peu près tous les écosystèmes forestiers. Ensuite, nous avons voulu confronter cette démarche avec l'expertise des forestiers, et nous avons établi une carte de modélisation empirique (sur avis d'experts) après avoir produit pour chaque type d'écosystème une valeur de charge critique : sur une forêt de chêne, par exemple, on estime que au-delà de 17 kg /ha/an de dépôt, l'azote peut devenir problématique pour l'écosystème. La confrontation des deux cartes montre une sérieuse différence d'évaluation de cette charge critique.

Et quand on quantifie les écarts, on voit que sur 50% des écosystèmes forestiers, la différence d'une carte à l'autre est de plus de 400 équivalent /ha/an de dépôt (de charge critique).

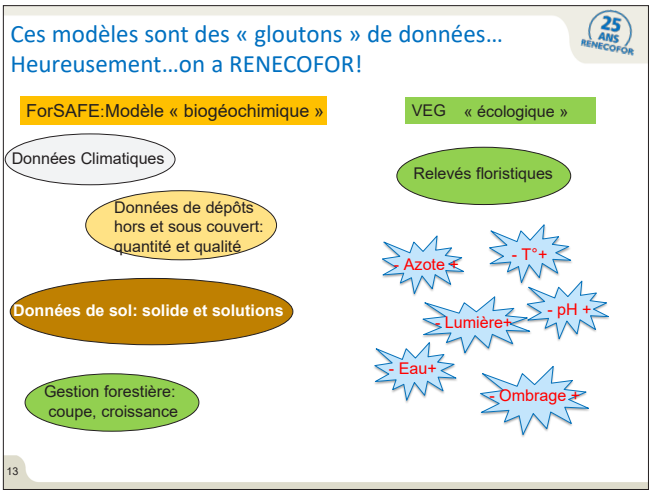
Autant dire que ces deux méthodes (bilan de masse et évaluation empirique) posent la question de leur adaptation pour l'azote et notamment de leur cible de protection. Nous nous sommes donc penchés sur une troisième approche de modélisation, beaucoup plus mécaniste.

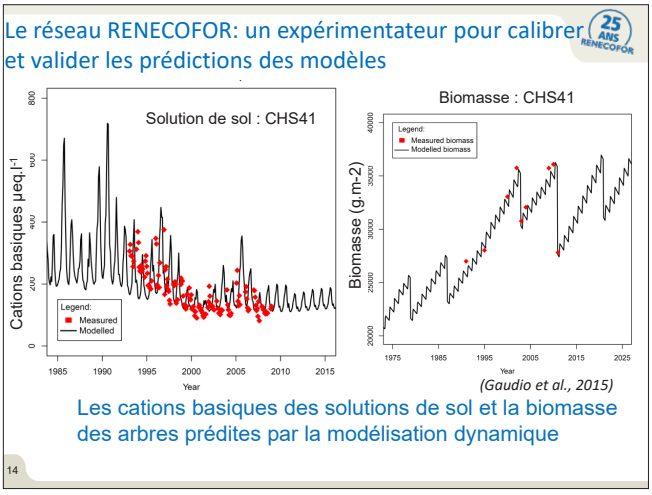
Développement d'une nouvelle approche des charges critiques par modélisation dynamique

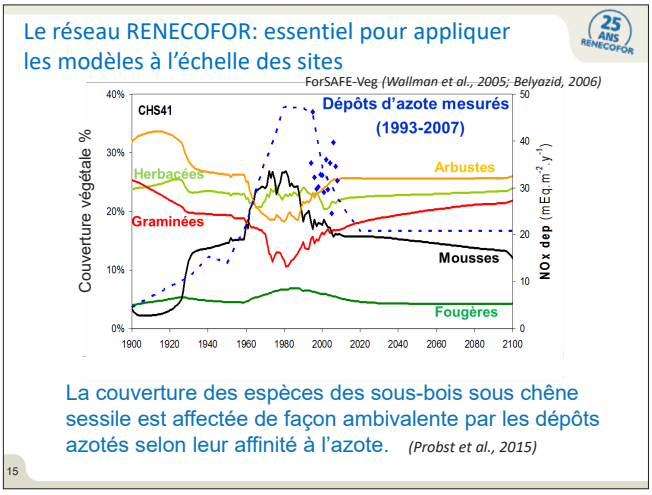
Nous sommes partis de l'hypothèse que les dépôts d'azote modifient la biogéochimie du sol et, par des processus en cascade, contribuent à une réponse de la végétation des sous-bois.

Nous avions des modèles biogéochimiques, comme le modèle mécaniste ForSAFE développé par les Suédois, et notre idée était de le coupler avec un modèle dit « écologique », basé sur les caractéristiques de la végétation, qu'il fallait contribuer à développer. Ça n'existait pas encore. L'objectif était de tenter de répondre à cette question : quel est l'effet de l'impact combiné des dépôts azotés et du climat sur la flore à court terme et à long terme ?

Nous nous sommes appuyés sur les sites RENECOFOR pour développer ou tester ces modèles assez complexes et pour tenter de faire ensuite une spatialisation à l'ensemble des écosystèmes forestiers en se basant sur des bases de données écologiques à l'échelle du territoire.







Ces modèles mécanistes, comme l'ont expliqué plusieurs intervenants précédents, sont très gloutons en données. Le modèle biogéochimique ForSAFE nécessite beaucoup de données climatiques, des données de dépôt hors couvert et sous couvert, en quantité et en qualité, des données de sol dans le solide et dans les solutions de sol, mais aussi des données de gestion forestière, de croissance, etc.

À côté de ça, le modèle « écoloqique » VEG que nous avons contribué à développer nécessite des données floristiques sur ces stations et il a été alimenté avec un certain nombre de paramètres, de « traits » de ces végétations (ont-elles ou pas un penchant pour l'azote, pour la lumière ou l'ombrage, pour la chaleur, pour l'eau…).

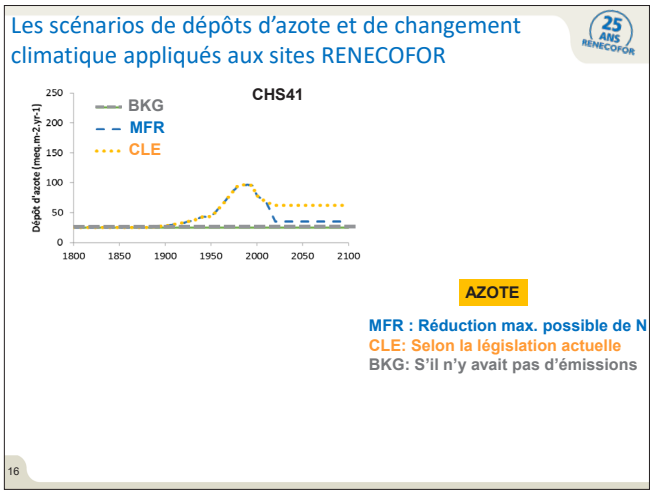
Cette première étape a nécessité un gros travail. Ensuite, nous avons pu faire des essais d'application à certains sites du réseau. Par exemple, on voit ici (graphe de gauche) ce qui se passe dans les solutions de sol de la placette CHS41, où on a simulé la concentration des cations basiques dans les solutions de sol (en noir) au cours du temps et on l'a confrontée aux données mesurées dans ces solutions de sol (en rouge). On voit qu'on a une assez bonne adéquation même si la saisonnalité n'est pas toujours bien reproduite.

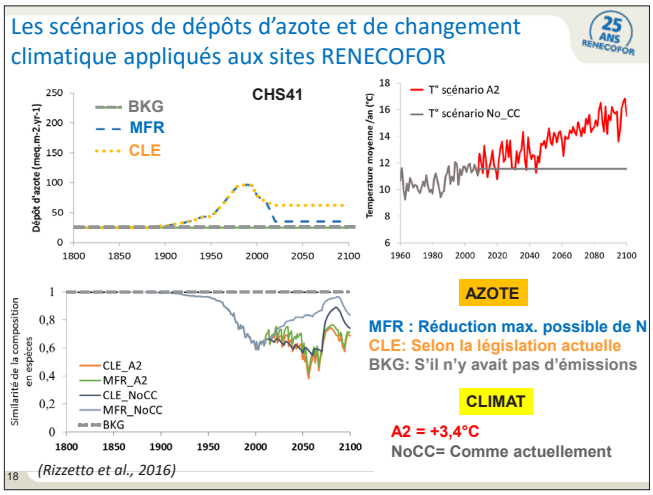
De la même façon nous avons utilisé d'autres indicateurs comme la biomasse (graphe de droite), que vous mesurez aussi dans les sites du réseau et que le modèle est capable de simuler.

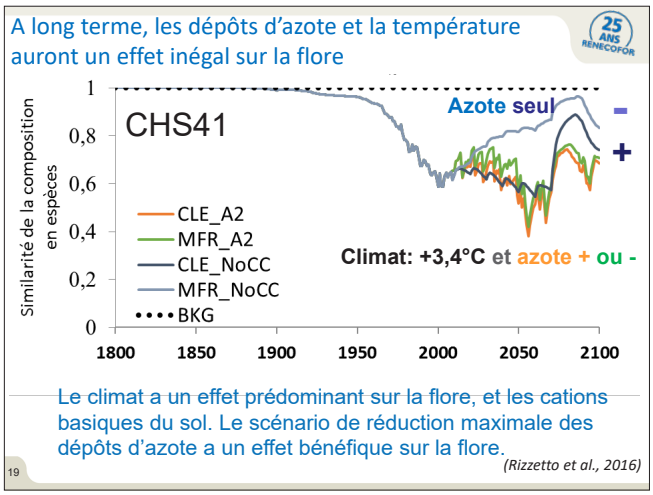
La base de données et le modèle VEG étant construits, nous avons pu utiliser le modèle couplé « Biogéochimie-Ecologie », l'enjeu étant de voir si on pouvait détecter une réaction de la flore aux dépôts d'azote. Nous avons fait un premier test sur cette même placette en agrégeant la végétation en groupes assez frustes (graminées, herbacées, mousses, fougères, par exemple) et nous avons regardé l'évolution de la couverture végétale en fonction du dépôt simulé depuis 1900 (pointillé bleu ; les petits points bleus sont les dépôts mesurés). Les résultats de réaction de la flore aux dépôts d'azote étaient assez probants. On observe des schémas de réponse de ces végétations qui sont ambivalents : les graminées diminuent fortement quand les dépôts augmentent, au contraire des mousses qui prolifèrent avec les dépôts azotés.

Photo : Erwin Ulrich, ONF

Installation du dispositif de recueil des solutions de sol (bougies poreuses)







Une étape importante était donc franchie. Nous nous sommes alors penchés de façon plus précise sur certains sites, en cherchant à y appliquer des scénarios de dépôt d'azote avec les modèles. Ici par exemple, on voit le dépôt simulé de 1800 à 2100 sur la placette CHS41, avec trois courbes qui correspondent à trois scénarios : la courbe grise, toute plate, correspond au *background* (BKG), comme s'il n'y avait pas eu d'émissions anthropiques ; la courbe orange représente les dépôts simulés dans le cadre de la législation actuelle sur les émissions (CLE) ; la courbe bleue correspond au scénario dit de réduction maximale possible (MFR), qui tend à réduire au mieux les émissions dans la mesure de notre technicité.

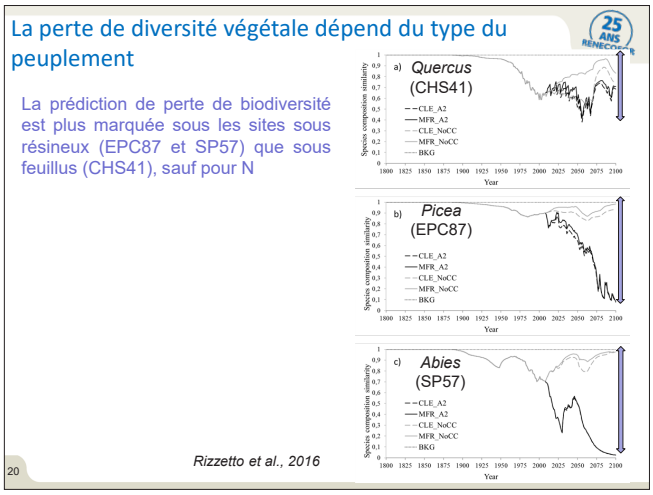
Par ailleurs, nous avons introduit les scénarios de changement climatique ; en fait nous ne considérons que la température, pas les changements de précipitations. Sur le graphe de droite, on a en gris le scénario « *no climate change* », qui considère que le climat reste constant après l'an 2000, et en rouge le scénario A2 qui prévoit une augmentation de plus de 3°C à l'horizon 2100.

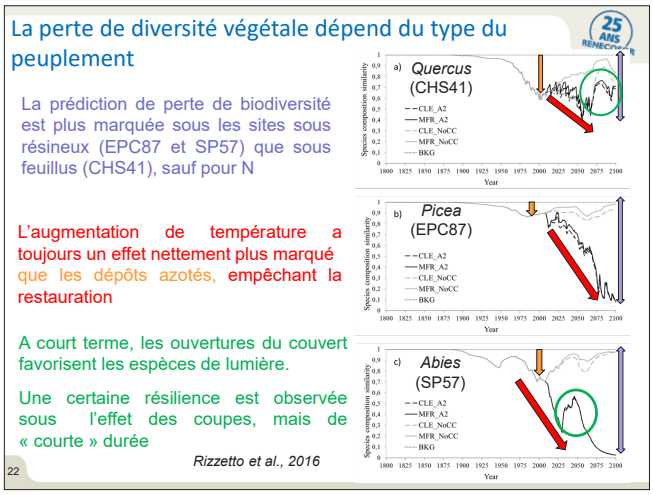
Nous avons testé la réponse de la végétation à ces changements et je vais zoomer sur le graphe (en bas à gauche) qui montre l'évolution simulée de la similarité de la composition en espèces sur la période 1800-2100. Ici une explication s'impose : la similarité de la composition en espèces est un indicateur ; s'il n'y a pas d'effet, les espèces restent les mêmes dans la station ; s'il y a un changement, on va voir une perte de similarité. Sur ce graphe, on remarque surtout une perte de similarité des espèces assez conjoncturelle avec l'augmentation des dépôts azotés (graphe du dessus).

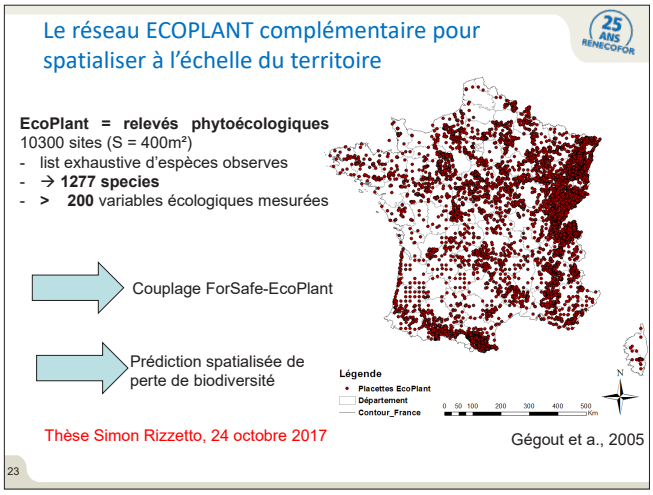
Pour être plus précis, les résultats pour l'azote seul, c'est-à-dire à climat actuel constant (NoCC), sont représentés par les courbes en gris (MFR) et bleu (CLE). On voit d'abord une importante perte de similarité (disons, pour simplifier, perte en biodiversité), qui s'atténue dans les années 2000. Dans le scénario le plus favorable (MFR), où on a réduit les émissions d'azote au maximum de ce que l'on peut, cette perte est suivie d'une phase de restauration, alors que dans l'autre situation (CLE), elle se poursuit sans restauration jusqu'en 2050 (j'expliquerai plus loin ce qui se passe après). Il y a donc un effet fort de l'azote, considéré seul, sur la perte de biodiversité.

Photo : Luc Croisé, ONF

La placette CHS41







Maintenant quand on couple les deux scénarios azotés avec le scénario A2 de changement climatique, (le scénario CLE est ici en orange et la situation la plus favorable en vert), on s'aperçoit qu'on a la même tendance qu'avec l'azote seul, mais que la baisse est beaucoup plus prononcée et qu'il y a finalement assez peu de différence entre les deux scénarios azotés. Donc, en gros, la réduction des dépôts d'azote a un effet bénéfique sur la flore, mais l'impact du climat est prédominant.

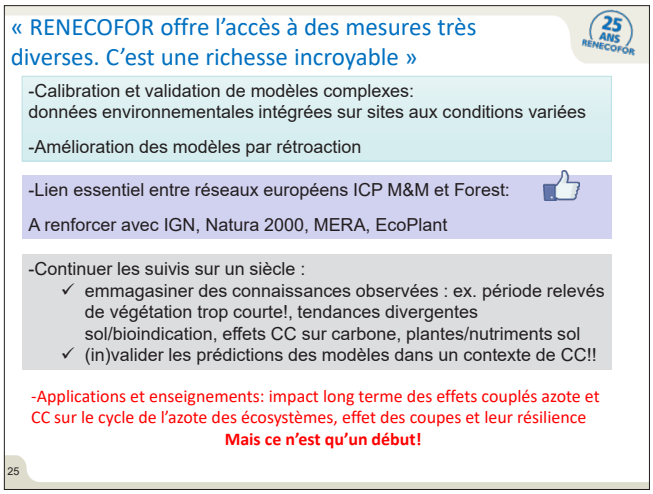
Nous avons évidemment voulu aller voir ce qui se passe pour d'autres sites, d'autres conditions, et nous avons fait pour les placettes EPC87 (sous épicéa) et SP57 (sous sapin) les mêmes simulations que sur CHS41 (chêne).

On voit que, dans ces placettes résineuses, les scénarios azotés combinés au changement climatique conduisent à des pertes de biodiversité beaucoup plus importantes, et que ces pertes sont sans commune mesure avec celles qu'occasionnerait l'azote seul. Paradoxalement, la placette CHS41 reçoit moins de dépôts d'azote que les placettes EPC87 et SP57 et pourtant l'effet sur la flore est plus important au départ, et la restauration de diversité plus difficile. Nous avons donc fait l'hypothèse que la végétation de sous-bois présente sur les placettes de résineux, et ayant reçu des dépôts d'azote plus importants, est déjà adaptée à des conditions plus riches en azote et présente donc moins de sensibilité par rapport aux dépôts futurs.

De plus, les fortes pertes de diversité végétale que l'on constate sont dépendantes du type d'espèces qui se trouvent dans ces peuplements, avec par exemple sur EPC87, une forte présence de mousses, sensibles aux augmentations de température. Dans tous les cas, le climat empêche une restauration par rapport aux dépôts azotés seuls.

Enfin, vous voyez qu'il y a des sortes de sursauts sur des durées limitées (ronds verts): ce sont les effets des coupes forestières. Nous avons simulé des coupes à certaines échéances plausibles par rapport à la gestion forestière habituelle : à 180 ans pour la placette de chêne, par exemple, ou 70 ans pour le sapin, et avec des éclaircies qui font un peu « yoyoter » les courbes. On voit une restauration des espèces due à l'ouverture du couvert suite à ces coupes, mais elle est de courte durée ; avec l'effet de l'augmentation des températures, la perte de diversité se poursuit à nouveau de façon marquée.

Pour essayer d'extrapoler ces résultats à une échelle bien plus large que celle de simples sites , nous travaillons actuellement (dans le cadre de la thèse de Simon Rizzetto, qui sera soutenue le 24 octobre), avec Jean-Claude Gégout, du LerFob, AgroParisTech, sur la base de données EcoPlant* pour développer des modèles de distribution de plantes plus adaptés à coupler au modèle géochimique ForSAFE que le module VEG. Leurs calibrations spécifiques pour les écosystèmes forestiers français permettent d'assurer une prédiction de changement de biodiversité plus robuste et spatialisé à l'échelle du territoire national, en réponse aux dépôts azotés et aux changements de climat.



Point de vue sur RENECOFOR

Pour moi les apports de RENECOFOR sont d'une richesse incroyable. Sans ces données on ne peut pas valider (ou même calibrer) des modèles complexes comme les nôtres dans des situations variées. Même si les tests ne donnent pas les résultats escomptés, la richesse d'information permet les améliorations par rétroaction : on peut formuler des hypothèses, y travailler, et revenir. De plus, RENECOFOR tisse des liens forts et fructueux entre les réseaux européens *ICP M&M** et *ICP Forests** (en français, les PIC) ; c'est une action exemplaire de la France dans le cadre de la convention de Genève. Par ailleurs, il faut encore valoriser des complémentarités très riches en renforçant les liens avec l'IGN, Natura 2000 et aussi le réseau MERA* et EcoPlant*.

Et pour l'avenir, j'y vais franco : un suivi sur 20 ou 30 ans, ça n'a pas de sens pour notre modélisation ; il faut un suivi sur un siècle… Les périodes de relevés de végétation dont nous avons disposé sont en fait trop courtes pour faire de la bonne validation. Avec le temps et le changement climatique engagé, on peut avoir des tendances divergentes entre le sol et la bioindication, des effets sur le carbone avec des incidences sur le rapport C/N, etc. Accumuler les observations, çela permet de valider mais aussi d'invalider les hypothèses et les prédictions.

Et cela concerne aussi les décideurs, parce qu'il peut y avoir une interaction forte et synergique qui amplifie les impacts entre dépôts azotés et climat et parce que les coupes (la gestion forestière) ont aussi des effets notables qu'il faut pouvoir appréhender via la modélisation.

Je voudrais remercier tout le monde pour ces 25 ans de collaboration, puisque j'étais là depuis le début du réseau. Et longue vie aux observations environnementales intégrées !

Discussion

Questions / Réponses

Jean-Paul Party, Sol-Conseil à Strasbourg - Je suis tout à fait d'accord avec Anne Probst sur la nécessité de poursuivre les observations sur un siècle et je dirais même deux : c'est ce que font les Anglais sur certaines placettes expérimentales avec un État qui est beaucoup moins fort que le nôtre ; donc on peut le faire, ce n'est pas un problème. Par ailleurs j'ai trois questions. (1) Laurent Saint-André a parlé de bassin versant expérimental : de quoi s'agit-il ? Comment ça se situe par rapport aux sites atelier, etc. ? (2) Peut-on avoir des précisions sur l'exception du Douglas évoquée plusieurs fois au cours de cette session : il semble qu'il ne fonctionne ni comme les feuillus ni comme les résineux « classiques »… (3) Anne Probst n'a pas parlé des données de sol des trois placettes pour lesquelles elle a présenté des simulations, mais il me semble que c'est important parce que les trois types de sols sont très différents. Pour CHS41, c'est un sol lessivé très évolué sur vieux limons fins ; pour EPC87, c'est un sol brun acide, sur granite acide, qui n'a pas du tout la même granulométrie ni la même capacité d'échange en bases, en particulier ; pour SP57, c'est un sol en voie de podzolisation si ce n'est complètement podzolisé, sur grès, avec un résidu sableux qui est beaucoup moins grossier que celui du sol précédent.

Laurent Saint-André (LSA) - (1) Pour ce qui est des bassins versants testés (qui ont fait l'objet d'un amendement), ce ne sont pas des sites atelier mais ils font partie de la zone atelier Moselle ; c'est la partie amont (Vosges) de la zone atelier Moselle. C'est un autre groupe de systèmes d'observation qui travaille à une échelle bien plus large que celle des sites atelier. (2) Concernant le comportement du Douglas, j'ai envie de dire que toutes les essences sont un peu à part. Pour l'acidification,

par exemple, c'est l'épicéa qui acidifie plus mais par un mécanisme de protons alors que le Douglas acidifie plus modérément, mais par un mécanisme de production de nitrates. Il se comporte donc comme le pin dans le cas des nitrates alors que l'épicéa se comporte comme le pin dans un autre cas (je ne sais plus lequel). Chaque essence est pour moi différente. Cela dit le Douglas a des caractéristiques de résineux : il est extrêmement efficient du point de vue des éléments nutritifs, par exemple, et il a aussi les qualités des résineux.

Hugues Titeux, UCL, collègue de Quentin Ponette - Pour compléter, il existe des études aux USA qui montrent que le Douglas est très efficient pour l'utilisation du nitrate, mais qu'il n'est pas capable d'utiliser l'ammonium de manière efficiente, au contraire de l'épicéa qui, lui, est capable d'utiliser l'ammonium. Il pourrait donc exister des mécanismes de régulation - favoriser le nitrate par la nitrification dans le cas du Douglas, ou la bloquer dans le cas de l'épicéa - ce qui peut expliquer les comportements très différents de ces deux espèces.

Anne Probst (AP) - Je n'ai pas détaillé les sols par manque de temps et parce que je voulais plutôt montrer les effets sur la végétation qui sont des résultats un peu plus novateurs. Ceci dit le modèle ForSAFE utilise les données sol et prédit la réaction du sol aux retombées azotées ; on voit bien la différence entre les trois types de sols au niveau des saturations, des compositions de la solution de sol, et on voit aussi que l'acidification du sol contribue à la forte décroissance constatée sur la flore. Ça fait partie de nos hypothèses.

Erwin Ulrich, ONF - Je suis interpellé par les changements de dépôts de calcium évoqués dans la présentation d'Aude Bourin : avez-vous continué à faire des études de trajectoire des masses d'air ? L'équipe de Patrice Coddeville a beaucoup travaillé là-dessus, notamment pour savoir s'il y a eu dans les 20 dernières années un changement global des masses d'air qui arrivent sur la France… Cela pourrait peut-être expliquer le changement des apports de calcium ?

Aude Bourin (AB) - Ce que nous avons pu imaginer, ou interpréter, concernant la baisse des dépôts de calcium, c'est qu'elle pourrait être liée à la baisse des sulfates. Finalement, l'apport de calcium peut être lié à des apports transfrontaliers via les masses d'air, etc., mais il peut aussi être lié à de l'érosion locale ; il y a sans doute un peu des deux. Quand on regarde les masses d'air c'est un peu compliqué : on ne peut pas percevoir, sur une période de 20 ans, une évolution des systèmes anticycloniques ou dépressionnaires sur la façade ouest européenne. Mais on peut imaginer qu'il y a des évolutions et oui, c'est une question à creuser.

LSA - Marie-Pierre Turpault qui travaille dans l'unité INRA-BEF sur les dépôts secs, a effectivement constaté aussi ce double flux (transfrontalier et local) et également une saisonnalité dans les dépôts atmosphériques, en particulier pour le calcium.

AP - En plus des résultats de précipitations « hors couvert » qu'Aude a montrés, je pense que ce serait vraiment intéressant de regarder en détail ce qui se passe sous couvert, avec les analyses de pluviolessivats. C'est difficile de faire la part de ce qui est purement atmosphérique et de ce qui est du recyclage dans la mesure des pluviolessivats, mais il y a là un vrai enjeu de recherche pour y voir plus clair.

Guy Landmann, Ecofor - Question sur la saturation en azote, notion évoquée fugacement par Quentin Ponette (en parlant des effets problématiques de l'azote sur nos écosystèmes saturés). C'est une notion importante historiquement, qui a marqué les esprits, mais n'a-t-elle pas du plomb dans l'aile par rapport aux observations récentes qui sont complexes ? Comment l'enseigne-t-on aux étudiants ?

Quentin Ponette (QP) - Je n'ai pas l'occasion d'enseigner ça, mais c'était effectivement une hypothèse largement répandue qui consistait à dire que, à l'origine, les écosystèmes forestiers étaient largement dépourvus en azote et qu'ils allaient progressivement se saturer sous l'effet des apports atmosphériques et que ça allait donner lieu à un lessivage plus ou moins massif de nitrates dans les solutions du sol. Au niveau du réseau RENECOFOR on n'observe pas, à ma connaissance, de lessivage important de nitrates, sauf dans quelques placettes. Maintenant, ce qui était peut-être mal pris en compte à l'époque c'est l'augmentation de la productivité que ça allait générer en lien avec d'autres drivers qui ne faisaient pas encore la une (augmentation du CO_2 atmosphérique, etc.). Peut-être que ça a contribué à tamponner cette saturation en azote des sols et cette lixiviation dans les solutions du sol. Mais ce qui apparaît comme important et qui a été souligné par Laurent Saint-André, c'est que c'est difficile d'avoir une période de référence : si on voit une évolution des apports en azote, on voit aussi que le changement dans les dynamiques de nitrate et d'ammonium est très différent, et selon la période qu'on considère. Parfois on croit observer qu'il n'y a pas d'évolution alors que si on remonte beaucoup plus loin il y en a une très importante. Et toutes ces évolutions ne sont pas neutres sur le plan de ce qui se passe dans les sols et on observe encore aujourd'hui des choses qui sont le résultat d'accumulations antérieures qu'on maîtrise mal.

Bernard Jabiol, AgroParisTech - J'ai été content de voir réapparaître la notion de durabilité qu'a citée Laurent Saint-André, et qui a été reprise implicitement dans les exposés suivants, parce que c'est bien l'objectif de RENECOFOR de veiller à cette durabilité. Dans la session précédente, j'avais plutôt l'impression qu'on était les faire-valoir des ministres au service de politiques environnementales simplistes plutôt que des gens qui veillent sur la durabilité des sols. Pour les sols agricoles ce n'est pas grave. Il y a 50 ans qu'on sait que leur teneur en matière organique diminue dangereusement pour les sols eux-mêmes, leur qualité, leur durabilité… et on ne s'en préoccupe que maintenant parce que la séquestration de carbone intéresse Total et les ministres ; c'est un peu dommage. Mais pour les sols forestiers, j'aurais tendance à demander qu'on leur fiche la paix ; d'autant plus que Quentin Ponette nous a montré les dangers que pouvait représenter l'augmentation de la teneur en carbone des sols. C'est intéressant de savoir comment ça fonctionne, bien sûr ; le cycle du carbone dans les sols, c'est primordial de le suivre… pour être sûr de maintenir la durabilité de ces écosystèmes !

LSA - Je suis d'accord. Mais pour pouvoir financer encore 100 ans de mesure sur RENECOFOR, il faut bien répondre aux demandes du ministre ! Et « éclairer » les politiques publiques. Rappeler que la durabilité des écosystèmes, c'est un ensemble. C'est à la fois la fertilité chimique, mais aussi physique et biologique des sols. Si on n'arrive pas à garantir ces 3 piliers, on va avoir du mal à garder des écosystèmes fonctionnels et résilients face aux divers changements qui leur tombent dessus.

Yves Thiry, Andra - Le déstockage en azote a été évoqué à plusieurs reprises (dès la session précédente) et je me demande naïvement si vous avez toutes les informations nécessaires pour écarter la piste d'une volatilisation de l'azote.

QP - Je ne suis un pas spécialiste de la volatilisation de l'azote, mais je pense que ça se fait dans des conditions très particulières d'oxydation et de réduction. Dans RENECOFOR, il y a une grande diversité de sols mais, à ma connaissance, ces sols où la volatilisation d'azote pourrait se produire sont rares dans l'échantillon. Je ne pense pas que ce soit un facteur explicatif important du déstockage.

LSA - Je crois que même sur les sites tassés de l'expérimentation tassement on ne voit pas d'émission majeure d'azote volatilisé ; ce n'est pas le flux auquel on penserait, même dans les épisodes un peu particuliers des pics.

Yves Thiry - Et le système racinaire ? Est-il pris en compte dans les bilans ?

QP - Je ne suis pas sûr d'avoir bien saisi, mais nos bilans sont extrêmement simples, parce qu'en fait on n'a pas toutes les données de tous les flux sur l'ensemble des placettes ; l'idée était simplement de voir si des ordres de grandeur du bilan pouvaient expliquer des pertes d'azote, et manifestement, avec des hypothèses relativement réalistes, on n'y arrive pas.

Jean-Luc Dupouey - Je reprends la balle au bond pour insister sur une piste qui a déjà été évoquée et qui pourrait être importante pour RENECOFOR : c'est la biomasse. Les mesures dendrochronologiques ne suffisent pas à évaluer correctement un delta de biomasse au cours des périodes étudiées et il me semble qu'on n'arrive pas bien à boucler le bilan en termes de prélèvement dans la biomasse aérienne, sans même parler de la biomasse racinaire, pour laquelle c'est plus difficile. Tant qu'on n'a pas ça, aussi bien pour les arbres que pour les strates inférieures, du sous-bois, il y a sans doute un problème. Ce n'est peut-être pas si difficile : il faudrait étudier ce que pourrait faire RENECOFOR pour mieux boucler le bilan biomasse aérienne.

LSA - C'est en cours : pour la biomasse et la minéralomasse, on a maintenant des équipements qui permettent de faire des screenings de façon plus large et plus rapide. Il se trouve que quand on mesure des concentrations ou des stocks dans les sols en éléments minéraux et qu'on met en regard ce qui est immobilisé dans la biomasse ou en concentration dans la biomasse, le lien ne se fait pas ; il n'y a pas de relation, sauf pour le calcium et le manganèse. Pour tous les autres éléments, il y a un effet site qui ne s'explique pas. Ou plutôt on n'a pas assez de données pour l'expliquer, et on a besoin de faire des mesures plus détaillées sur les sites RENECOFOR : avec ces nouvelles technologies on espère bien y arriver. Et il n'y a pas que l'azote ; on aimerait bien aussi caractériser de façon biochimique les litières, les sols, pour rebondir sur ce que disait Delphine Derrien (session 3).

Guy Landmann - On a vu, si j'ai bien compris, qu'il y a d'une part un système européen EMEP, où on essaie de modéliser les dépôts atmosphériques, et d'autre part le réseau RENECOFOR qui observe les dépôts (azotés notamment), avec une distribution spatiale et selon des modalités temporelles qui ne collent pas si bien avec celles d'EMEP. Sachant que le PIC Forêts, dont relève RENECOFOR, et l'EMEP sont deux programmes de l'ONU liés à la Convention de Genève… quelle conclusion faut-il tirer de cette divergence ?

AB - Le positionnement des deux réseaux est différent, de par l'objectif initial des deux programmes, EMEP et le PIC Forêts. Au niveau français, le réseau RENECOFOR-CATAENAT, permet d'observer et caractériser l'ensemble de l'interface forêt, alors que le réseau MERA, qui est inclus dans le programme EMEP, a pour vocation de caractériser le réservoir atmosphérique. D'un côté on est dans l'atmosphère et de l'autre on est dans les forêts. Les questions qu'il y a derrière induisent des exigences différentes, en matière de programme de mesure mais également en ce qui concerne la modélisation (pluviolessivats, spatialisation du calcium etc.). Ce n'est pas simple et vous n'êtes pas les seuls à ne pas vous y reconnaître.

Christophe Mouy, ONF, responsable d'UT dans l'Yonne - Anne Probst a montré que l'acidification des sols a augmenté sous des effets combinés d'augmentation de la température et de dépôts, mais on est passé rapidement sur les effets potentiels au niveau de la forêt. Concrètement, ai-je des raisons de m'inquiéter et de penser que ça va avoir des effets potentiellement importants sur les arbres et la forêt ?

AP - Si l'acidification continue et si, en particulier, il y a une baisse conjoncturelle des dépôts atmosphériques de cations basiques, on peut en effet retomber sur les carences qu'on a connues à un moment donné vis-à-vis du magnésium, au regard aussi de l'augmentation de l'aluminium dans le sol. Mais il faut encore observer pour vraiment savoir ce qui va se passer, parce que d'autres facteurs viennent se rajouter aujourd'hui. L'augmentation de la température va avoir d'autres effets sur la minéralisation de la matière organique, donc sur la resaturation potentielle du complexe d'échange, et la combinaison de ces facteurs peut avoir des effets divergents, sur l'évolution du sol.

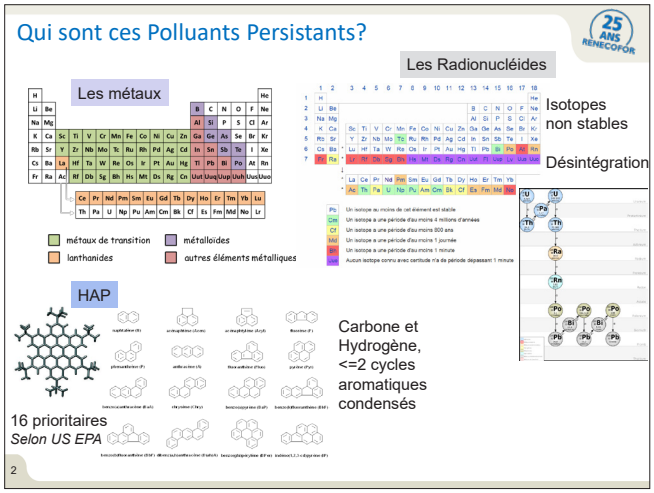
LSA - Arnaud Legout (INRA-BEF) et collègues ont utilisé des modèles, notamment NuCM, pour comparer différents scénarios d'exploitation sylvicole et de dépôts atmosphériques, et il est clair que sur des sols qui commencent tout juste à se restaurer, il faut faire attention à ce qu'on fait. Ça ne signifie pas qu'il ne faut rien faire, mais il faut prendre en compte ce contexte dans la gestion.

SESSION 5 - DYNAMIQUE DES POLLUANTS PERSISTANTS EN FORÊT

INTRODUCTION

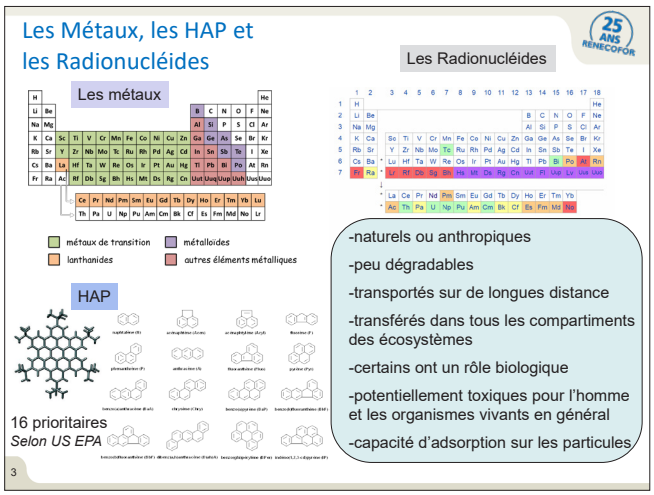
Anne Probst
CNRS, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab)

J'ai le plaisir d'introduire cette session sur la dynamique des polluants persistants en forêt ; une session un peu « exotique » qui montre que le réseau RENECOFOR est intéressant au-delà de ses objectifs initiaux.

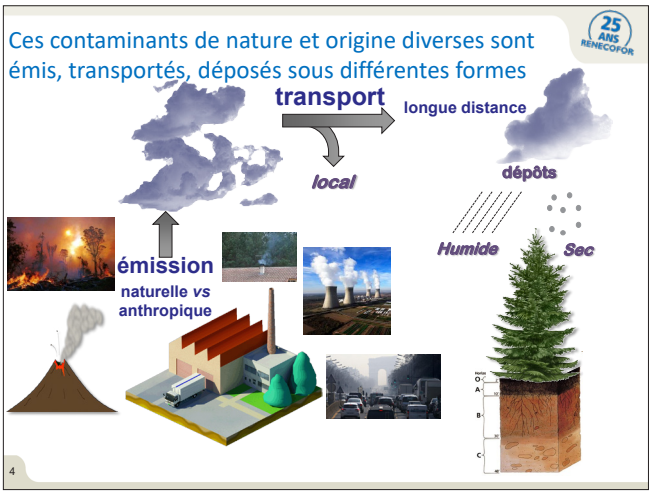


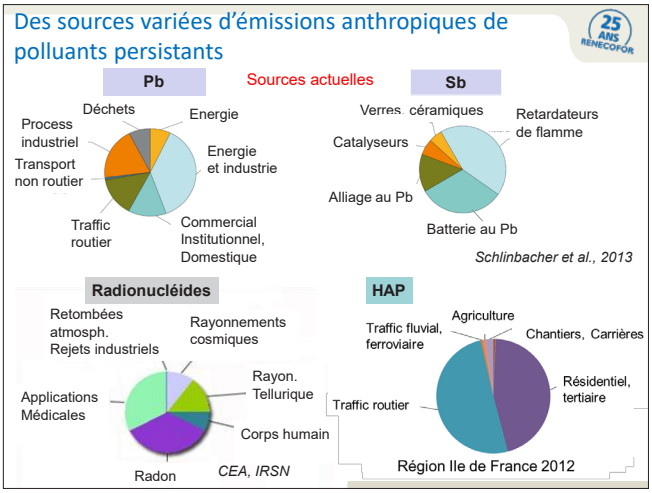
Que sont les polluants persistants ?

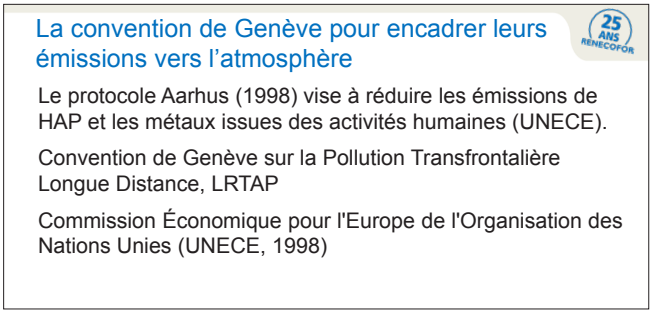
Il y a trois sortes de polluants persistants en forêt. Ce sont d'abord des **métaux**, représentés (à gauche) sur le tableau périodique des éléments avec des couleurs indiquant leurs différents types : métaux de transition en vert ou autres métaux en rose, métalloïdes en violet, et les lanthanides encore appelés terres rares en orange. Le deuxième groupe est celui des **radionucléides**, isotopes non stables (radioactifs) de certains éléments, qui vont se désintégrer au cours du temps ; c'est ce qu'illustre le petit schéma à droite avec la chaîne de désintégration de l'uranium jusqu'au plomb. Ces radionucléides, dont certains sont naturels, ont des durées de vie différentes. Le troisième groupe, enfin, concerne des molécules organiques et non plus des minéraux ; c'est celui des polluants organiques persistants, avec notamment (mais ce ne sont pas les seuls) **les hydrocarbures aromatiques polycycliques** (HAP), qui se composent d'atomes de carbone et d'hydrogène avec au moins deux cycles aromatiques condensés. J'ai illustré ici les 16 molécules considérées comme « prioritaires » par l'agence de protection environnementale américaine.

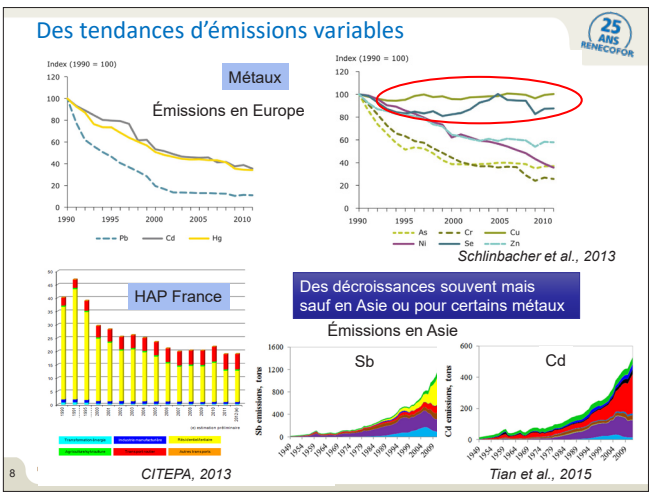


Ces polluants ont **des caractéristiques communes** : ils sont à la fois naturels ou d'origine anthropique ; ils sont peu dégradables dans l'environnement ; une fois émis dans l'atmosphère, ils sont transportés sur de longues distances ; ils peuvent être transférés dans tous les compartiments des écosystèmes, de l'atmosphère jusqu'aux eaux de surface ; certains ont un rôle biologique (on connaît par exemple le rôle biologique du cuivre, du zinc…) mais tous sont potentiellement toxiques pour l'homme et pour l'ensemble des organismes vivants qui nous préoccupent dans les écosystèmes forestiers ; enfin (mais cette liste n'est pas exhaustive) ils ont une capacité d'adsorption sur les particules.









Les sources d'émissions

Ces contaminants peuvent être d'origine naturelle, du fait par exemple des éruptions volcaniques, des feux de forêt… Mais ils proviennent également des émissions anthropiques liées aux activités industrielles, aux centrales nucléaires, à la circulation automobile, etc. Tout cela se retrouve dans l'atmosphère et peut être transporté soit sur de courtes distances (avec des retombées très proches des sources d'émissions), soit sur de très longues distances, à des milliers de kilomètres… où des forêts « innocentes » reçoivent ces apports non désirés sous forme de dépôts humides, avec la pluie, ou de dépôts secs entre les pluies.

Les sources varient selon les polluants et peuvent évoluer avec le temps. Pour les métaux, le plomb a par exemple des sources très diverses : les secteurs de l'énergie et de l'industrie, le trafic routier (encore aujourd'hui), etc. Mais pour l'antimoine, métalloïde émergent, le profil est différent : il provient essentiellement des additifs retardateurs de flamme, ou des batteries… au plomb !

Pour les radionucléides, un graphique synthétique de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) montre des origines naturelles, comme les rayonnements cosmiques ou telluriques, et des origines anthropiques comme les rejets industriels ou les applications médicales… Quant aux HAP, leur profil est très restreint, en tout cas en Ile-de-France où les deux sources majeures sont le trafic routier et le secteur résidentiel et tertiaire ; mais cela peut varier selon les régions.

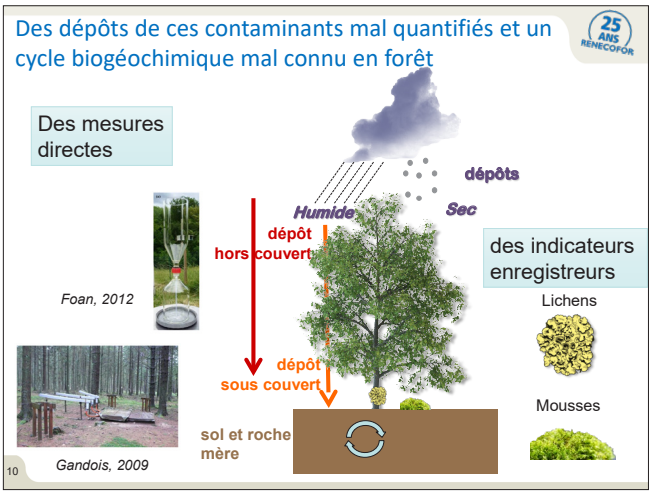
Évolution des émissions

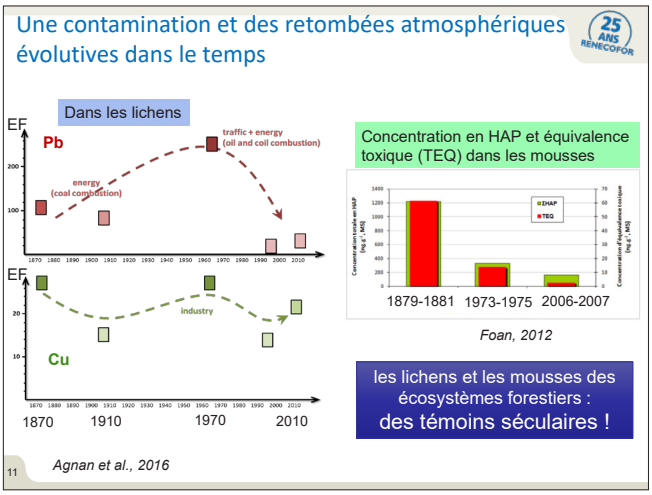
Il faut savoir que deux familles de polluants persistants, les HAP et les métaux, sont régies dans le cadre de la Convention de Genève pour encadrer les émissions (comme on l'a vu pour le soufre et l'azote). Cela se fait en particulier grâce à la ratification du protocole Aarhus (en 1998), sous l'égide de la Commission Economique pour l'Europe de l'organisation des Nations Unies (UNECE).

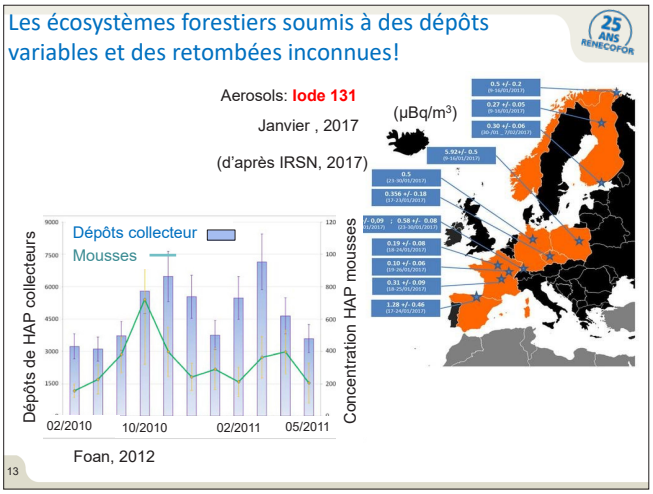
Ce dispositif a fortement contribué à réguler les émissions en Europe. Sur le graphique en haut à gauche, on voit que l'évolution du plomb (tireté bleu), du cadmium (en gris) et du mercure (en jaune) est globalement à la baisse depuis les années 1990. On retrouve cette évolution pour d'autres métaux sur certains profils de droite, et le graphique du bas montre aussi une tendance à la baisse sur les HAP, malgré une sorte de niveau de fond qui reste assez stable ces dernières années.

Par contre, on remarque aussi, dans ce qui est entouré de rouge, que les émissions européennes de certains métaux comme le cuivre (en vert) sont stables dans le temps, ou même que d'autres augmentent : c'est le cas ici du sélénium (bleu foncé), mais il se peut qu'il y en ait d'autres.

Mais surtout il y a d'autres régions du monde où on observe une explosion des émissions de ces polluants, comme en Asie dont les émissions sont illustrées ici pour le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) sur la période 1949-2009.







Des dépôts mal connus

Les dépôts de ces contaminants sont assez mal connus, parce qu'ils sont en concentrations faibles et qu'il est difficile de les détecter et de les collecter. Il y a des dépôts humides et des dépôts secs, des dépôts à découvert différents des dépôts sous le couvert des arbres, et tout cela conditionne ce qui arrive au sol.

On peut chercher à faire des mesures directes, sous couvert à l'aide des gouttières de collecte des pluviolessivats installées sur les placettes RENECOFOR, ou bien à découvert avec d'autres équipements qui peuvent être différents. Pour les polluants organiques, par exemple, les collecteurs doivent être en verre pour éviter la contamination par le récipient.

C'est bien, mais ce n'est pas parfait, et on peine à savoir vraiment les dépôts qui arrivent au sol.

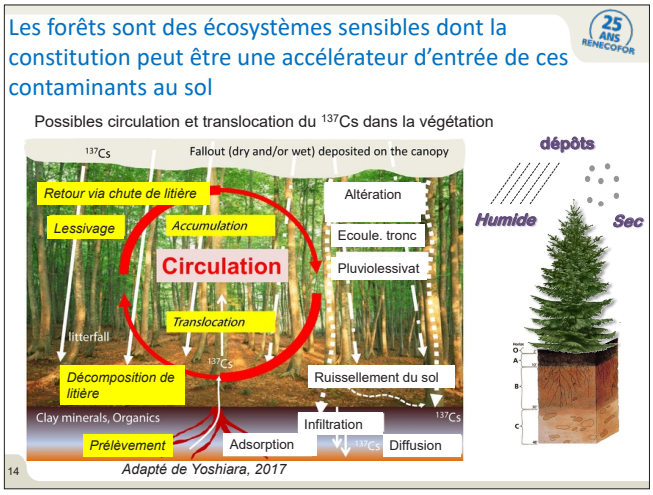
Outre les mesures directes, il y a des indicateurs indirects comme les lichens ou les mousses, présents en forêt et qui peuvent être des accumulateurs de ces éléments.

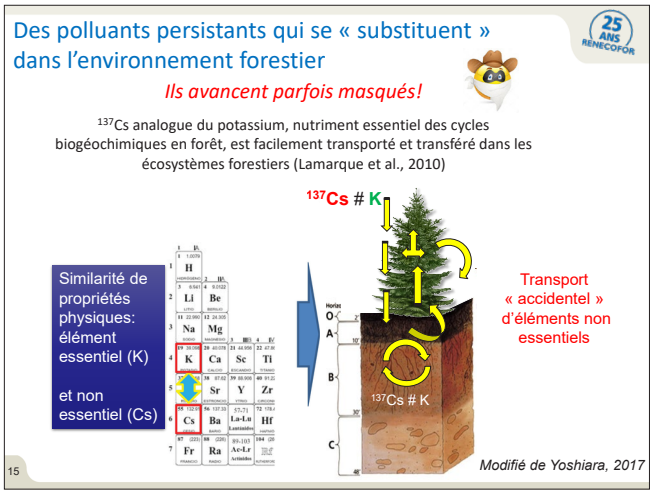
Ainsi, par exemple, les travaux de Yannick Agnan et collaborateurs en 2016 (graphes de gauche) ont consisté à étudier les enrichissements (EF) en plomb et en cuivre dans les lichens. On a fait de la rétro observation, c'est-à-dire qu'on a mesuré les teneurs des lichens prélevés aujourd'hui dans les stations du réseau et celles des lichens récoltés par le passé et conservés dans des herbiers. On a pu remonter grâce aux herbiers jusqu'aux années 1870, et en gros les résultats de ces mesures correspondent au profil des émissions : on retrouve le pic des années 80 pour le plomb tandis que pour le cuivre on a une sorte de stabilité qui correspond à la relative stabilité des émissions pendant la même période.

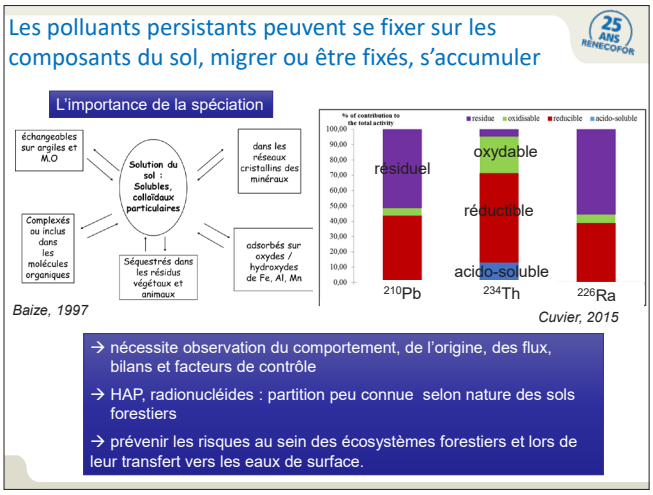
Louise Foan a fait en 2012 une étude du même type pour les HAP dans forêts des Pyrénées ; en allant chercher dans les herbiers, elle a trouvé une décroissance des concentrations de HAP enregistrées dans les mousses, qui reflète assez bien la baisse des émissions. Les mousses et lichens peuvent donc être des témoins séculaires de ce que reçoivent les écosystèmes forestiers.

Cependant la difficulté majeure est de passer d'une concentration dans les mousses ou dans les lichens à l'estimation d'un dépôt dans le temps : on ne sait pas sur combien de temps ni de quelle façon ils accumulent les polluants. Louise Foan a tenté de regarder comment varient au cours des saisons, de façon continue, le dépôt des HAP mesuré dans les collecteurs (barres bleues) et la concentration mesurée dans le même temps dans les mousses (ligne verte) : les variations sont globalement cohérentes, mais passer de la concentration dans la mousse a un dépôt reste difficile.

Et enfin nos forêts peuvent être exposées à des contaminations imprévisibles. Voici l'exemple d'un épisode qui, d'après l'IRSN, a touché l'Europe en janvier 2017 avec des concentrations assez élevées en iode 131. On ne sait pas d'où cela vient, mais en tout cas les forêts l'ont enregistré : les dépôts ont atteint ces écosystèmes.







Comportement des polluants persistants dans les écosystèmes forestiers

Vous l'avez compris, nos forêts sont sensibles aux retombées atmosphériques, mais elles peuvent jouer un rôle d'accélérateur.

J'ai représenté ici **le cycle du césium 137** en forêt, un cycle relativement complexe et qui ressemble beaucoup au cycle des éléments nutritifs, avec des retombées atmosphériques, des écoulements et pluviolessivats qui ruissellent dans le sol, la reprise par la végétation, et la recirculation à travers les chutes de litières qui reviennent au sol, etc. Or le césium n'est pas du tout un élément nutritif…

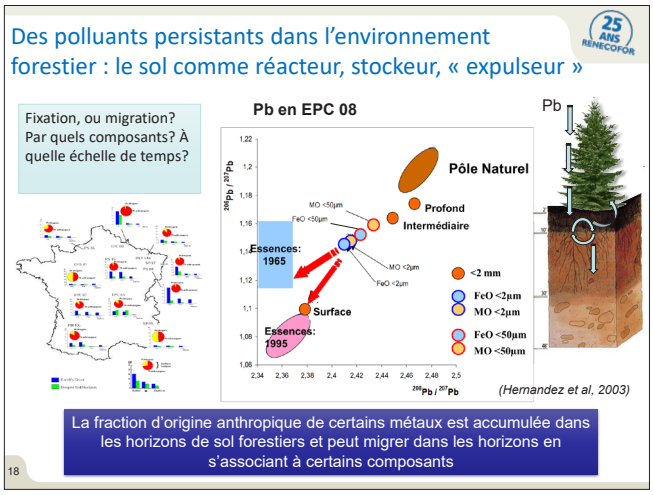
… mais c'est un de ces polluants qui avancent masqués ! On voit dans la classification périodique des éléments que le césium (Cs) est très proche du potassium (K) qui, lui, est un élément nutritif essentiel. Leurs propriétés physiques et physico-chimiques sont semblables, ce qui fait que le Cs se comporte comme le K et peut, comme lui, circuler dans tout l'écosystème. On va donc le retrouver au sein du sol où, bien sûr, il va interagir avec les composants du sol.

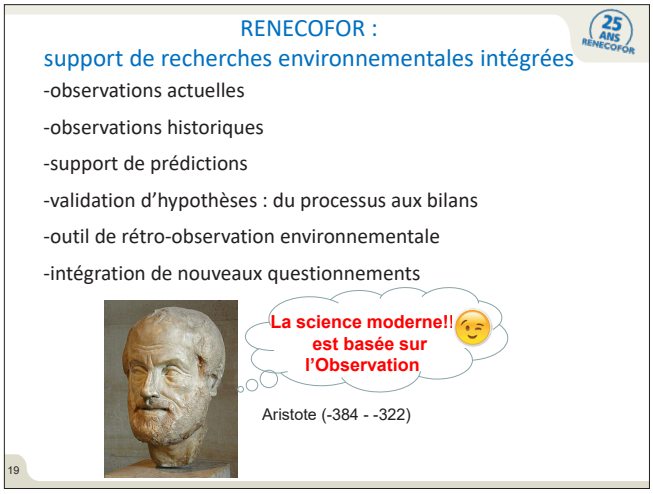
Plus généralement, les dépôts humides et pluviolessivats se retrouvent dans la solution de sol et, comme je l'ai dit, les polluants persistants ont la capacité de s'adsorber sur les différents composants : la matière organique, les oxydes, les argiles, enfin tout ce qui compose le sol. Mais cela ne se fait pas de façon homogène. Grâce à des extractions chimiques avec des réactifs différents, on peut savoir sur lesquels de ces composants se fixent les divers polluants. Sans entrer dans le détail, vous voyez ainsi sur le graphique de droite que le plomb 210 (^{210}Pb) ou le radium 226 (^{226}Ra) ont à peu près la même « spéciation », assez simple, alors que le thorium (^{234}Th) se répartit dans beaucoup de compartiments : il a la capacité de circuler entre les divers composants et d'être facilement libéré.

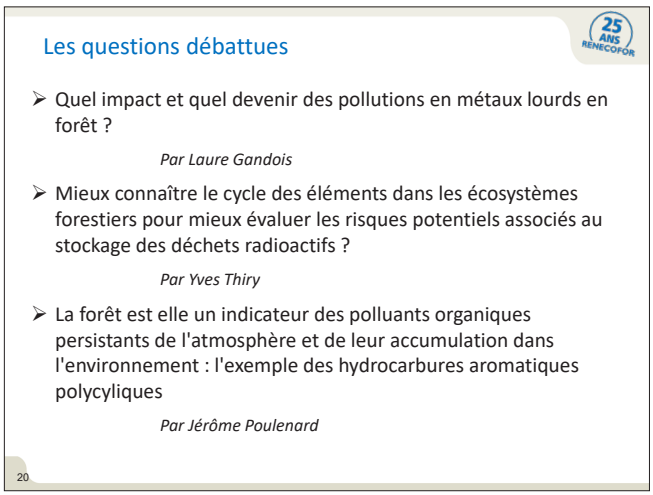
Ces comportements sont encore peu connus, en particulier pour les HAP et les radionucléides, et il faut chercher à les élucider pour pouvoir anticiper et prévenir les risques pour l'environnement.

Photo : Erwin Ulrich, ONF

Les débuts de la placette EPC08







En ce qui concerne le plomb, les différents isotopes ont permis d'affiner la question de la contamination d'origine anthropique et de sa dynamique dans le sol. Je ne vais pas commenter la carte, car Laure Gandois va le faire dans l'exposé suivant.

Mais je tiens à présenter ce graphique, un diagramme isotopique selon les proportions de deux séries d'isotopes du plomb qui permettent de caractériser des sources de matière. On peut y situer le « signal isotopique » spécifique des carburants au plomb de deux générations, ainsi que celui du plomb qui se trouve naturellement dans les sols. Dans les années 2000, nous avons étudié le sol de la placette EPC08 en distinguant l'horizon profond, l'horizon intermédiaire et l'horizon de surface. Nous avons trouvé dans l'horizon de surface un fort enregistrement de plomb correspondant aux carburants de l'époque, ce qui veut dire que le plomb émis par la circulation est bien retombé via les précipitations et qu'il a été stocké dans les sols. Le plomb de l'horizon profond, par contre, est très proche du pôle naturel. Quant à l'horizon intermédiaire, nous l'avons « décortiqué » en particules grossières (points cerclés de rouge) et particules fines (points cerclés de bleu), en distinguant dans les deux cas les oxydes (points bleus) et la matière organique (points jaunes). Ce faisant, nous nous sommes aperçus que le plomb anthropique était plutôt associé aux particules fines et qu'il était surtout issu des carburants d'ancienne génération. D'autre part, ce sont surtout les oxydes -plutôt que la matière organique- qui avaient capté ce plomb et avaient contribué à le faire migrer » dans le profil de sol.

En conclusion

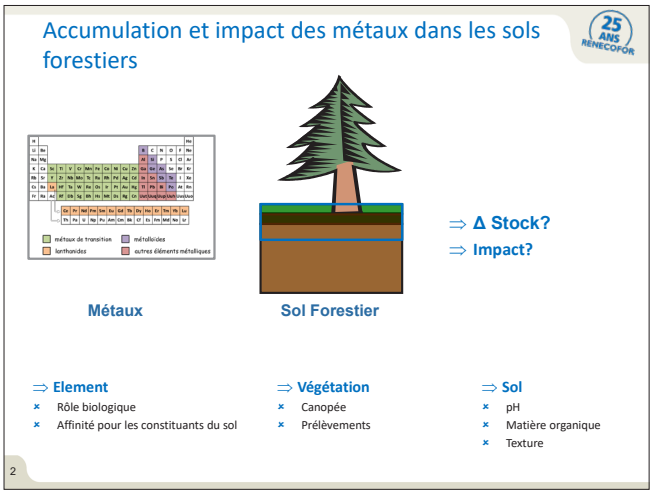
Quel est l'apport de RENECOFOR dans tout ça ? C'est un support d'observations actuelles et historiques, c'est un support de prédictions, de validations d'hypothèses qui vont du processus jusqu'au bilan, on le verra dans les exposés qui suivent. On verra aussi qu'il peut être un outil de rétro-observation environnementale et qu'il permet d'intégrer de nouveaux questionnements.

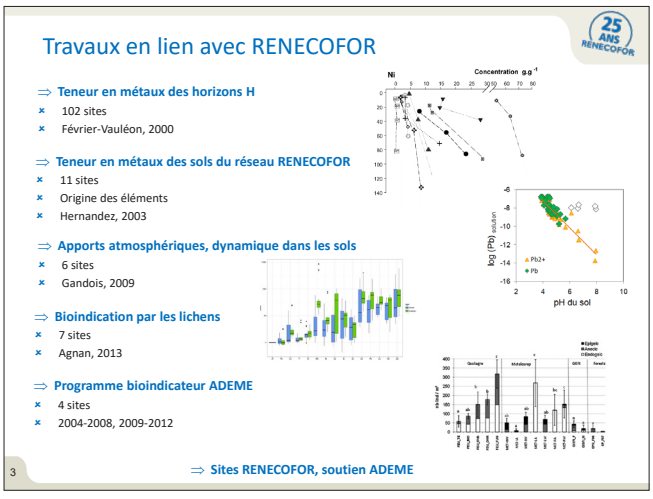
À son époque, déjà, Aristote disait que « la science moderne est basée sur l'observation » ! C'est toujours vrai aujourd'hui.

Je laisse maintenant la parole à Laure Gandois, puis à Yves Thiry et enfin à Jérôme Poulenard, qui vont approfondir certains aspects concernant respectivement les pollutions en métaux lourds, le cycle des éléments radioactifs, et l'enregistrement des HAP atmosphériques par la forêt et les sols forestiers.

QUEL DEVENIR ET QUEL IMPACT DES POLLUTIONS EN MÉTAUX LOURDS EN FORÊT ?

Laure Gandois
CNRS, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab)





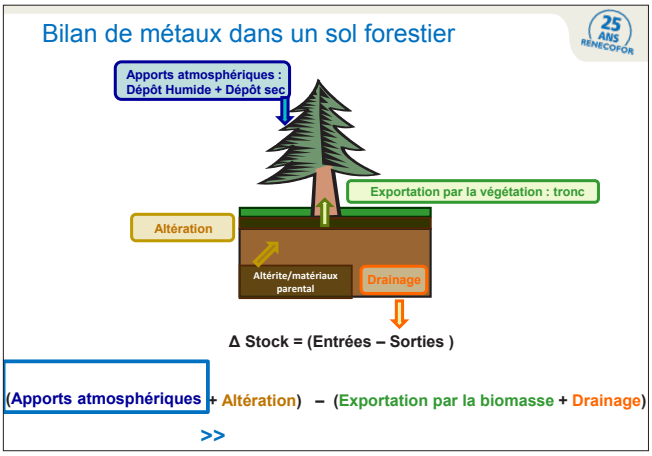
Je vais vous présenter des travaux qui ont trait au devenir et à l'impact des métaux dans les écosystèmes forestiers et qui ont été réalisés grâce au réseau RENECOFOR.

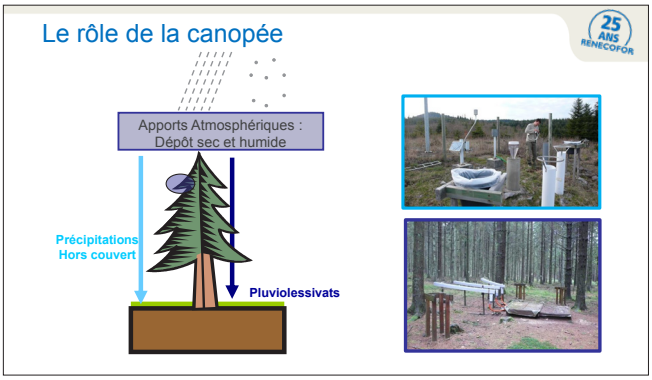
Fil rouge : l'évolution des stocks de métaux dans les sols forestiers

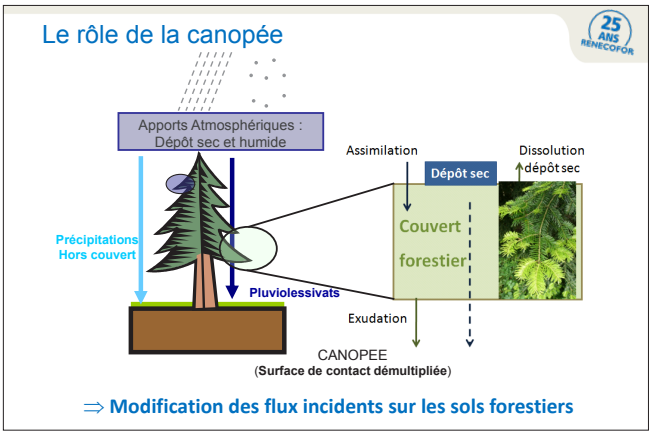
Nous allons nous concentrer sur le compartiment du sol forestier en nous posant la question de l'évolution des stocks de métaux dans les écosystèmes forestiers : y a-t-il ou non une accumulation de ces éléments dans les sols ? Et nous soulèverons aussi la question de leur potentiel impact.

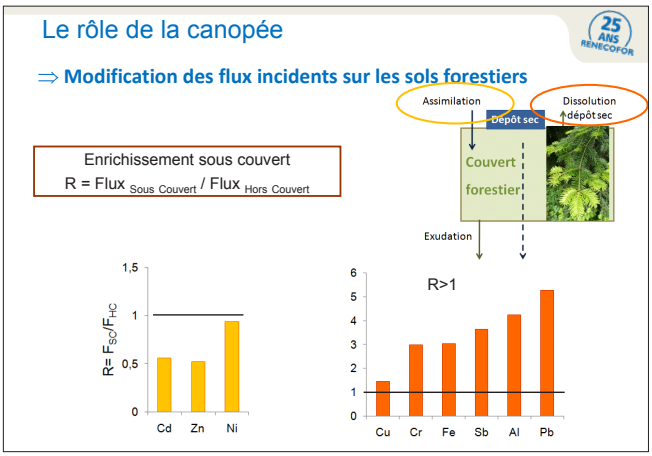
La réponse à ces questions n'est pas simple ; elle dépend de plusieurs facteurs, à commencer par l'élément considéré. La famille des métaux compte beaucoup d'éléments dont certains ont un rôle biologique connu de micronutriments (c'est le cas du cuivre, du nickel, du zinc) tandis que d'autres n'ont pas de rôle biologique connu voire peuvent être toxiques à très faible concentration (cadmium, plomb, antimoine) ; ça joue sur la façon dont l'élément va être recyclé dans l'écosystème. D'autre part ces éléments ont des propriétés physico-chimiques différentes, des affinités différentes pour les divers compartiments du sol, ce qui va aussi contrôler leur mobilité dans la colonne de sol. La végétation est aussi un facteur très important, d'une part du fait de l'interaction entre la canopée et les dépôts atmosphériques, et d'autre part du fait du recyclage de ces éléments qui vont être « transloqués » au sein des arbres ou éventuellement rendus au sol en fonction de la physiologie du peuplement. Dernier facteur très important, et qui peut être appréhendé en particulier grâce au réseau RENECOFOR et à la grande diversité des sites qui y sont représentés, c'est le type de sol, les conditions physicochimiques en termes de pH, de teneur en matière organique et de texture.

Avant de poursuivre, je fais un bref rappel historique sur les travaux qui ont été menés sur le réseau RENECOFOR en ce qui concerne les métaux, puisque ces éléments ne font pas partie du suivi habituel. Il y a eu notamment des travaux de thèse sur les teneurs en métaux dans les profils de sols, et également (c'était le cas de mon doctorat) sur les apports atmosphériques de métaux et la dynamique des métaux dans les sols, leur passage éventuel à la solution de sol. Il y a eu aussi des travaux sur la bioindication (par les mousses et les lichens), et on peut également rappeler que des sites RENECOFOR ont contribué au programme Bioindicateur financé par l'Ademe.









Les dépôts atmosphériques métalliques en forêt

Nous allons examiner pas à pas les termes du bilan des métaux pour un sol forestier, qui consiste classiquement à évaluer les entrées et sorties pour estimer la variation de stock.

Les entrées dans le système viennent d'une part de l'altération des roches (où ces éléments sont naturellement présents) et d'autre part des apports atmosphériques. Nous nous concentrerons surtout sur ces apports puisque, pour de nombreux éléments, ils dépassent largement les entrées par l'altération. Les sorties se font par l'exportation de biomasse ou par le drainage.

Le sous-réseau CATAENAT permet le suivi des dépôts atmosphériques hors et sous couvert forestier. Nous nous sommes greffés sur 6 sites de ce sous-réseau pour ajouter l'analyse des métaux aux mesures habituelles de ces dépôts hors et sous couvert.

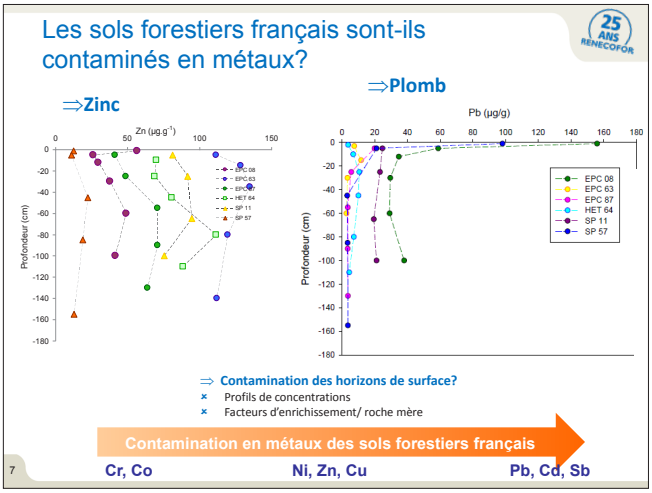
La comparaison des dépôts hors et sous couvert permet d'appréhender les processus qui se produisent au niveau de la canopée : assimilation directe de certains éléments ; accumulation de dépôt sec sur le feuillage durant les périodes sèches, et interaction éventuelle avec des molécules organiques qui peuvent être exsudées par le couvert forestier. Enfin certains éléments sont recyclés et sont exsudés et contribuent à la composition des pluviolessivats.

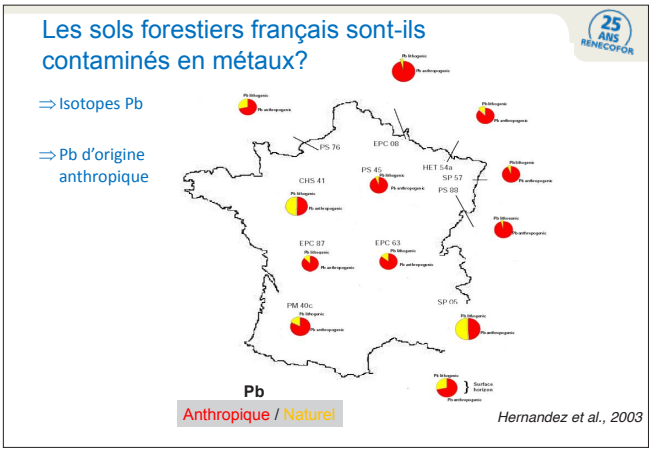
Au niveau des sols, les flux de métaux sous couvert sont donc différents des flux hors couvert (à découvert).

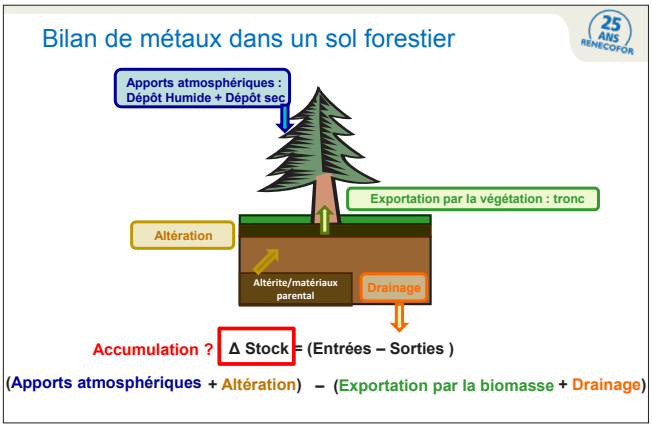
La comparaison de ces flux a permis de distinguer deux groupes d'éléments et d'identifier ainsi les principaux processus qui se produisent dans la canopée.

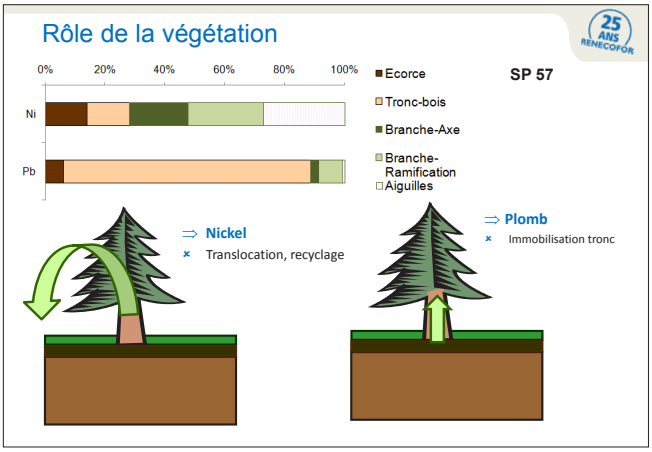
Le premier groupe, ici en jaune, c'est celui des éléments dont le flux est réduit au passage de la canopée : c'est-à-dire que les sols forestiers voient moins d'éléments que des sols non couverts situés dans la même zone (le facteur d'enrichissement R est inférieur à 1). On fait donc l'hypothèse que certains de ces éléments sont directement assimilés par le couvert : c'est peu étonnant pour des éléments comme le zinc ou le nickel qui sont des micronutriments ; c'est plus surprenant pour le cadmium, dont je vous ai dit qu'il n'avait pas de rôle biologique connu. C'est là un des exemples d'éléments dont Anne Probst dit qu'ils avancent masqués : le cadmium se comporte souvent de façon similaire au zinc dans les écosystèmes forestiers.

L'autre groupe, en rouge, c'est celui des éléments dont le flux est augmenté au passage de la canopée (R > 1). Pour le plomb, les flux qui atteignent le sol forestier sont 5 fois supérieurs aux flux qui atteignent les sols hors couvert. Cette observation, et les observations complémentaires qu'on a faites au niveau de la chimie des pluviolessivats et de la chimie des aiguilles, conduisent à l'hypothèse que c'est principalement l'accumulation de dépôts secs et son interaction avec des molécules organiques exsudées par le couvert qui explique l'augmentation de ce flux sous couvert.









Importance des dépôts comme source de métaux dans les sols forestiers

Les écosystèmes forestiers reçoivent des dépôts atmosphériques de métaux, mais dans quelle mesure les sols sont-ils contaminés par les métaux ?

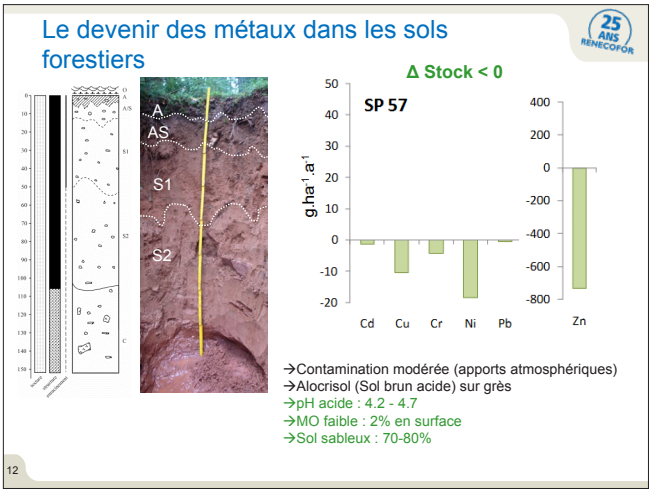
Pour faire le diagnostic de la contamination en métaux, on peut d'abord étudier les profils de concentration (en microgrammes par gramme de sol) selon la profondeur. Ici je donne en exemple des profils de concentration établis sur nos 6 sites d'étude pour le zinc et le plomb. Pour le plomb, on observe une augmentation des concentrations vers la surface, qui indique une contamination atmosphérique. Pour le zinc, on constate une grande diversité de concentrations dans les horizons profonds, qui reflète la diversité des situations géologiques, des concentrations naturelles. On utilise donc également le calcul des facteurs d'enrichissement (ratio de la concentration de l'élément considéré sur celui d'un élément invariant, en comparaison du même ratio dans la roche mère) qui permettent de conclure sur la base des profils et d'autres mesures.
Là encore on peut distinguer différents groupes d'éléments. Pour certains métaux on observe peu de contamination des sols forestiers du RENECOFOR, c'est le cas du chrome ou du cobalt. Pour d'autres, la réponse dépend des zones étudiées (c'est le cas du nickel, du zinc, du cuivre) et pour d'autres encore comme le plomb, le cadmium ou l'antimoine, on observe de façon quasi systématique une contamination des profils de sol par les apports atmosphériques.

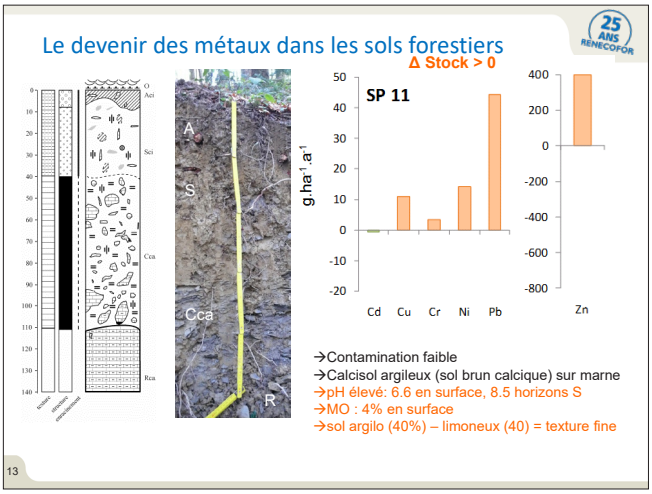
Dans le cas du plomb, comme l'a dit Anne Probst en introduction, on dispose d'un outil supplémentaire avec les différents isotopes qui ont permis, dans les années 2000, d'identifier l'origine naturelle (géologique) ou anthropique du plomb contenu dans les sols : on a pu montrer que l'essence plombée a été le facteur principal de la dispersion du plomb par voie atmosphérique et de la contamination avérée des sols forestiers français. On voit ici les proportions de plomb naturel (jaune) ou d'origine anthropique (rouge) mesurées dans les horizons de surface des sols de 12 sites RENECOFOR. La taille des cercles est proportionnelle à la concentration totale.

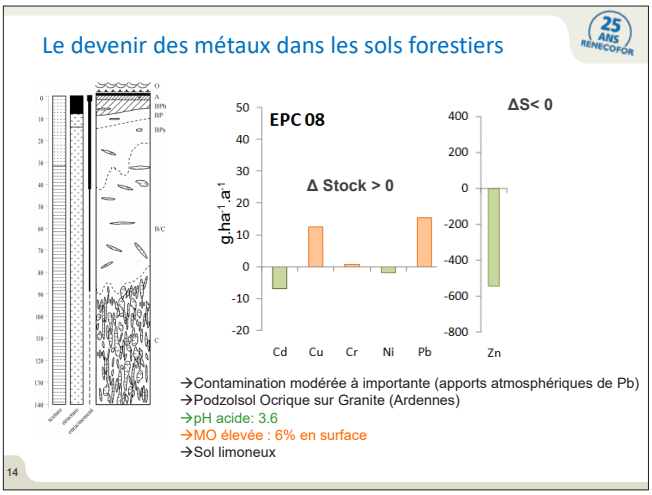
Les métaux s'accumulent-ils dans les sols forestiers ?

Après avoir montré qu'il y a bien des apports atmosphériques de métaux dans les sols, je reviens à ma question initiale : ces éléments s'accumulent-ils dans les sols forestiers français ?

La réponse passe par la dynamique de ces éléments dans l'écosystème forestier et par le rôle qu'y tient la végétation. Par exemple, à l'occasion d'une coupe sur la placette SP57, nous avons pu analyser les métaux dans tous les compartiments de la biomasse : tronc, branches, aiguilles. Ça nous a permis d'observer le comportement des différents métaux, et je présente ici le cas de deux éléments très contrastés : le nickel et le plomb. Le nickel se retrouve un peu dans tous les compartiments, ce qui démontre sa circulation dans le peuplement ; en conséquence, quand on établit le bilan pour le sol, l'exportation par la biomasse est peu importante et il faut se pencher plutôt sur le drainage à la base de la colonne de sol. En revanche le plomb est surtout présent dans le tronc, avec pour conséquence une importance accrue de l'exportation avec la biomasse, flux qu'on avait relativement ignoré jusqu'alors.







La question de l'accumulation dépend aussi des conditions pédoclimatiques. Voyons cela à travers l'exemple de trois sites très contrastés au niveau des conditions pédologiques.

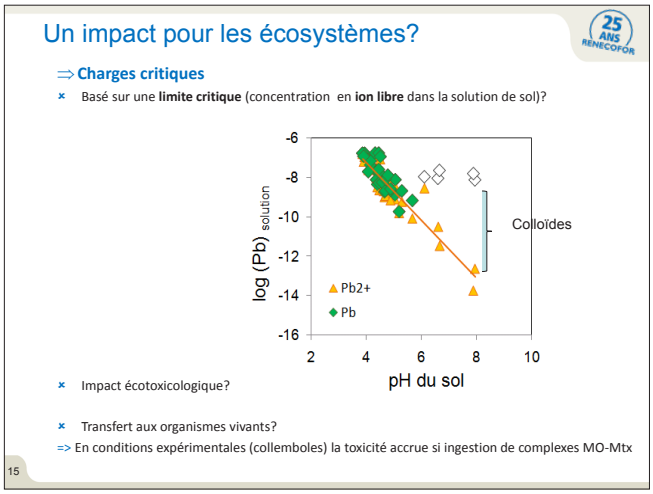
D'abord le site SP57, en Moselle, avec un sol assez acide et très sableux : quand on établit les bilans, on observe finalement un déstockage systématique des métaux (ou valeur nulle) ; ils sont dissous et exportés dans les eaux de drainage.

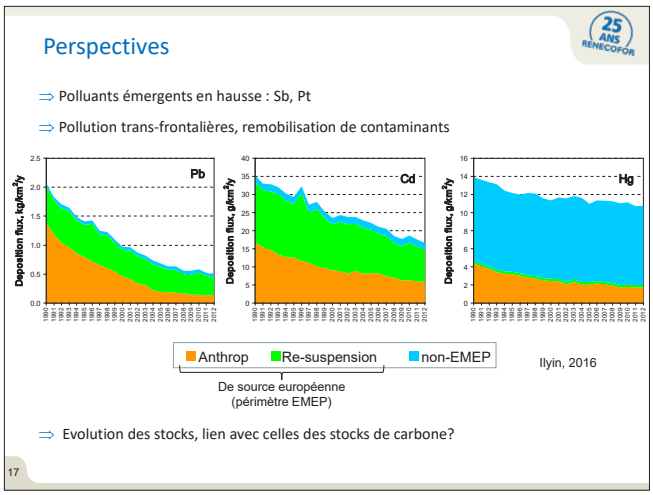
Le constat est complètement inverse pour le site SP11, dans l'Aude, dont le sol est développé sur marne ; c'est donc un sol très basique, un peu plus riche en matière organique et surtout très argileux. On y observe une accumulation systématique pour tous les éléments considérés.

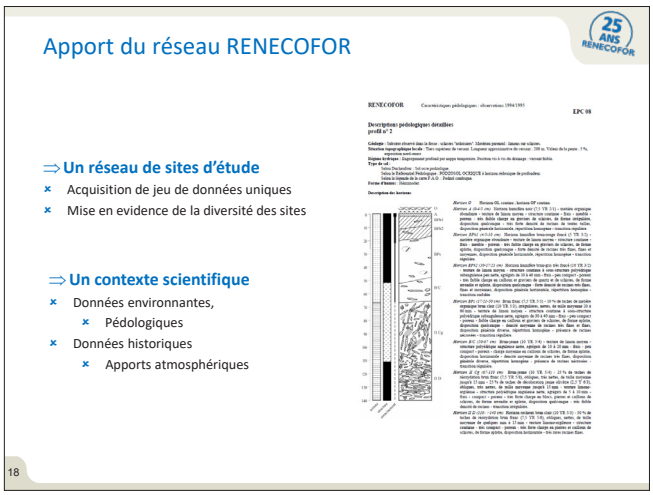
Enfin, l'effet des conditions pédoclimatiques peut aussi dépendre des éléments. On a le cas ici d'EPC08 dans les Ardennes, un site relativement contaminé dont le sol est acide avec une accumulation de matière organique assez importante dans les horizons de surface. Pour les éléments qui sont sensibles au pH acide, par exemple le cadmium ou le zinc, on observe une perte (déstockage) ou en tout cas pas d'accumulation ; mais pour des éléments qui ont une affinité particulière pour la matière organique, comme le cuivre et le plomb, on observe une accumulation dans le sol.

Photo : Erwin Ulrich, ONF

Profil sol de la placette EPC08







Quel impact pour les écosystèmes ?

La question de l'impact des métaux dans les écosystèmes forestiers reste ouverte, on ne peut pas donner de réponse claire actuellement. Par exemple, la méthodologie des charges critiques, qui permet d'estimer des seuils de toxicité pour d'autres types d'éléments, n'est guère applicable dans le cas des métaux car elle est basée sur l'hypothèse que la toxicité est liée à la concentration en ions libres en solution. Cette hypothèse implique que dans les sols à pH assez élevé, il y a très peu de toxicité des métaux puisque ces éléments n'y sont pas présents sous forme d'ions libres en solution. Or nos travaux ont montré qu'aux pH élevés ils sont présents sous forme colloïdale, en s'associant à de la matière organique dissoute ; et on sait au niveau expérimental que les métaux peuvent avoir un effet toxique même sous cette forme. Il faut donc développer une démarche d'écotoxicité approfondie pour pouvoir évaluer vraiment l'impact des pollutions métalliques sur les écosystèmes.

Par ailleurs, si pour certains éléments les émissions sont en baisse, les polluants émergents comme l'antimoine ou les platinoïdes voient au contraire leurs émissions augmenter. Et il ne faut pas oublier que les éléments qui se sont déposés au sol peuvent être réémis : c'est ce qu'on voit ici (figuré en vert) pour le plomb ou le cadmium sur la période 1990-2012. N'oublions pas non plus que les pollutions peuvent provenir d'activités anthropiques lointaines (émissions « non-EMEP* », extra-européennes, figurées ici en bleu) comme dans le cas du mercure lié à l'utilisation du charbon pour l'énergie…

Enfin on a vu que la dynamique de ces métaux était liée à l'intégralité du cycle biogéochimique de l'écosystème, et au vu de l'évolution des stocks de carbone dans les sols, par exemple, on peut se poser la question de l'évolution des stocks de métaux (cf. liens avec la matière organique).

En guise de conclusion,

je voudrais dire que l'apport du réseau RENECOFOR à ces études est immense. D'une part, du fait de la mise à disposition des sites d'étude qui ont une grande variété et qui permettent de considérer toute la diversité des fonctionnements pédologiques : c'est indispensable à la compréhension de la dynamique des métaux. Il n'y a que le réseau RENECOFOR qui puisse offrir ça. D'autre part, au-delà des sites, la qualité du contexte scientifique est un apport inestimable pour études comme celle-ci, focalisées sur un élément : je donne en exemple les planches pédologiques qui ont été un outil d'interprétation indispensable et complémentaire aux données que nous avons pu acquérir.

Je vous remercie.

MIEUX CONNAÎTRE LE CYCLE DES ÉLÉMENTS DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS POUR MIEUX ÉVALUER LES RISQUES POTENTIELS ASSOCIÉS AU STOCKAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Yves Thiry
Andra, Direction Recherche & Développement

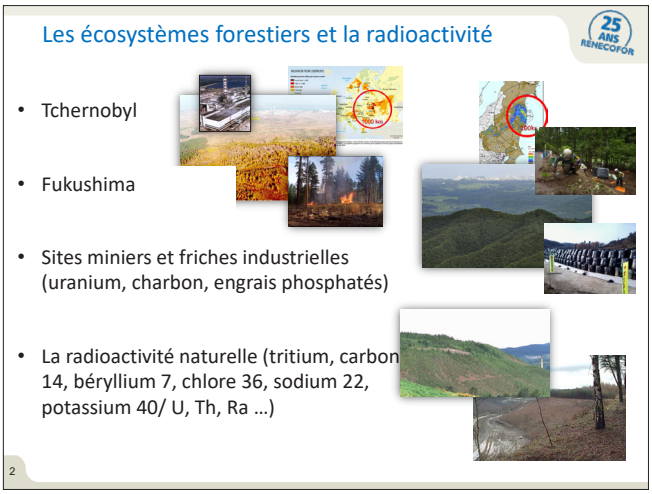


Photo : Nathalie Petrel, ONF

La radioactivité naturelle du sol est plus prononcée dans les massifs granitiques qu'ailleurs

Cette présentation a un intitulé assez générique ; c'est un cadre général dans lequel je vais tenter d'illustrer comment l'utilisation de données et échantillons du réseau RENECOFOR nous a aidés à répondre à certains questionnements scientifiques en lien avec le comportement des éléments radioactifs.

Les écosystèmes forestiers et la radioactivité…

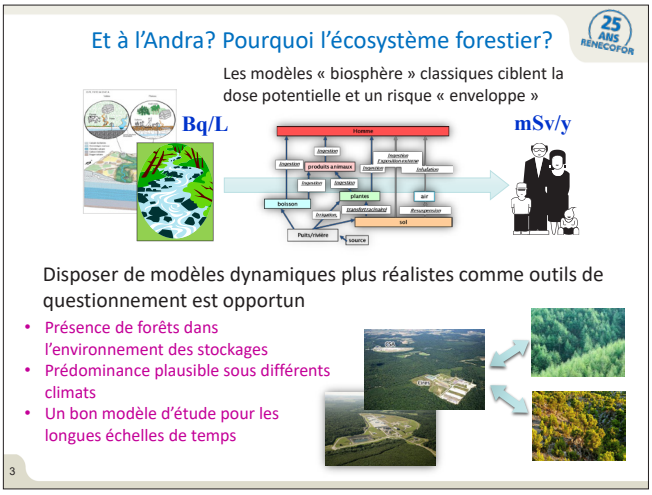
C'est un sujet d'étude qui est encore extrêmement peu développé. Il est même resté longtemps dans la périphérie des études de biogéochimie ou radioécologie, même si, vous vous en souvenez peut-être, les premiers biogéochimistes utilisaient des radiotraceurs : Vladimir Vernadsky en Russie, Eugene Odum aux USA.

Quelques événements majeurs ont suscité un nouvel intérêt pour le comportement des radioéléments dans les écosystèmes forestiers : on pense notamment à des catastrophes majeures telles que les accidents de Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011.

Tchernobyl, c'est une émission considérable de radioactivité, des transports sur de longues distances, des contaminations très fortes localement, à tel point que ça pouvait occasionner la mort de la végétation, notamment les pins sylvestres. Aujourd'hui il reste encore des problèmes difficiles à gérer, du fait de contre-mesures assez radicales (l'abandon des territoires) : c'est l'accumulation de biomasse sur pied, de matières organiques mortes et donc le risque d'incendies et de contaminations secondaires dans le futur.

Fukushima, c'est à peu près 10 fois moins de contamination, des transports sur de moins longues distances, mais une contamination très importante de l'écosystème forestier. La forêt représente 70 % des territoires contaminés, avec tous les problèmes de gestion que ça pose à long terme. Les contremesures sont beaucoup plus actives, dynamiques : décontamination non pas de l'entièreté des écosystèmes forestiers mais au moins des forêts proches des habitations ou des zones industrielles, des écoles, etc.

La radioactivité est aussi naturelle. Dans les sites miniers et les friches industrielles liés à la production d'uranium, de charbon et engrais phosphatés, on parle de radioactivité augmentée, du fait de concentrations locales accrues d'éléments comme l'uranium, le radium ou le thorium. Et puis il y a les éléments radioactifs d'origine naturelle avec des retombées notamment dans les écosystèmes forestiers, tels que le tritium, le carbone 14, le béryllium 37, le chlore 36, le sodium 22, le potassium 40. Ce sont des marqueurs naturels qui peuvent être aussi utilisés pour le suivi de leurs isotopes stables dans l'environnement ou celui de contaminations liées aux activités humaines.



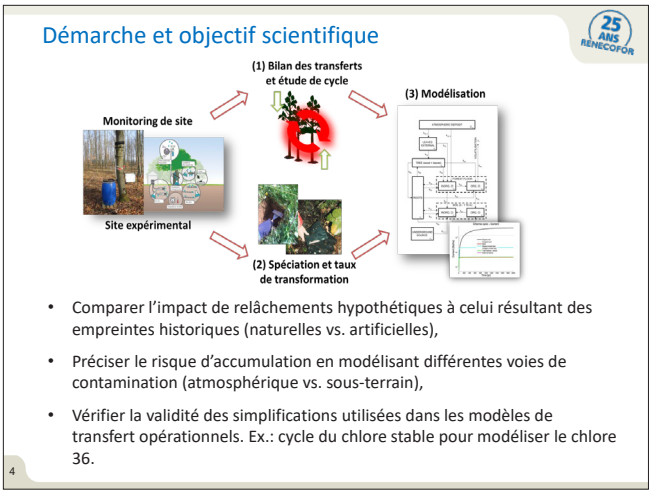


Photo : Jean-Jacques Boutteaux, ONF

La forêt, bon modèle d'études pour de très longues échelles de temps

Pourquoi l'Andra* s'intéresse-t-elle à l'écosystème forestier ?

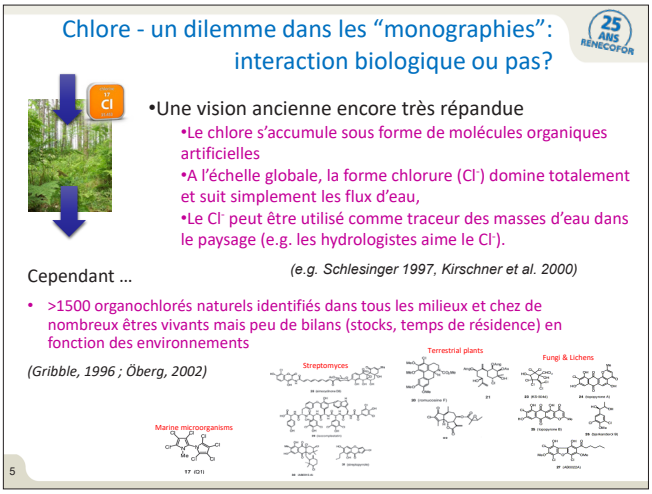
La gestion des déchets radioactifs impose des études d'impacts très sérieuses, fortement encadrées par la réglementation. Pour ça on utilise classiquement des modèles dits « biosphère » dont le but est la quantification d'une dose potentielle et d'un risque « enveloppe », disons un risque maximum. On part d'exutoires supposés (mais réalistes) et de biosphères très stylisées (biosphère tempérée, froide, chaude…) et on utilise des modèles classiques à compartiments et à flux pour chiffrer le transfert dans la chaîne alimentaire et calculer la dose infligée à des groupes critiques supposés utiliser le territoire de façon intense (en autarcie, par exemple). C'est donc une démarche très simplifiée, parce qu'on doit se projeter à très long terme (nos calculs vont jusqu'à 10 000 ans), et qui manque de réponse à certains questionnements scientifiques comme : quelle est la biodisponibilité de l'élément, où va-t-il s'accumuler, quel sera son temps de résidence dans tel ou tel compartiment ? C'est pourquoi nous nous intéressons au développement de modèles plus dynamiques et plus réalistes, qui viennent en support des modèles opérationnels de calcul de dose et qui sont aussi des outils de questionnement.

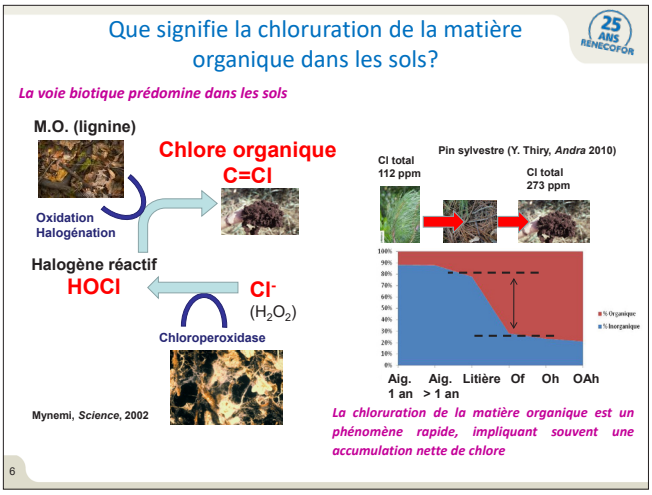
Pourquoi pour la forêt ? Parce que la forêt est très présente dans l'environnement proche des stockages de l'Andra ; parce qu'elle est prédominante sous différents climats, donc aussi sous des climats à très long terme qui nous intéressent pour des études d'impacts, (de type boréal ou méditerranéen) ; parce que les échelles de temps du développement de la forêt, de son fonctionnement, correspondent assez bien aux très longues durées qui nous intéressent.

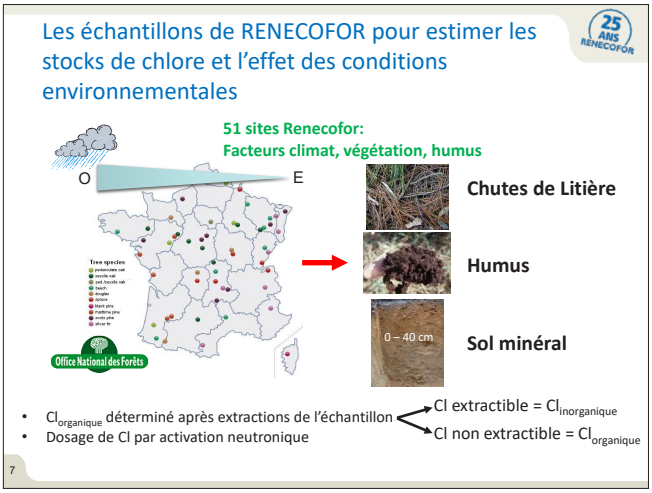
La démarche est assez classique. On part de sites expérimentaux plus ou moins équipés, sources de données et d'échantillons, pour avoir des bilans en termes de stocks, de flux. On peut aller vers l'expérimentation pour mieux appréhender la spéciation ou la transformation de ces éléments. Les données servent à calibrer des modèles qui sont ensuite utilisés pour répondre à certaines questions sur la répartition des éléments, leur taux de persistance, etc. Ces modèles sont très utiles pour répondre à différentes questions comme :

- Peut-on comparer l'impact de relâchements hypothétiques dans le futur à celui des empreintes historiques ? J'ai évoqué par exemple la présence de chlore 36 dans l'environnement ; il est intéressant de positionner l'impact des centres de stockage par rapport au marquage naturel actuel.
- Peut-on préciser le risque d'accumulation en modélisant différentes voies de contamination ? Les centres de stockage peuvent surtout être à l'origine de contaminations potentielles souterraines. Il est très compliqué de modéliser ce genre de comportement, donc on doit passer par l'étude des cycles des éléments stables pour simuler des contaminations souterraines et l'injection des radioéléments correspondants dans le cycle naturel.

Et enfin c'est utile pour vérifier la validité des simplifications de nos modèles opérationnels, ce qui me permet d'expliquer pourquoi je vais me focaliser sur le cycle du chlore stable, qui nous est bien utile pour modéliser celui du chlore 36.







Le cycle du chlore et ses ambiguïtés

Au niveau écologique, le chlore est encore un peu un mystère : y a-t-il une interaction biologique ou pas ? On est face à une vision assez ancienne et encore très répandue, qui dit que le chlore organique est nécessairement d'origine anthropique, qu'à l'échelle globale la forme chlorure domine et suit simplement les flux d'eau, et que le chlorure peut être utilisé comme traceur des masses d'eau dans le paysage. Certains imaginent donc encore que tout le chlore qui entre dans l'écosystème forestier en sort sous forme de chlorure, et très rapidement.

Pourtant il existe dans l'environnement des centaines de molécules organochlorées dont on sait aujourd'hui qu'elles sont produites naturellement. On les retrouve dans des tas de compartiments : les microorganismes marins, les levures, les plantes terrestres, les lichens… et surtout le sol où ont lieu les phénomènes de chloruration de la matière organique.

Voici rapidement ce qu'on en sait aujourd'hui : en présence d'eau oxygénée et d'une enzyme produite par des champignons, le chlore inorganique prend une forme très réactive (de l'eau de javel en quelque sorte) qui réagit avec la matière organique en formant des liaisons covalentes entre chlore et carbone. Donc on a du chlore lié à la matière organique. Cette chloruration de la matière organique intervient surtout lors des tout premiers stades de sa décomposition : on voit bien ici, sous pin sylvestre, le saut entre les proportions de chlore organique (marron) et inorganique (bleu) au cours du processus de décomposition figuré en « abscisses » (avec les aiguilles vertes puis les différents stades de décompositionen fonction de la profondeur). La chloruration est donc un phénomène assez rapide, et qui permet une accumulation de chlore.

Nous nous sommes tournés vers le réseau RENECOFOR pour estimer les stocks de chlore et aussi l'effet des conditions environnementales qui peuvent conduire à une accumulation de chlore sous forme organique. Nous avons travaillé avec le maximum de sites, dont ceux de CATAENAT pour avoir des données climatiques, mais également des échantillons de végétation, d'humus, de sol minéral…

Je passe sur le détail des analyses, sachant qu'on a fait la distinction entre les pools organique et inorganique de chlore.

Photo : Luc Croisé, ONF

Recherche d'échantillons dans la "pédothèque" RENECOFOR

Une grande variabilité des concentrations et stocks de chlore (Redon *et al.*, EST 2011)

	Cl total (mg kg^{-1})	% de Cl organique	Stock de $Cl_{org.}$ (kg ha^{-1})
Litière	46 - 528	41 ± 18	0.1 – 2.5
Humus	45 - 1041	75 ± 27	0.2 - 64
Sol Minéral	25 - 210	89 ± 26	53 - 400

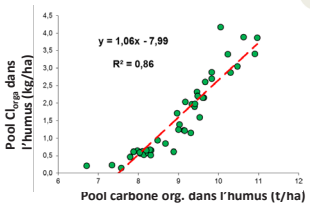
- Concentrations en Cl plus élevées dans l'humus
- Fraction en Cl organique élevé dans humus et sol minéral,
- Des stocks plus élevé dans le sol (réservoir)

➡ les humus agissent comme des bioréacteurs

8

L'humus est aussi le compartiment le plus réactif au facteurs environnementaux

Un facteur clé: l'accumulation de matière organique (qui favorise l'accumulation de chlore organique)



Kruskall-Wallis Rank Sum Tests pour distinguer des compartiments qualitatifs

Stocks de Cl organique	Input de Cl	Essence	Stock de C	pH du sol
Litière	✗	✗	-	-
Humus	✓	✓	✓	✓
Sol minéral	✗	✗	✗	✗

Autres facteurs importants:
dépôts élevés + résineux + humus mor-moder + acidité

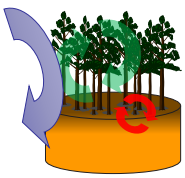
9

Le taux d'accumulation lié à la transformation (inorg. vs. org.): une autre information essentielle pour la description du cycle

$$\text{Taux d'accumulation} = \frac{([Cl]\text{humus} - [Cl]\text{litière}) \times \text{MS humus}}{\text{T residence MS}}$$

Exemple - EPC08: **151** mg Cl kg^{-1} ⟶ **364** mg Cl kg^{-1}

Un cycle organique en plus du cycle inorganique



Grande variabilité: **0 – 0,43** kg Cl ha^{-1} an^{-1}

Quantités modestes en comparaison aux dépôts humides: 3 - 78 kg Cl ha^{-1} an^{-1}

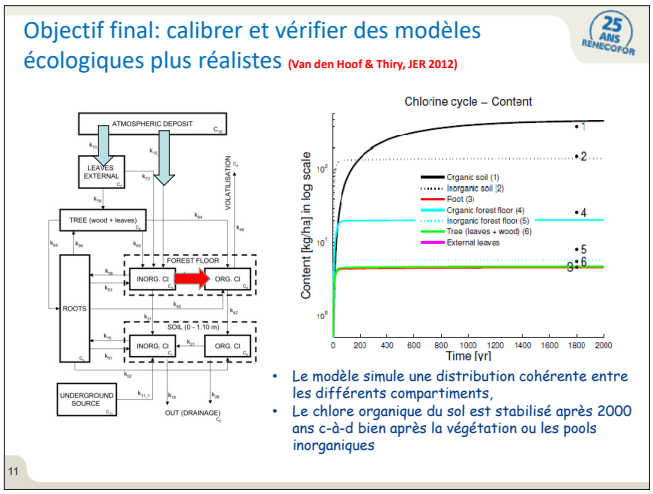
10

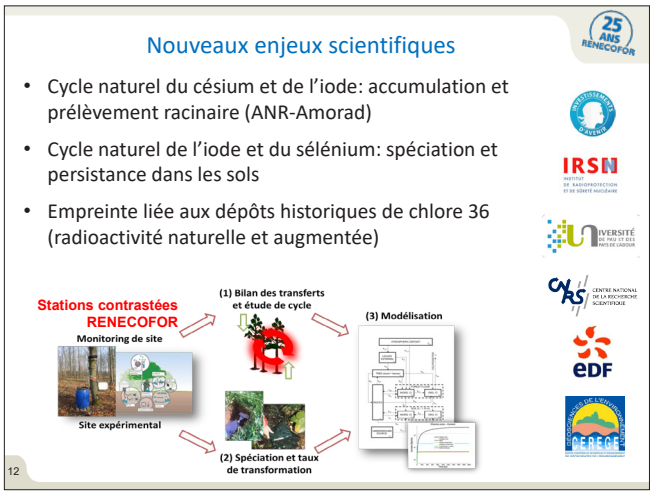
Les premiers résultats nous ont donné ce bilan, qui témoigne d'une très grande variabilité en fonction du type de site. Dans la litière, on observe des teneurs extrêmement variables avec déjà un certain pourcentage de chlore organique ; des traces probables d'un début de l'action microbiologique, même discrète, avant la collecte. Mais ce qui est intéressant c'est l'augmentation non seulement des teneurs en chlore total, mais de la proportion de chlore organique lors de la formation de l'humus. Cependant c'est le sol minéral qui, malgré tout, conserve le rôle de stock de chlore du fait, justement, de la persistance du chlore sous forme organique dans ce compartiment.

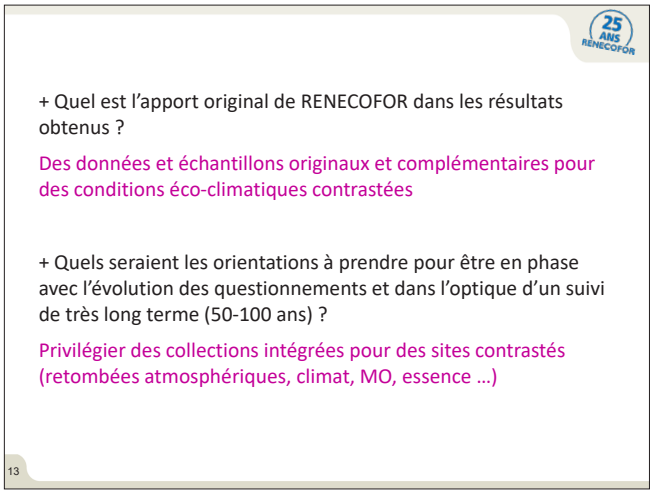
De cette première vision on a pu déduire que les humus agissent comme des bioréacteurs ; c'est à ce niveau que se transforme le chlore et c'est ce qui est à l'origine de sa persistance dans le sol.

L'humus est aussi le compartiment le plus réactif aux facteurs environnementaux. L'accumulation de matière organique est un facteur clé, comme l'illustre ce graphe qui montre une très belle relation entre le pool de carbone organique et le pool de chlore organique dans l'humus. Mais, plus largement, nous avons réalisé des tests statistiques pour tenter d'élucider les facteurs environnementaux qui favoriseraient la production et la persistance de chlore dans l'environnement, notamment sous forme de chlore organique. Seul le compartiment de l'humus est apparu comme très corrélé à différentes variables environnementales, notamment les apports de chlore, les essences, le stock de carbone et le pH du sol : plus on a affaire à des dépôts élevés, à des résineux, à un humus de type Mor-Moder et à une acidité forte, plus grande est la probabilité de former du chlore organique et de l'accumuler dans l'environnement.

Enfin pour bien décrire le cycle du chlore, les stocks et les flux ne suffisent pas ; il faut aussi estimer le taux d'accumulation lié à la transformation. On a vu que c'est au niveau de l'humus que se forme le chlore organique, avec des augmentations de concentration du fait de la captation du chlore inorganique des dépôts, lequel rentre dans les réactions de chloruration. Nous avons inventé une petite formule pour quantifier ce taux d'accumulation apparent et nous sommes arrivés à la conclusion qu'il y a toujours une énorme variabilité selon les sites mais aussi que les taux de transformation sont finalement assez faibles. Ça réagit rapidement pendant le processus d'humification, mais globalement le flux de transformation est faible par rapport à d'autres transferts ; ça représente notamment à peine quelques % des retombées. Ce qui nous fait dire qu'on ne peut pas négliger l'existence d'un cycle organique du chlore (en rouge), mais il mobilise encore très peu de quantités par rapport au cycle géochimique (en mauve). Malheureusement je n'aurai pas le temps de parler du cycle biologique (en vert) qui mobilise aussi d'énormes quantités de chlore et sur lequel on devrait revenir dans le futur.







Finalement, grâce à toutes ces données sur les intrants, les chutes de litière, le taux de chloruration et autres (données acquises *via* RENECOFOR et d'autres sites), on est capable de simulations plus réalistes. On peut calibrer le genre de modèle schématisé ici à gauche avec la représentation de la végétation, des différents compartiments du sol, et surtout avec une représentation explicite des compartiments organiques du chlore. À droite, je veux juste souligner la rapidité de la mise en équilibre entre la végétation et les pools de chlore inorganique (nos modèles opérationnels ne sont donc pas remis en question). Mais ce qu'il est intéressant de voir, c'est la lente progression de la formation du pool de chlore organique qui est en général négligée dans les modèles opérationnels ; on n'arrive à l'équilibre qu'après 1000 à 2000 ans environ, ce qui correspond bien aussi à la persistance de la matière organique dans les horizons profonds des sols, dont on a parlé dans la session 3.

Et pour la suite ?

À défaut de conclusion, j'ai une bonne nouvelle. Nous avons de nouveaux enjeux, de nouveaux partenaires pour de nouvelles aventures, notamment sur le césium et l'iode en lien avec l'accumulation et le prélèvement racinaire dans le cadre d'un projet ANR ; nous avons aussi de nouveaux questionnements sur le sélénium, sa spéciation et sa persistance dans les sols. Dans ces projets, on s'intéresse aux éléments stables pour mieux représenter le cycle des isotopes radioactifs.

Par ailleurs nous allons nous pencher sur l'empreinte liée aux dépôts historiques de chlore 36, soit les dépôts naturels, soit ceux liés aux tests nucléaires atmosphériques. Nous allons bénéficier d'une toute nouvelle technologie, la spectrométrie de masse par accélération, qui est mise en œuvre au CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement), et je pense que ce sera même une première mondiale si on arrive à faire toutes les analyses prévues.

Pour le futur de RENECOFOR, ce que nous lui souhaitons ainsi qu'à nous-mêmes, j'ai été très scolaire : j'ai repris les questions et j'ai mis les réponses !

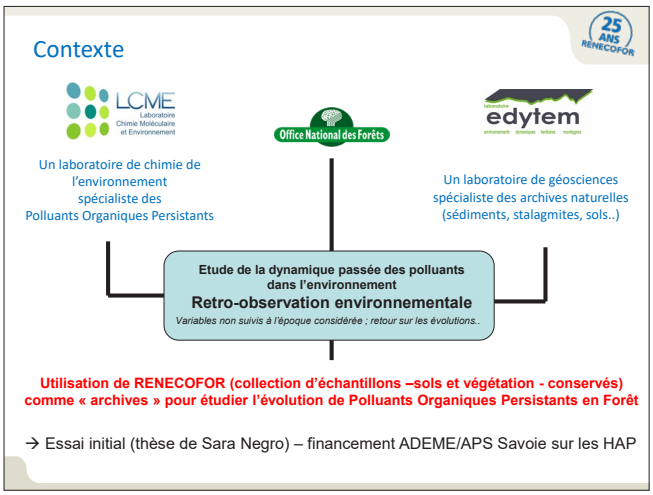
L'apport de RENECOFOR, c'est surtout, dans notre cas, des données et échantillons originaux et complémentaires pour des conditions éco-climatiques contrastées. Ce qui nous intéresse en particulier ce sont les très longues échelles de temps, donc la diversité des écosystèmes est importante.

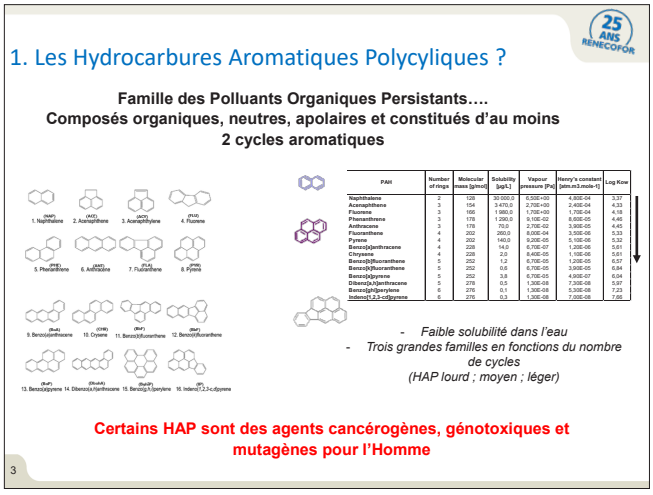
Et pour le futur, je pense tout simplement qu'il faut privilégier, continuer à privilégier ces collections très intégrées pour ces sites très contrastés, notamment en termes de climat, de retombées atmosphériques et de types de turn-over de la matière organique.

Merci à RENECOFOR et merci de votre attention.

LA FORÊT COMME INDICATEUR DES POLLUANTS ORGANIQUES PERSISTANTS DE L'ATMOSPHÈRE ET DE LEUR ACCUMULATION DANS L'ENVIRONNEMENT : L'EXEMPLE DES HYDROCARBURES AROMATIQUES

Jérôme Poulenard
Université de Savoie, Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne (edytem)





PAH	Number of rings	Molecular mass [g/mol]	Solubility [µg/L]	Vapour pressure [Pa]	Henry's constant [atm.m3.mole-1]	Log Kow
Naphthalene	2	128	30 000,0	6,93E+00	4,80E-04	3,37
Acenaphthene	3	154	3 470,0	2,70E+00	2,40E-04	4,33
Fluorene	3	166	1 980,0	1,70E+00	1,70E-04	4,18
Phenanthrene	3	178	1 290,0	9,10E-02	8,60E-05	4,46
Anthracene	3	178	70,0	2,70E-02	3,90E-05	4,45
Fluoranthene	4	202	260,0	8,00E-04	5,50E-06	5,33
Pyrene	4	202	140,0	9,20E-05	5,10E-06	5,32
Benzo[a]anthracene	4	228	14,0	6,70E-07	1,20E-06	5,61
Chrysene	4	228	2,0	8,40E-05	1,10E-06	5,61
Benzo[b]fluoranthene	5	252	1,2	6,70E-05	1,20E-05	6,57
Benzo[k]fluoranthene	5	252	0,6	6,70E-05	3,90E-05	6,84
Benzo[a]pyrene	5	252	3,8	6,70E-05	4,60E-07	6,04
Dibenz[a,h]anthracene	5	278	0,5	1,30E-08	7,30E-08	5,97
Benzo[ghi]perylene	6	276	0,1	1,30E-08	5,30E-08	7,23
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	6	276	0,3	1,30E-08	7,00E-08	7,66

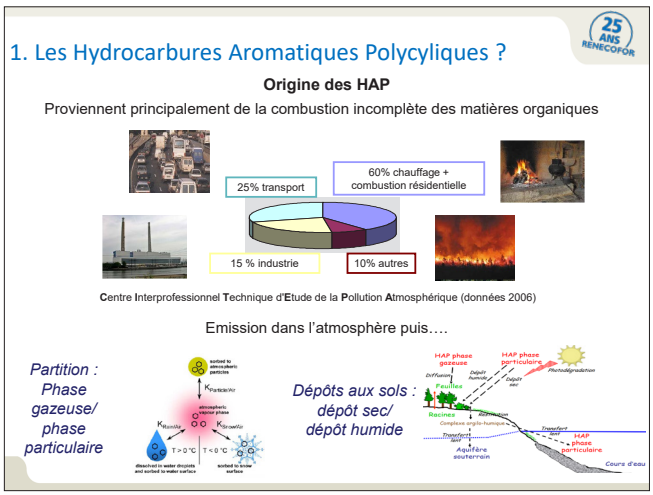
Veuillez me pardonner le titre interminable de cette présentation ! Globalement je vais parler de forêt, de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et de RENECOFOR bien sûr. Mais dans le groupe des co-auteurs, je suis sans doute le moins compétent sur ces sujets puisque je suis pédologue, je travaille sur les environnements plutôt très anciens, et je ne suis spécialiste ni des HAP ni de la forêt. C'est une histoire scientifique particulière qui m'a conduit jusqu'ici.

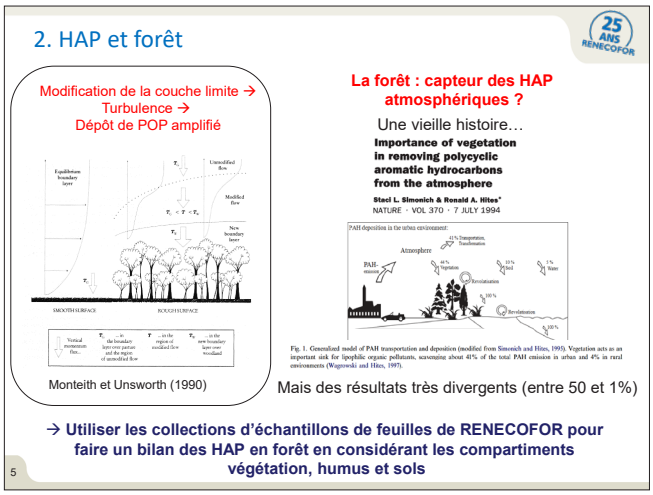
Cette histoire, c'est celle de deux laboratoires de l'Université Savoie-Mont Blanc : un laboratoire de chimie environnementale, avec de vrais spécialistes des polluants organiques persistants dans l'atmosphère, les eaux, les sols, et le laboratoire edytem, auquel j'appartiens, qui travaille sur les géosciences et notamment sur les archives naturelles. Notre métier c'est d'essayer de reconstituer des dynamiques historiques de très long terme et notamment dans les milieux de montagne. Donc *a priori* deux univers scientifiques très différents, mais on se côtoie et fatalement on essaie de croiser les deux approches pour tenter de reconstituer l'histoire des polluants en utilisant des archives naturelles. Nous faisons ça sur différents polluants, sur différentes matrices, notamment des sédiments de lacs et des stalagmites. Nous avons montré par exemple qu'il y a une explosion des teneurs en HAP à partir du 17e – 18e siècle, au moins dans les forêts alpines, et qu'il y a dans les sédiments de lacs un maximum de HAP correspondant aux années 1930-1950. Mais pour décrire la dernière période, celle des 20 à 30 dernières années, les stalagmites et sédiments de lacs n'ont pas une résolution suffisante ; il faut donc d'autres types d'archives. RENECOFOR n'est pas une archive, mais c'est comme ça que nous avons voulu l'utiliser, ou du moins les échantillons qui ont été stockés : pour faire de la rétro-observation environnementale, essayer de retrouver l'histoire des polluants du passé. Nous l'avons fait dans le cadre d'une thèse, financée notamment par l'Ademe.

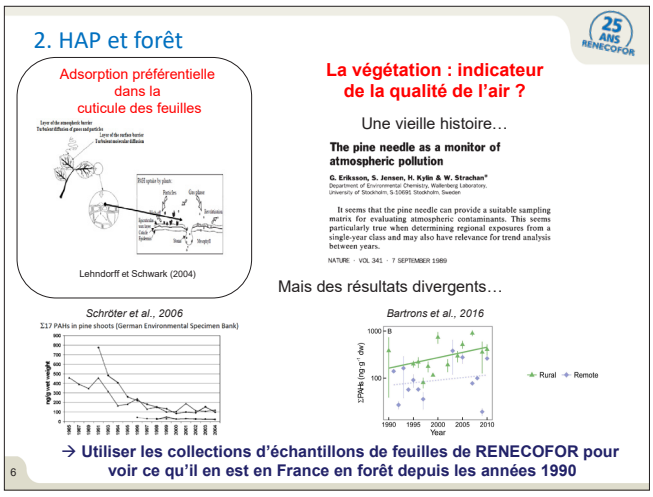
Quelques mots sur les HAP

Anne Probst a déjà dit en introduction que c'est une famille des polluants organiques persistants, qu'ils sont chimiquement compliqués et qu'ils ont des cycles aromatiques. J'ajoute que, dans cette famille, il y en a qui ont 2-3 cycles aromatiques, on les appelle les *légers* ; ceux qui en ont 4-5 sont les *moyens* et ceux qui en ont 6 sont les *lourds*. Ils ont tous à peu près les mêmes propriétés : ils sont peu solubles, peu volatils… mais les plus lourds sont les plus difficiles à « bouger », ce sont les plus persistants.

Certains de ces polluants sont cancérogènes, génotoxiques et mutagènes pour l'homme en concentrations très faibles, et c'est évidemment ce qui explique l'intérêt qu'on leur porte.







Quant aux sources d'émission de ces HAP, retenons que ce sont essentiellement des combustions incomplètes de matières organiques, aussi bien des très jeunes matières organiques (du bois) mais aussi du charbon, du pétrole. Dans l'atmosphère, ces HAP peuvent rester en phase gazeuse ou se sorber sur les particules, et tout ça retombe au sol, soit à l'état sec, soit à l'état humide.

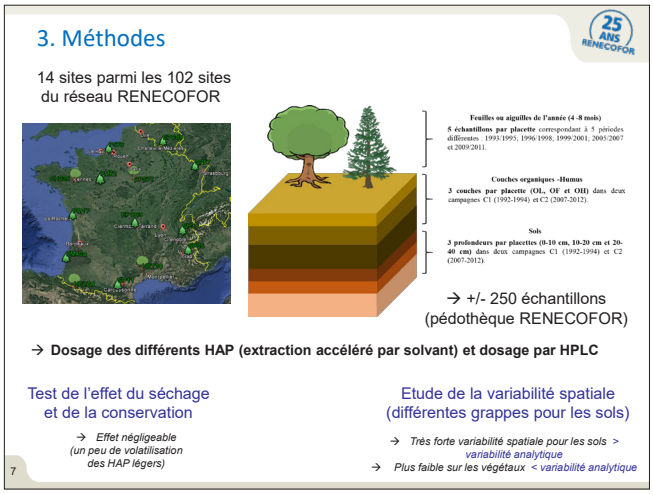
Que se passe-t-il en forêt ?

Il y a une vieille idée qui dit qu'en forêt la circulation atmosphérique est évidemment très perturbée, qu'il y a des surfaces spécifiques extrêmement fortes et que ça amplifie la quantité de polluants organiques persistants qui tombent. La forêt pourrait donc être vue comme un puits, un capteur des HAP atmosphériques. La publication un peu fondatrice de cette idée sur « l'importance de la forêt pour piéger les HAP dans l'atmosphère » date de 1994 (dans la revue *Nature*). Mais quand on fait le bilan bibliographique depuis cette date on voit des résultats extrêmement divergents. Finalement, que capte la forêt ? On trouve des valeurs extrêmement fortes, notamment pour les sites qui sont proches des zones d'émission, et aussi des valeurs très faibles, notamment dans les zones éloignées. Nous avons voulu en avoir le cœur net en utilisant les échantillons de RENECOFOR.

Par ailleurs, comme ces polluants aromatiques sont hydrophobes et ont une forte affinité pour les substances lipidiques, il y a une autre vieille idée qui dit qu'ils s'adsorbent préférentiellement sur la cuticule des feuilles, et qu'une mise à l'équilibre se fait entre les polluants de l'atmosphère et les polluants au sein des feuilles. Les feuilles, ou la végétation forestière en général, pourraient être un indicateur de la qualité de l'air, selon une référence de 1989 dans *Nature* : « Les aiguilles de pin comme enregistreur de la pollution atmosphérique ». Mais là encore, depuis cette époque on trouve dans la littérature des résultats très divergents. J'en propose deux exemples : l'un en Allemagne (2006), où on voit des teneurs en HAP qui décroissent très rapidement au cours du temps (entre 1985 et 2004), l'autre à l'échelle mondiale (2016) qui montre un résultat opposé avec plutôt une augmentation des concentrations en HAP dans les feuilles des forêts. Là encore, nous avons voulu en avoir le cœur net en utilisant RENECOFOR.

Photo : Alain Blumet, ONF

Parmi les origines de HAP, les feux de forêt



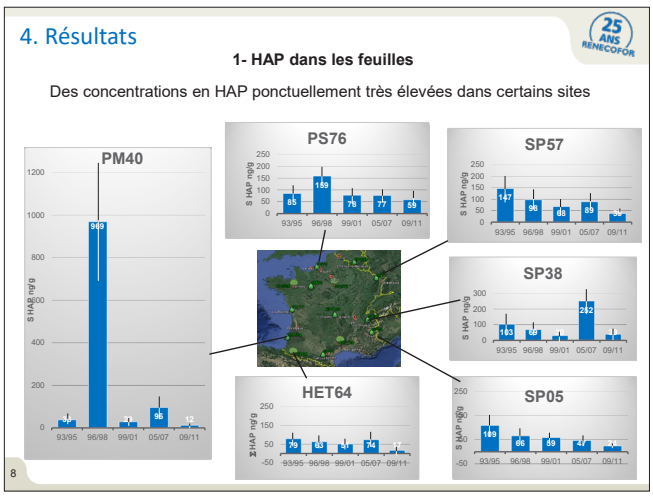
Notre étude

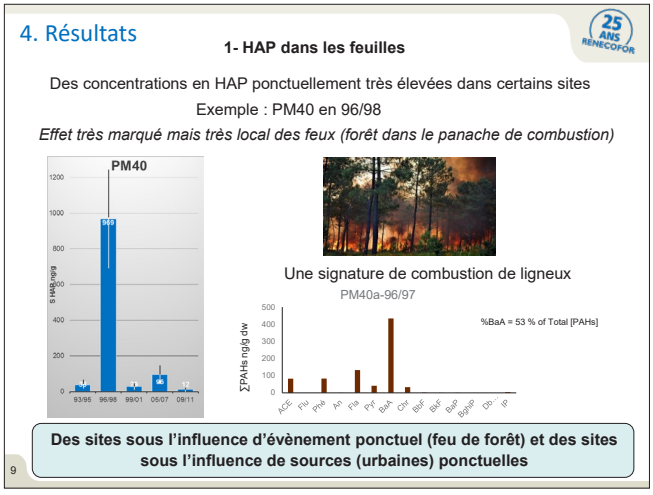
Sans entrer dans le détail, nous avons choisi pour l'instant un petit nombre de sites (14). Du coup nous sommes très embêtés par la variabilité entre les sites, mais c'est déjà un début. Notre archive, c'est la pédothèque, où nous avons récupéré des feuilles des différentes campagnes depuis 1993 jusqu'en 2011, et les échantillons de sol et couches holorganiques (humus) des deux campagnes « sol » (1992-1994 et 2007-2012). Les chimistes ont ainsi analysé 250 échantillons (feuilles, sols) en essayant différentes choses pour que ce soit « propre ». Ils ont surtout testé s'il y avait un effet du stockage et de la conservation sur les valeurs de HAP mesurées ; sachez que ce n'est pas simple de doser proprement des HAP dans des échantillons conservés comme ça. Et puis la variabilité intrasite est très élevée.

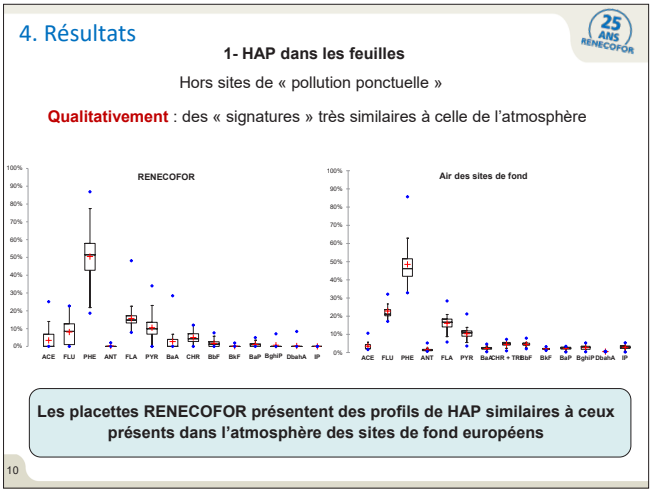
Les feuilles reflètent-elles les teneurs atmosphériques en HAP ?

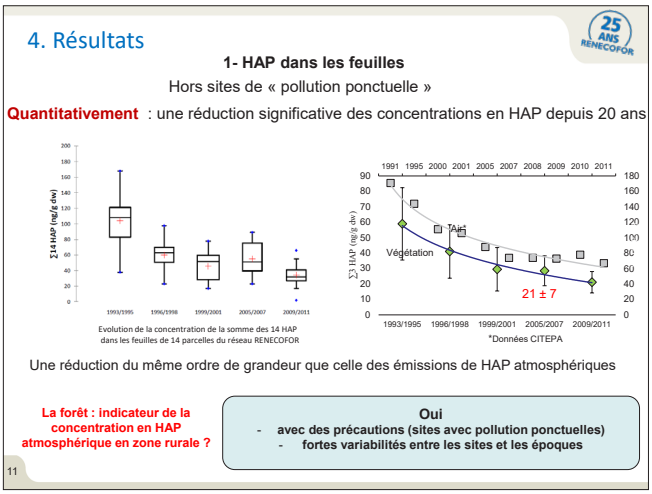
Globalement, les concentrations sont de l'ordre de 100 nanogrammes par gramme mais on voit de temps en temps, (comme ici en 96/97 dans la placette de pin maritime landaise PM40) un pic 10 ou 20 fois supérieur à ce qu'on a dans les autres situations et aux autres époques. Ça paraît donc un peu chaotique et nous avons cherché ce qui pouvait expliquer ces valeurs-là. Il y a différents cas, mais voyons de plus près l'exemple de la placette de pin maritime.

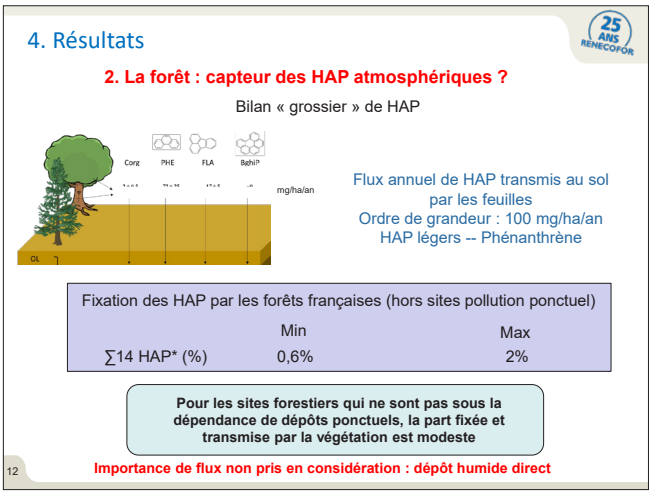
Nous avons observé le profil de HAP. Ça consiste à ordonner les HAP du plus petit au plus grand et à regarder leurs proportions relatives pour savoir ceux qui « pèsent » : les légers, les moyens, les lourds ? Sans surestimer la capacité de ce profil à préciser les sources,ça permet dire ici que c'est une combustion récente de ligneux : on a enregistré un feu de forêt. Mais dans la forêt landaise ou dans les forêts françaises, beaucoup de feux n'ont pas été enregistrés... C'était donc un feu relativement local, et on était plus ou moins dans le panache de fumée.
Si on enlève ces cas extrêmes, les profils de HAP donnent globalement la même « signature », dominée par les HAP légers et notamment le phénanthrène (le 3e). La même que ce que les atmosphériciens mesurent dans les sites dits du « bruit de fond », éloignés des zones d'émissions. Donc les sites RENECOFOR, du moins ceux que nous avons étudiés, enregistrent qualitativement assez bien les HAP présents aujourd'hui dans les sites de fond.

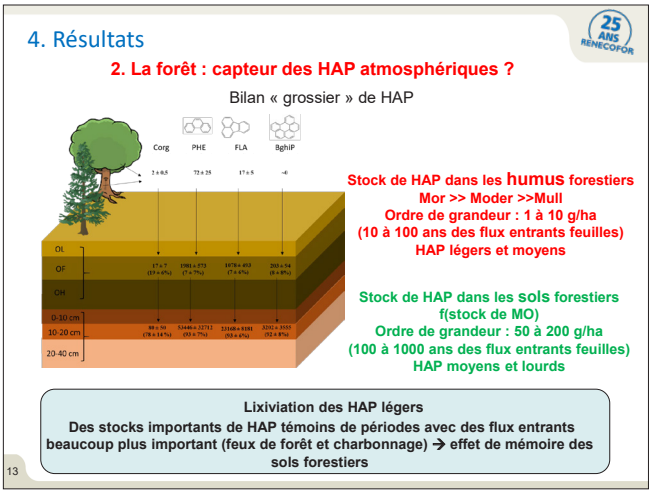












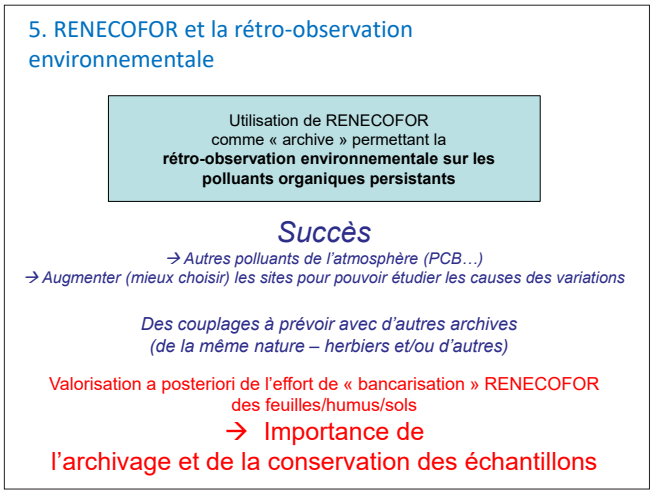
Du point de vue quantitatif, là encore quand on élimine les cas extrêmes, on voit qu'il y a de 1993 à 2011 une diminution significative des concentrations en HAP dans les feuilles des forêts françaises, et que cette diminution est exactement du même ordre de grandeur (elle suit le même *trend*) que la diminution des émissions dont Anne Probst a parlé, liée notamment à la diminution de la combustion de charbon.
La forêt est-elle, d'une certaine manière, un indicateur de la qualité de l'air en France, dans les sites ruraux ? La réponse est oui, mais avec une forte variabilité et avec pour certains sites des émissions ponctuelles, notamment des feux de forêt, qu'il faut savoir corriger.

La forêt est-elle un capteur des HAP atmosphériques ?

Sur le deuxième aspect, nous avons été un peu osés avec nos 14 sites : nous avons carrément tenté de faire un bilan pour essayer de voir ce que la forêt a capté. D'après les valeurs mesurées, on estime les flux liés aux chutes de feuilles, on regarde à l'échelle de la France… On voit que les flux induits par les chutes de feuilles sont de l'ordre de 100 mg/ha/an, et quand on calcule ce que ça représente en termes de fixation dans les forêts françaises, on voit que ce n'est pas grand-chose : entre 0,6 et 2 % des émissions. Attention : ça ne concerne que les forêts éloignées des zones d'émissions, c'est-à-dire le bruit de fond, et il y a un certain nombre de flux qui, objectivement, ne sont pas très bien mesurés ; cette valeur est donc sans doute très sous-estimée. Mais en ordre de grandeur on est en tout cas plus proche de 1% que de 50%.

Nous avons quand même regardé un peu ce qui se passe dans les humus et dans les sols. Dans les humus, il n'y a pas que des HAP légers, il y a aussi des moyens, et les ordres de grandeur de stock, cette fois, sont de l'ordre de 10 à 100 fois le flux annuel constaté précédemment (ce qui entre dans les feuilles). On constate aussi des concentrations (et donc des stocks) très importantes dans les Mor et beaucoup plus faibles dans les Mull. En ce qui concerne les sols, il faut encore rajouter au moins un facteur 10, et on observe que le stock de HAP est complètement conditionné par les stocks de matière organique : c'est le stock de matière organique qui pilote le stock de HAP.

Ce qui est certain en tout cas, c'est que de tels stocks ne peuvent pas être expliqués par les flux qu'on mesure aujourd'hui. On retrouve ici une information contenue dans les stalagmites et dans les sédiments : le moment où il y avait le maximum de HAP dans la forêt, c'était peut-être la période de charbonnage (charbon de bois), ou peut-être la période où l'électricité était produite essentiellement avec du charbon, au début du 20e siècle ; mais aujourd'hui cet effet de puits des sols est plutôt en voie d'atténuation. Les sols forestiers conservent donc la mémoire de ces pollutions atmosphériques anciennes.



Bilan sur RENECOFOR

On est au début d'une histoire, c'est évident. Ces résultat sont très partiels et mériteraient d'être complétés, mais l'idée de base d'utiliser RENECOFOR comme une archive permettant la reconstitution de la dynamique des polluants est prometteuse. Nous avons essayé avec un relatif succès et je pense qu'il y a encore vraiment des choses à faire. Il faut évidemment utiliser beaucoup plus de sites pour mieux comprendre comment les choses se passent. Il faut aussi affiner le couplage avec nos archives habituelles (stalagmites, sédiments de lacs) pour essayer de reconstituer les choses de manière plus globale.

J'ai par ailleurs un message sur RENECOFOR : vous faites un effort considérable pour les mesures, mais aussi dans la collecte des échantillons et leur archivage (on utilise maintenant le terme horrible de bancarisation). Ces efforts sur les échantillons peuvent payer à long terme : aujourd'hui on y revient pour les HAP, mais peut-être que dans 30 ou 40 ans on en aura besoin pour autre chose dont on n'a pas encore idée. La conservation des échantillons, c'est à mon avis une plus-value de RENECOFOR, comme du RMQS*, par exemple. Pour l'avenir, n'oublions pas la pédothèque. Merci.

Discussion

Questions / Réponses

Yves Birot, Académie d'agriculture - Je m'interroge sur la forêt comme capteur de mercure, lequel provient des activités industrielles ou des combustibles fossiles. Lorsque la forêt brûle, ce mercure est réémis dans l'atmosphère, or en ce moment la forêt brûle beaucoup (en Colombie Britannique, en Californie, au Portugal) et on sait qu'avec le changement climatique les grands feux vont se multiplier. Les études aux USA montrent que 30% des émissions annuelles liées aux activités industrielles provient des incendies de forêt (principalement en zone boréale - l'Alaska - et en Californie) ; c'est beaucoup. A-t-on a des données sur cette situation en Europe, sachant que c'est un problème de santé publique, parce que ça va à la fois dans l'air, dans les cours d'eau et après dans les lacs ?

Laure Gandois (LG) - Je ne suis pas spécialiste du mercure, mais je reviens sur les graphes qui montraient, à la fin de mon topo, la proportion, dans la dispersion atmosphérique, de la réémission et des émissions « non EMEP » pour le cadmium, le plomb et le mercure. Pour les deux premiers, la proportion de réémission est importante, et c'est plutôt lié à du réenvolement de sol. Pour le mercure la proportion de réémission est assez faible et on peut effectivement penser qu'elle vient des feux de forêt, mais ce sont les émissions « non EMEP* » qui sont majoritaires. À ma connaissance, l'utilisation du charbon reste une source majeure de mercure au niveau de l'atmosphère.*

Anne Probst (AP) - Il n'est guère possible de balayer tous les métaux en traitant correctement le cas du mercure, qui a un cycle très complexe. Beaucoup de communautés sont aujourd'hui mobilisées sur le mercure, mais il me semble que peu de travaux ont une vision intégrée du cycle sur les écosystèmes forestiers, et notamment vis-à-vis des nouvelles inquiétudes liées aux feux de forêt. Il faudrait donc s'y atteler de façon urgente, mais je n'ai pas d'éléments précis à donner là-dessus.

Patrice Coddeville, IMT Lille-Douai - Je précise que le mercure est un élément très difficile à mesurer dans l'air, dans les particules et même dans les précipitations. Il a failli être réglementé au niveau européen mais on a buté sur la complexité de la partie mesure ; il existe sous trois formes chimiques qui sont assez difficilement identifiables. Il faut savoir qu'en France on a quand même fait pendant 4 ans des mesures de mercure gazeux et dans les précipitations, en milieu rural, et on a dû arrêter ces mesures parce que c'était très coûteux et non quantifiable dans la durée (valeurs extrêmement faibles).

Hugues Titeux, UCL - (1) Sait-on si le plomb accumulé dans les troncs est absorbé via les racines ou s'il est transféré à travers l'écorce ? (2) Quel est le rapport chlore/carbone dans les molécules humiques du sol ? Est-ce que ça pourrait être utilisé pour des études de dynamique du carbone dans les sols ?

LG - (1) Notre étude ne permet pas de répondre complètement sur l'origine du plomb dans le tronc, mais je pense qu'il entre plutôt par les racines : nous avons fait des travaux sur les entrées par voie atmosphérique du plomb dans l'arbre, qui ont montré que cette voie n'est pas majoritaire.

Yves Thiry (YT) - (2) On observe sur plusieurs sites une augmentation du rapport chlore/carbone dans le pool organochloré avec la profondeur mais on bute sur l'origine de cette accumulation de chlore par unité de carbone dans le pool organique. Selon certaines hypothèses, le chlore rendrait les molécules plus récalcitrantes pour la microflore (qui les trouverait moins à son goût) ; d'autres hypothèses disent que c'est l'accumulation de molécules particulières issues de la dégradation de la matière organique qui porte déjà ces éléments de chlore… J'ai posé la question à Jérôme Balesdent (INRA/CEREGE) qui m'a suggéré d'aller regarder vers les protéines, les acides aminés, etc., mais ça demanderait une analyse fine. La question reste ouverte.

Luc Libault, ONF, pôle RDI de Dole - À propos des échantillons, de leur analyse et de leur archivage, je m'interroge sur le temps de transfert entre la collecte et l'arrivée au laboratoire, et sur les quantités nécessaires : s'il y a de nouveaux éléments à prendre en compte sur les échantillons transmis, faut-il les augmenter, quels sont le poids, la quantité nécessaires pour les analyses ?

Jérôme Poulenard (JP) - On sait bien qu'en conservant l'échantillon on en perd une certaine fraction, notamment sur les polluants qui ont une fraction volatile non négligeable. Mais on a pu mesurer pour les HAP que cette perte est infime par rapport à la variabilité intra-site. C'est peut-être un problème pour d'autres polluants, mais en tout cas pour les HAP et à ce niveau-là ça ne l'est pas. La 2e question (taille des échantillons pour l'avenir) est difficile puisque, par définition, on ne sait pas ce qu'on pourrait avoir à utiliser. L'effort fondamental c'est l'échantillonnage : je crois qu'on a intérêt à en conserver ensuite une fraction significative, dans les conditions les plus soft *possibles ; c'est un investissement global pour l'avenir, mais je sais bien que ça a un coût et que ce n'est pas facile à gérer. Je pense aussi que cette question de conservation de l'échantillon – avec la base de données associée – concerne la communauté RENECOFOR et, au-delà, qu'elle traverse toutes les sciences de l'environnement : quand on prend un échantillon aujourd'hui, on a aussi une certaine responsabilité sur son archivage et sur la possibilité de le réutiliser demain.*

AP - RENECOFOR est un peu pionnier dans la conservation des échantillons collectés ; peu d'observatoires le font aujourd'hui. Un commentaire au passage : il faudrait changer de nom de la pédothèque, lui trouver un nom plus générique (écothèque ?) parce qu'elle ne conserve pas que des sols. Et effectivement la conservation c'est notre responsabilité. Aujourd'hui, le CNRS a par exemple engagé un programme pour amener les carottes de glace en Antarctique de façon à les protéger (et toute la mémoire qu'elles contiennent) vis-à-vis de la fonte, pour pouvoir revenir sur cette information. Mais la conservation soulève aussi des questions : les échantillons sont dûment séchés, conditionnés, etc. mais on n'est pas complètement dans des conditions non évolutives : on a parlé de volatilisation, mais est-ce qu'il y a une dégradation via les micro-organismes, par exemple, au niveau du sol ? Concrètement, je l'ai vécu sur les lichens avec la thèse de Yannick Agnan : en revenant sur les herbiers (parfaitement séchés), on a constaté qu'ils étaient moins denses que les lichens actuels. Des mesures au carbone 13 ont montré qu'il y avait un changement de signal, ce qui indique qu'il y a eu une dégradation de la matière organique de ces lichens ; c'est pour cela par exemple que je n'ai pas montré des concentrations dans les vieux lichens, mais des enrichissements relatifs par rapport à des éléments supposés conservatifs. Le problème vaut aussi pour les HAP : est-ce qu'on n'en a pas perdu un peu dans ce genre de processus ?

JP - C'est possible, puisque par définition on a fait des tests sur des situations simulées, mais on ne peut pas simuler 20 ans, même si on peut essayer d'accélérer les processus. Ceci dit, les archives naturelles (carottes de glace, carottes de sédiments lacustres ou marins) que nous utilisons pour essayer de reconstituer du passé, ont aussi leurs biais. L'archivage parfait n'existe pas. Ce n'est pas parfait dans la pédothèque mais ça ne l'est pas non plus dans la nature. L'important c'est de connaître les biais, de bien les appréhender.

Patrice Coddeville, IMT Lille-Douai - En France, les métaux ne sont pas la priorité des gens qui travaillent au niveau de l'atmosphère (entre autres parce qu'il n'y a pas de grosses émissions par rapport aux pays de l'Est, notamment), cependant on s'intéresse pas mal à leur impact au niveau sanitaire ; on essaie de calculer ce qu'on appelle la bio-accessibilité. Est-ce que, au niveau des sols, il y a des études sur la notion de biodisponibilité, sachant que la spéciation des métaux est assez importante ?

LG - De nombreux membres de la communauté des métaux travaillent sur la biodisponibilité dans les sols, souvent dans des sites contaminés. Mais notre travail sur les sites RENECOFOR est resté au niveau de la spéciation chimique, sans lien direct avec l'absorption par des organismes vivants. Il y a très peu de données sur des sites faiblement contaminés, mais je peux tout de même citer une étude assez récente aux USA, sur un réseau similaire à RENECOFOR : les auteurs ont étudié les teneurs en métaux directement dans les organismes de vers de terre, sans se poser la question de la forme du métal dans le sol, et les réponses sont très complexes ; la bioaccumulation dans les vers de terre dépend même des espèces. D'une façon générale, la teneur d'un métal dans un organisme du sol n'est pas directement liée à la teneur dans le sol, même si on affine avec les différentes formes chimiques, car il y a des effets complexes de la chaîne trophique et des voies d'alimentation des organismes. C'est donc un pan de recherche encore très ouvert.

YT - Il y a une volonté d'améliorer la connaissance de l'impact de la biodisponibilité sur les transferts. À ma connaissance, dès qu'on passe dans de la modélisation opérationnelle en prévision d'études d'impacts, il y a très peu d'éléments sur lesquels on peut se positionner en termes de biodisponibilité. Pour donner un exemple, à l'Andra on avait une question : faudrait-il adapter le facteur de transfert si on avait des rejets de sélénium 79 sous forme sélénite ou séléniate ? Nous avons simplement lancé quelques études pour vérifier quelle est la forme prédominante de sélénium dans les sols sur les longues échelles de temps : nous nous sommes penchés sur le sélénium géogénique (d'origine terrestre), et nous avons pu démontrer que seule la forme sélénite est prédominante, et ça nous a aidés à faire le choix du facteur de transfert. Ceci dit, il y a des tas d'éléments qui posent des questions assez fondamentales et qui vont faire l'objet de recherches encore longtemps. Mais il y a des verrous technologiques : pour des contaminations à bas niveau, en particulier, la détermination des espèces chimiques se heurte à l'impossibilité technique d'atteindre les niveaux suffisamment bas.

AP - Effectivement, comme on s'adresse à des concentrations très faibles, c'est déjà un challenge technologique d'arriver aux résultats qui ont été présentés. Pour la biodisponibilité, c'est encore pire : mesurer ces concentrations à très faibles doses et détecter des différences pertinentes, par exemple, c'est extrêmement difficile. On a quand même à EcoLab quelques résultats d'expérimentations orientées au départ sur les sols

agricoles : on administrait des métaux pour voir ce qu'ils devenaient dans le sol en fonction des types de sol, et ce qu'ils devenaient dans des organismes indicateurs comme les collemboles (invertébrés du sol sensibles à ces contaminations). On avait aussi un ou deux sols forestiers (dont EPC 87) comme référence, avec des teneurs en matières organiques et des pH qui étaient différents des sols agricoles. Ainsi, on a montré que dans un sol au pH basique, la contamination n'a pas forcément moins d'effet sur un organisme. Les métaux n'y sont pas en solution, contrairement à un sol acide, mais comme l'organisme ingère aussi des particules, le transit dans le tube digestif (milieu assez acide) peut remettre le métal en solution et le rendre disponible pour lui. Il y a des mécanismes complexes et on en est aujourd'hui au B A BA.

Patrice Coddeville - Je crois qu'on en est au même point au niveau sanitaire : le pH diffère selon les organes et on est confronté à la même problématique. Suivant qu'on considère l'estomac, le foie ou les poumons, on n'a pas du tout affaire au même milieu. Les questions sont tout à fait similaires, c'est pourquoi je pense qu'il faut s'orienter vers cette thématique. Les teneurs en métaux ne suffisent pas, il faut essayer d'aller plus loin. D'un point de vue instrumental et technologique, les évolutions vont aussi dans ce sens-là.

Olivier Daillant, Observatoire mycologique -Je ne sais pas ce qu'il en est invertébrés du sol mais j'ai suivi la question de la biodisponibilté pour les champignons. Le mycélium n'intègre pas ce qui est particulaire, mais uniquement ce qui est en solution et je pense que la disponibilité n'est pas du tout la même selon que le terrain est complètement sec ou saturé d'eau. D'où l'idée qui vient aussi de faire ces recherches en les rapportant non pas au poids sec du sol ou au poids sec des organismes mais à la teneur en eau du sol, ou bien de rapporter les résultats d'analyses en microgrammes par litre d'eau interstitielle.

LG - La base historique de la définition des charges critiques pour les métaux repose sur ce que vous dites : une concentration du métal dans la solution de sol, avec l'hypothèse que les ions libres dans la solution de sol sont a priori *les plus disponibles pour l'écosystème et potentiellement les plus dangereux. C'est bien cette hypothèse-là, hypothèse avérée pour les champignons, qui est prise en compte ; mais elle ne suffit pas pour l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème.*

François Lebourgeois, AgroParisTech Nancy - Est-ce qu'on détecte dans nos sols forestiers une pollution radioactive liée aux accidents de Tchernobyl et Fukushima. Y a-t-il eu des mesures ou pas ?

YT - Oui, on le détecte très facilement avec le césium 137, et pas que dans les sols forestiers. Après Tchernobyl, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) a édité des cartes très sérieuses et très bien faites sur les dépôts en césium 137 sur le territoire national. Je ne suis pas certain qu'il y ait eu à ce moment-là des prélèvements sous forêt, mais l'Andra a quelques chiffres qui démontrent que le césium 137 est également présent sous forêt. D'ailleurs on admet en général que l'écosystème forestier est un meilleur intercepteur de pollution de l'air et qu'il l'a donc été aussi pour le césium 137. Pour Fukushima, je pense que la pollution n'est pas parvenue jusqu'à nous, ou alors à des niveaux trop bas pour être mesurables.

JP - Pour notre part, nous nous servons de Tchernobyl pour dater nos sédiments de lacs, et c'est un marqueur qui marche partout en France. Cependant, le pic principal, c'est celui des essais nucléaires dans les années 1960 avec un maximum en 1963. Ce sont ces deux chronomètres qui nous permettent de dater très bien les sédiments récents.

AP - et comme c'est un analogue chimique du potassium, on peut se poser des questions.

Laurence Galsomiès, Ademe - Il y a aussi des données de césium 137 qui ont été acquises en forêt dans le cadre du réseau BRAMM (biosurveillance des retombées atmosphériques métalliques par analyses de mousses). C'est un dispositif qui s'appuie en partie sur les placettes RENECOFOR et qui était aussi financé par l'Ademe (il est géré aujourd'hui par le Muséum d'histoire naturelle, par Sébastien Leblond). Des mousses ont été prélevées dans ces placettes et des analyses de césium 137 ont été réalisées, avec l'université de Besançon, pour les campagnes 1996 et 2006. On a du mal à interpréter les résultats, parce qu'il y a des sites où les concentrations semblent augmenter dans le temps et on n'arrive pas à l'expliquer. Il n'y a donc pas eu de publication, mais les données existent et elles ne sont pas confidentielles.

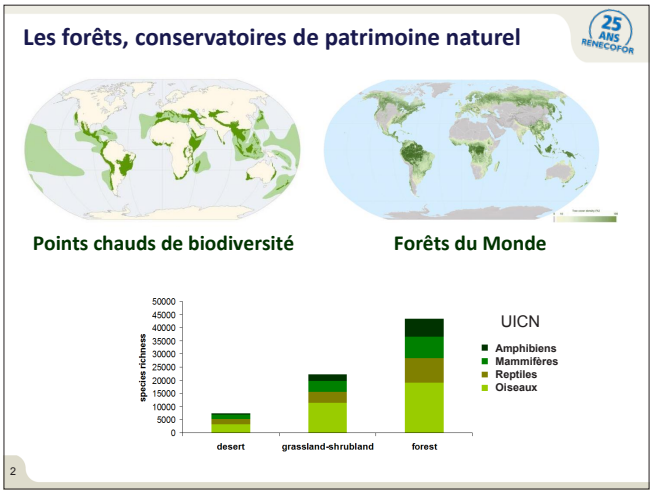
Photo : Luc Croisé, ONF

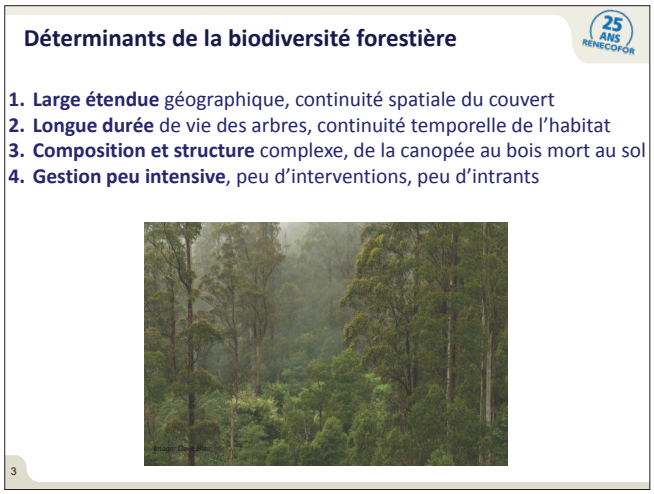
Les intervenants de la session : *A. Probst, J. Poulenard, L. Gandois, Y. Thiry*

SESSION 6 - ÉTUDE ET SUIVI DE LA BIODIVERSITÉ FORESTIÈRE

INTRODUCTION

Hervé Jactel
INRA, Unité Biodiversité Gènes et Communautés





Je vais devoir faire un peu différemment des précédents présidents de séance pour cette introduction, parce qu'il n'est guère possible de faire ici un panorama complet de ce qu'est la biodiversité en forêt.

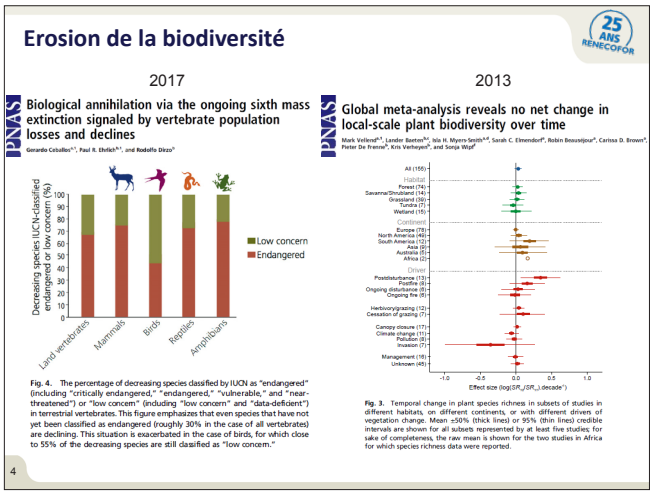
Je vais plutôt rappeler un certain nombre de principes, idées, connaissances pour susciter la réflexion et peut-être le débat en fin de session.

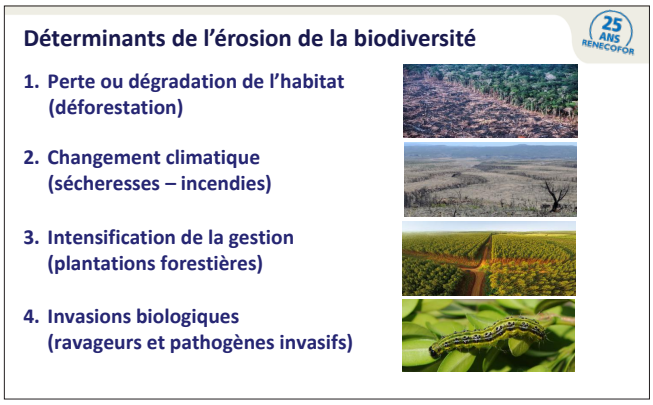
La biodiversité en forêt est considérable

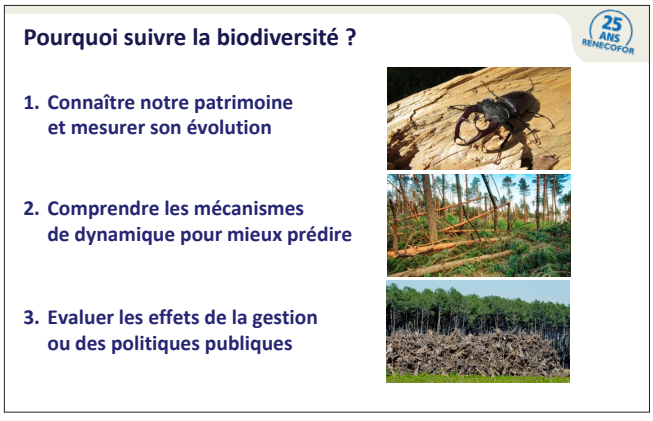
Chacun sait que la forêt a un rôle majeur dans la conservation des espèces sur terre. On considère que les écosystèmes forestiers sont ceux qui contiennent le plus de biodiversité terrestre et nous avons, en tant qu'écologues ou gestionnaires forestiers, une responsabilité majeure dans la conservation de ce patrimoine naturel. On voit ainsi sur ces cartes qu'il y a une assez bonne coïncidence entre la position de ce qu'on appelle les points chauds de biodiversité, c'est-à-dire là où il y a beaucoup d'espèces et où elles sont endémiques, et la position des grandes forêts dans le monde. Les forêts tropicales humides ont un rôle majeur mais les forêts méditerranéennes également. L'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature) montre aussi, notamment avec ces données sur les vertébrés, qu'il y a beaucoup plus d'espèces en forêt que dans les milieux herbacés ou les déserts.

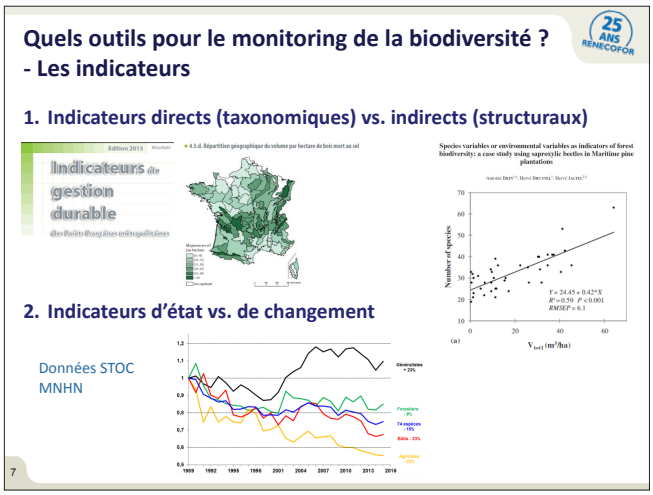
On sait assez bien ce qui explique cette plus grande biodiversité dans les forêts ; il y a en gros 4 grands déterminants. Elles sont étendues sur de grandes surfaces et peu fragmentées, ce qui permet la continuité de l'occupation des habitats par les espèces. Elles sont structurées par des espèces longévives et donc il y a une permanence de l'habitat et de la ressource qui permet le maintien de nombreuses espèces (vieillissement des arbres mais aussi ancienneté du couvert forestier). Leur complexité en termes de composition et de structure offre une multiplicité de niches écologiques que peuvent occuper les espèces, avec une stratification qui va de la canopée jusqu'à la grande diversité du matériau qu'est le bois mort (très important dans l'explication de la biodiversité forestière). Enfin c'est un écosystème géré de manière beaucoup moins intensive que les écosystèmes prairiaux et surtout agricoles ; moins perturbé, il offre des conditions plus favorables au maintien des espèces.

Cependant ces grands principes, qui permettent de distinguer la forêt des autres milieux naturels ou anthropisés, ne sont pas toujours applicables quand on compare les forêts entre elles. Et donc il y a toute une recherche importante à mener pour essayer de mieux comprendre les déterminants de la biodiversité des forêts françaises, et notamment celles que vous pouvez suivre dans le réseau RENECOFOR.









La biodiversité est un enjeu d'autant plus important que le patrimoine s'érode

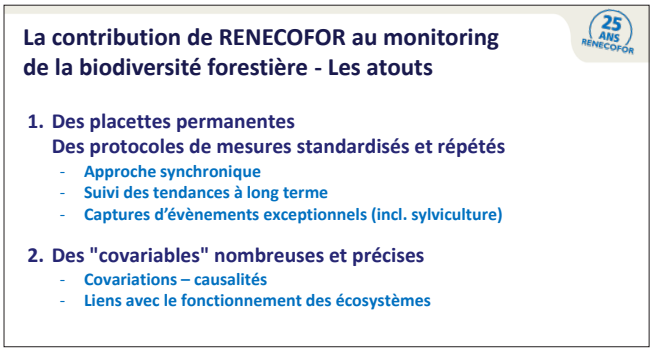
Parmi les grands enjeux problématiques pour l'équilibre des écosystèmes il y a, comme l'a rappelé Anne Probst (session 4), le changement climatique, les dépôts (azotés surtout) et l'érosion de la biodiversité que certains qualifient de 6e extinction de masse. Quand on regarde les chiffres et les groupes taxonomiques à l'échelle du globe, on voit (à gauche) qu'il y a un grand déclin des espèces de vertébrés mais aussi (à droite) que c'est beaucoup moins net pour les espèces de plantes. Donc cette érosion dépend peut-être du groupe taxonomique, de la façon dont on l'analyse et peut-être aussi de l'échelle à laquelle on la perçoit : est-ce qu'on observe la même érosion à l'échelle locale et notamment en forêt tempérée française ? C'est une question ouverte à laquelle le réseau RENECOFOR peut essayer de répondre.

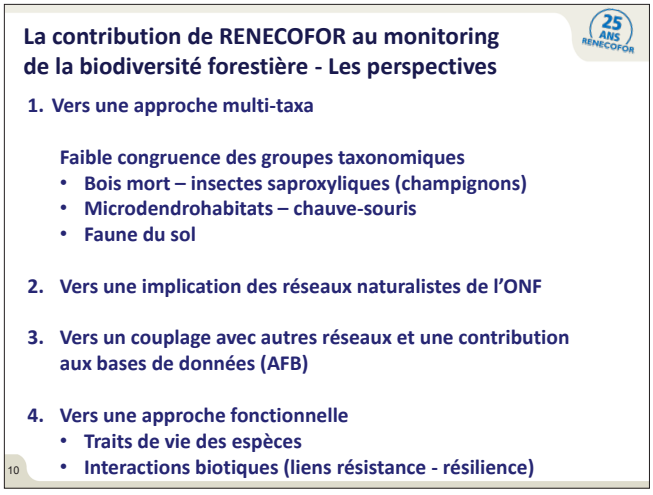
Là encore, les déterminants globaux de cette érosion, sont connus : c'est la perte ou la dégradation de l'habitat ; c'est aussi le changement climatique avec des changements d'aire, des problèmes d'inadéquation avec les conditions locales ; c'est encore l'intensification de la gestion (pour la forêt, passer des forêts semi-naturelles aux plantations) ; c'est enfin le problème émergent et drastique des invasions biologiques (cf. graphiose de l'orme, chalarose du frêne, cynips du châtaignier, etc.).
Quel est le poids relatif (et l'implication locale) de ces grands déterminants sur nos forêts tempérées françaises ? La dégradation de l'habitat n'est pas une question pertinente pour RENECOFOR, dont les placettes reflètent des forêts gérées et pérennes. Mais, il y a des données pour voir si l'éventuel impact du changement climatique sur la faune ou la flore (Jean-Luc Dupouey en parlera) ; il y a des interventions sylvicoles qui peuvent servir à tester la question de l'intensification de la gestion ; et je pense que certaines placettes RENECOFOR ont eu l'expérience de ravageurs ou pathogènes invasifs.

Pourquoi suivre la biodiversité ? et comment ?

Le suivi, c'est bien sûr pour connaître notre patrimoine et son évolution, mesurer les tendances qui renseignent sur le risque et le danger. C'est aussi pour comprendre les mécanismes, ce qui permet de prédire voire d'éviter la perte de biodiversité. Et enfin c'est pour évaluer les effets de la gestion ou des politiques publiques : quels sont, par exemple, les effets de la transition énergétique, de la demande de bois pour l'énergie, sur la biodiversité ? Il y a beaucoup trop d'espèces en forêt pour pouvoir les suivre individuellement et voir comment elles fluctuent dans le temps et dans l'espace. On doit donc utiliser des corrélations, c'est-à-dire des indicateurs, directs ou indirects.

Les indicateurs directs sont plutôt des espèces qui servent à prédire l'évolution des autres espèces. Les indirects sont plutôt des caractérisations structurelles ou de composition des forêts, qui sont corrélées avec la présence ou l'abondance ou la richesse spécifique. Les suivis taxonomiques étant assez compliqués, on a recourt surtout aux indicateurs indirects, notamment le volume ou la diversité du bois mort (cf. indicateur 4.5 de gestion durable des forêts françaises). On pourra s'interroger sur l'intérêt de mesurer aussi le bois mort sur les placettes RENECOFOR.
On distingue aussi indicateurs d'état et indicateurs de changement. Mais pour les indicateurs d'état, il faut une donnée absolue, ce qui est extrêmement difficile. Il est plus simple de voir une progression relative en termes d'abondance, comme le fait le Suivi temporel des oiseaux communs (STOC), qui montre notamment une érosion du nombre d'espèces d'oiseaux forestiers.





La contribution de RENECOFOR au monitoring de la biodiversité ?

Les atouts de RENECOFOR, c'est d'abord des placettes permanentes avec des protocoles de mesures standardisés, répétés dans le temps et de façon continue. Ça permet une approche synchronique ; on peut voir des indicateurs de changement, voir éventuellement des tendances à long terme. Et comme il s'y produit des événements exceptionnels type récolte ou tempête, on peut voir l'impact de ce genre de perturbation sur l'évolution de la biodiversité. Mais le plus original à mon sens, c'est qu'on y mesure un grand nombre de ce que j'appelle des covariables. Ça permet de tester des corrélations voire des relations de causalité entre structure, composition ou dynamique (gestion) et évolution de la biodiversité ; et aussi de voir le lien entre cette diversité et le fonctionnement de l'écosystème.

Trois exposés vont illustrer cela : Jean-Luc Dupouey parlera des suivis de la flore qui ont été réalisés dès l'origine sur le réseau RENECOFOR ; Benoît Richard présentera des informations sur les communautés de champignons, et Samuel Venner parlera de la dynamique des glandées et de ses effets sur la biodiversité.

Mais parlons d'abord des perspectives pour les suivis de biodiversité dont on a discuté lors d'un atelier de prospective sur l'avenir du réseau.

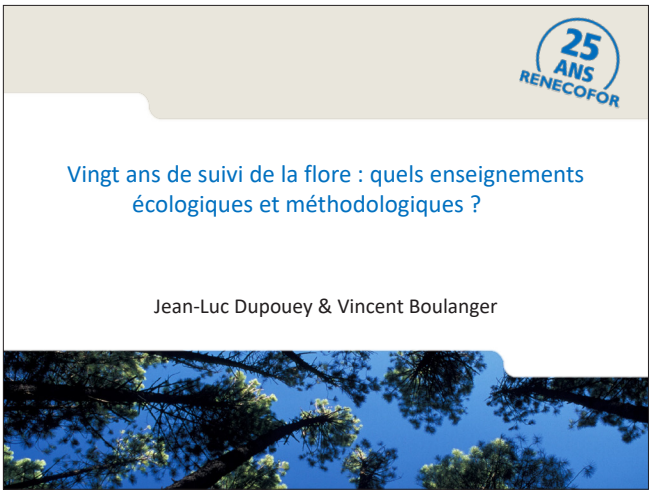
Première idée : les groupes taxonomiques suivis jusqu'ici sont essentiellement liés à la flore ; or il est difficile de faire une relation statistique entre la diversité de la flore et un certain nombre d'autres groupes (il y a peu de congruence en général entre les différents groupes taxonomiques). On peut imaginer de compléter en échantillonnant par exemple le bois mort et les insectes associés (insectes saproxyliques, notamment) ou les champignons liés au bois mort. De même, on pourrait s'intéresser aux chauves-souris, qui utilisent les microdendrohabitats (dont la valeur indicatrice est renseignée par un certain nombre de travaux), sans oublier la faune du sol dont on a aussi beaucoup à apprendre. Cela nécessite des spécialistes, et il faudrait voir comment les réseaux naturalistes de l'ONF pourraient être impliqués dans ces suivis de biodiversité.

Autre idée : l'Agence française pour la biodiversité va mettre en œuvre un programme d'acquisition et stockage de données sur la biodiversité, et RENECOFOR pourrait peut-être y contribuer. Enfin les travaux scientifiques montrent qu'au-delà de l'approche taxonomique descriptive, il serait intéressant d'avancer vers une approche plus fonctionnelle, via notamment des traits de vie, pour voir comment les espèces répondent aux éléments constitutifs de leur habitat mais aussi comment elles jouent sur le fonctionnement des écosystèmes.

La parole est maintenant aux intervenants.

VINGT ANS DE SUIVI DE LA FLORE : QUELS ENSEIGNEMENTS ÉCOLOGIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES ?

Jean-Luc Dupouey
INRA, UMR Silva



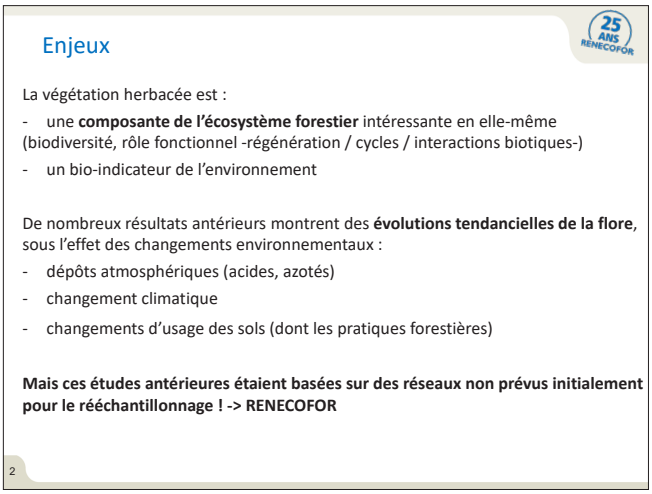


Photo : François Mouchot, ONF

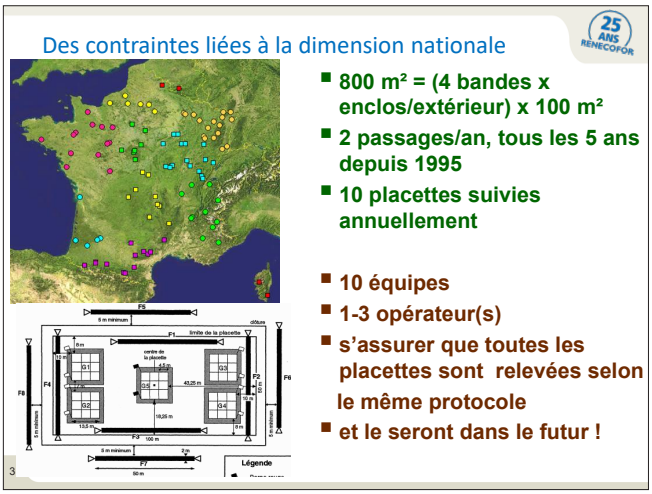
Cet exposé a été préparé avec Vincent Boulanger, qui a fait sa thèse dans notre équipe, à l'INRA, et travaille maintenant à l'ONF, au département recherche, sur le réseau RENECOFOR entre autres. Cette présentation commune est symbolique de la bonne connexion qu'on peut avoir entre la recherche et RENECOFOR. Il faut aussi rappeler que de nombreux scientifiques, techniciens et ingénieurs ont contribué aux suivis floristiques que je vais présenter. Ils sont associés aux publications qui utilisent ces données, et je les remercie chaleureusement. Les personnes impliquées dans le suivi floristique, en nombre croissant, sont en photo à la fin de cet exposé.

Je vais aborder deux aspects, la méthodologie des relevés d'une part et les évolutions tendancielles de la flore dans le réseau d'autre part.

Pourquoi s'intéresser à la flore ?

La végétation herbacée a un **double intérêt, pour elle-même et en tant que bioindicateur.**
C'est l'une des composantes les mieux connues de la biodiversité forestière, un pilier ancien de l'écologie qui reste encore aujourd'hui incontournable. Parmi les végétaux phanérogames, il y a en forêt beaucoup plus d'espèces herbacées (l'IFN* en a inventorié plus de 3000 présentes dans les forêts françaises) que d'espèces d'arbres (moins d'une centaine d'essences indigènes). La végétation herbacée joue un rôle fonctionnel évident lors des phases de régénération, en tant que concurrente des ligneux. Elle joue aussi un rôle fonctionnel important dans les peuplements ouverts, où elle peut contrôler jusqu'à 50% des flux d'eau ou d'éléments minéraux (par exemple, la part importante de la molinie dans l'évapotranspiration des pineraies, ou de la myrtille dans les flux de cations). C'est aussi un compartiment important pour les interactions biotiques : les réseaux d'interactions trophiques ou de facilitation, de compétition, etc. sont denses à l'intérieur de la strate herbacée, et pourtant presque totalement inconnus aujourd'hui. On a inventorié par exemple 69 espèces d'insectes herbivores qui se nourrissent sur l'alliaire pétiolée, une petite Brassicacée des bords de chemin. Mais cela n'a été étudié que parce que c'est une espèce devenue invasive aux USA, en vue d'une éventuelle lutte biologique. Sur l'immense majorité des êtres vivants du sous-bois, on ne connaît que très mal leur autécologie et encore moins bien leurs interactions.

D'autre part, la végétation herbacée est un bioindicateur, et l'idée de départ dans RENECOFOR était surtout de l'utiliser pour cela. Il y avait déjà eu à l'époque plusieurs publications sur les évolutions de la végétation, témoignant de l'eutrophisation ou de l'acidification des écosystèmes dues aux dépôts atmosphériques, mais c'était sur la base de dispositifs qui n'avaient pas été prévus initialement pour faire un suivi. D'où l'intérêt et l'enthousiasme, dès le départ, pour participer à ce projet conçu d'emblée pour suivre à long terme l'évolution de la flore avec un **cadre méthodologique pertinent**. RENECOFOR, c'était de ce point de vue une « première » méthodologique.



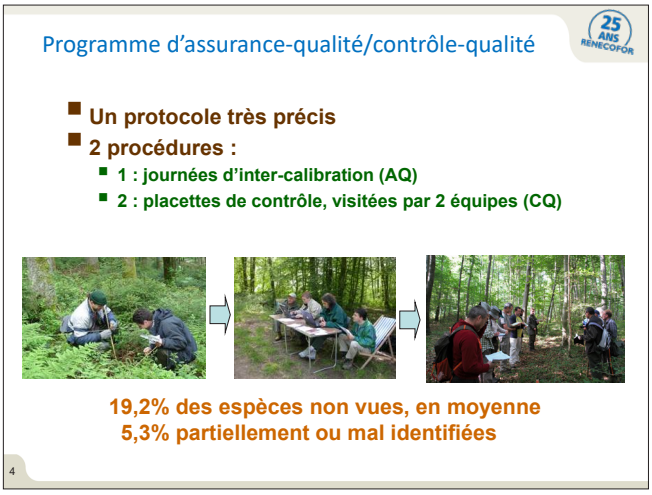


Photo : Patrick Behr, INRA

Comment opère-t-on ?

RENECOFOR, ce sont 102 placettes sur lesquelles l'ONF organise des campagnes de relevés de flore tous les 5 ans ; 10 de ces placettes sont suivies annuellement depuis le début (hormis quelques années après la tempête de 1999). Le relevé floristique se fait à deux, sur 100 m², le long de bandes de 50 m de long sur 2 m de large, ce qui est une forme très inhabituelle. L'idée est que deux personnes qui balayent chacune 1 m de largeur devant elles sont plus exhaustives que sur un cercle ou un carré de 400 m². Il y a 4 bandes à l'intérieur de l'enclos, mais aussi 4 bandes à l'extérieur (bonne précaution, comme on va le voir).

Le problème principal, comme dans tous les réseaux de grande taille, c'est qu'il faut plusieurs équipes d'observateurs : des gens différents qui observent en des lieux différents, donc des effets observateurs potentiels. RENECOFOR a fait faire un réel bond à la science de l'étude de la végétation pour la prise en compte de ce problème : faire en sorte de limiter et d'évaluer l'effet observateur.

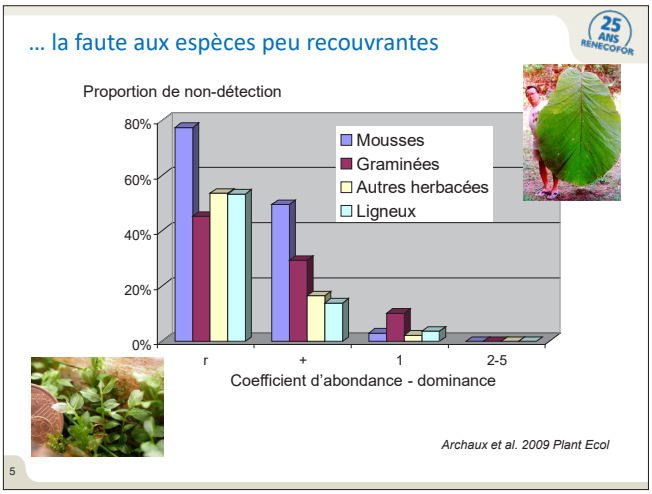
Prise en compte de l'effet observateur

Le plus souvent, on ignore les effets observateurs ; il y a peu de publications sur le sujet et les autres réseaux d'observation de la flore – Vigipl@nt au Muséum, le réseau BioSoil*, 16x16 ou DSF* (différents noms d'une même base d'échantillonnage), l'Inventaire forestier national… – n'ont pas (encore) fait d'étude des biais d'observation dans leur réseau. Or, nous allons voir que ces biais peuvent être importants. Dans RENECOFOR, on utilise deux approches pour l'étudier.

D'une part, on organise des journées d'inter-calibration qui réunissent tous les observateurs, tous les 5 ans, avant chaque campagne de relevés. Tous les observateurs inventorient les mêmes sites et, ce qui ne s'était jamais fait auparavant, reviennent le lendemain pour se mettre d'accord sur ce qu'ils ont vu, en faisant un relevé dit « consensus ». Auparavant, pour établir le « vrai » relevé, on fusionnait simplement les relevés de tous les observateurs. Or on peut très bien se tromper dans les identifications et noter des espèces qui n'existent pas en réalité, de sorte que la simple fusion conduit à un relevé trop « gros ». Avec le relevé consensus, les participants discutent pour se mettre finalement d'accord sur ce qu'il y avait dans les relevés. On peut donc pour la première fois évaluer précisément deux biais : le nombre d'espèces manquées et celles qui ont été mal identifiées.

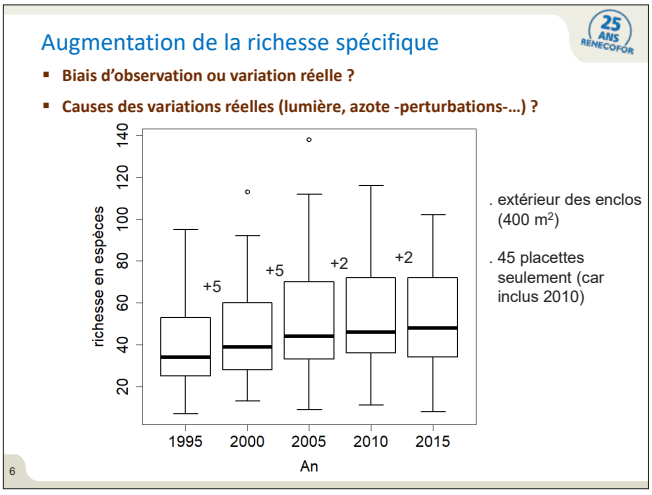
D'autre part, au cours de la campagne, chaque équipe visite une placette d'une autre équipe (dans la même semaine) et sans échanger d'information. On peut comparer leurs relevés.

L'analyse des relevés d'inter-calibration montre qu'il y a assez peu d'espèces mal identifiées (5% tout de même), mais qu'il y a en moyenne beaucoup d'espèces non vues, près de 20%. Et ce taux est très variable : suivant les gens, le taux d'espèces détectées varie de 50% (pour des personnes encore peu expérimentées par exemple) à 90% pour des observateurs exceptionnels ou chevronnés.

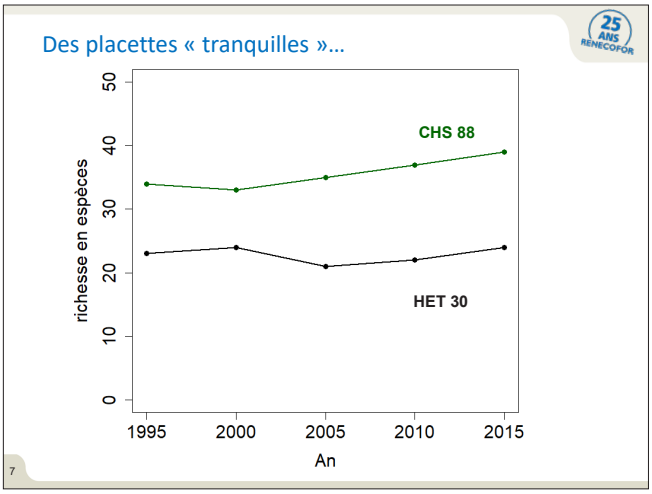


On a pu analyser ces données sous différents angles (article de Frédéric Archaux *et al.*, publié en 2009) et modéliser le taux de non-détection. Ce graphique, par exemple, montre comment varie le taux de non-détection des espèces selon leur coefficient d'abondance-dominance. À gauche, on a des espèces qui ne sont présentes dans le relevé qu'avec de rares individus (coefficient "rare"), et le taux de non-détection est alors élevé, surtout pour les mousses ; à droite, pour les espèces localement abondantes, il n'y a pas d'espèces manquées. Il y a aussi un lien avec la taille de l'espèce, les plus grandes étant plus facilement détectées, et avec le nombre de passages sur un relevé dans l'année. La probabilité de détection d'une espèce augmente avec le nombre de passages, ce qui est normal, et de façon assez sensible : pour les espèces les mieux vues par exemple, la probabilité de détection est de 80% pour 1 passage, et de 95% pour 2 passages. En passant une seule fois, on rate beaucoup d'espèces. Or beaucoup de rééchantillonnages, hors RENECOFOR, ne se font qu'avec un seul passage par an.

Évolutions tendancielles ?

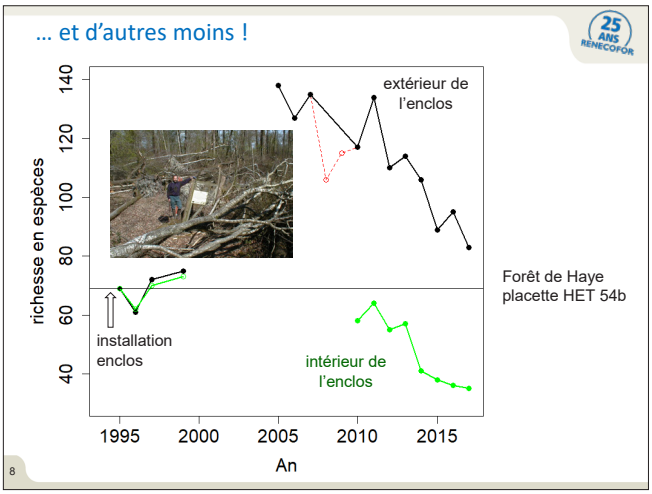


Après ces aspects méthodologiques, voyons quelques résultats sur les variations à long terme observées au sein de RENECOFOR. En voici un sur la richesse en espèces : le nombre moyen d'espèces vues, par année et à l'extérieur de l'enclos, en moyenne sur 45 sites. Le graphique est clair : la richesse augmente. Cela rejoint un résultat de méta-analyse évoqué par Hervé Jactel où, à l'échelle internationale, quand on cumule un grand nombre de réseaux et de relevés, on observe dans beaucoup de cas une augmentation du nombre d'espèces. Mais si l'on y regarde de plus près, on constate que l'augmentation a été plus rapide au départ et tend à ralentir. Quand on s'intéresse non plus au nombre moyen d'espèces observées chaque année mais au nombre d'espèces cumulé depuis le début (non montré ici), on voit qu'il augmente très vite au départ, pendant les 5 premières années, puis qu'il augmente toujours, mais plus lentement, pendant les 15 années suivantes. Cela peut être le fait qu'il y a une phase « d'habituation », de connaissance de la placette par les observateurs, au cours de laquelle l'exhaustivité augmente rapidement, puis qu'on atteint ensuite un plateau où, cette fois, apparaissent des variations « réelles », dont la cause n'est pas méthodologique. Cet effet se superpose aux effets des perturbations telles que la tempête de 1999, ou des coupes, qui tendent à augmenter de façon plus ou moins transitoire la richesse en espèces.



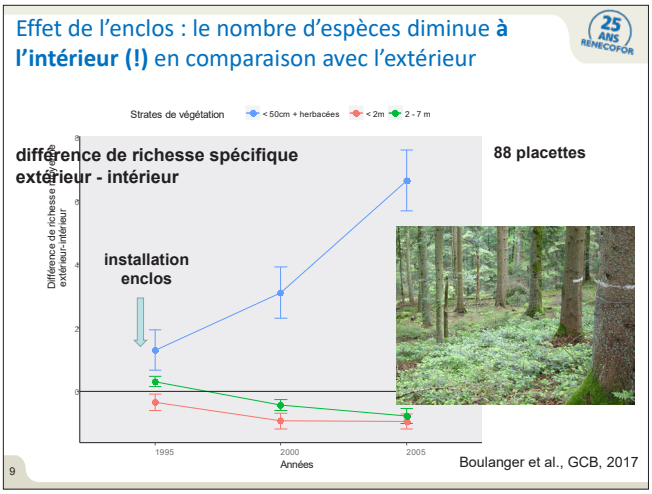
En 2010, il n'y a pas pu y avoir de financement pour les inventaires floristiques : on a travaillé sur une base volontaire et les relevés n'ont pu être faits que sur un peu moins de la moitié des placettes. En 2015 les relevés ont été faits normalement mais, compte tenu du temps de vérification, préparation, etc., les données ne sont disponibles que depuis une quinzaine de jours. Les seules données qui ont fait l'objet d'analyse approfondie sont donc celles de 1995-2000-2005. Je présenterai deux nouveaux résultats concernant ces données, l'un sur les effets des ongulés sauvages, l'autre sur la bioindication.

Certaines placettes, comme CHS 88 ou HET 30 ci-contre ne montrent pas de variations significatives de leur richesse ou composition au cours du temps, mais d'autres changent de façon assez extraordinaire…

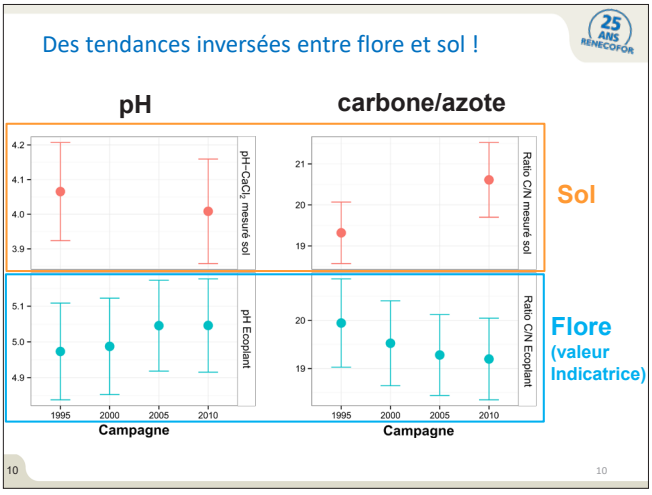


…comme typiquement les placettes victimes de la tempête de 1999. Sur HET 54b par exemple, on avait 70 espèces en moyenne à l'extérieur de l'enclos (courbe noire) ; la tempête passe et, 5 ans après, en 2004, on trouve 140 espèces, puis la richesse diminue rapidement : une grosse perturbation amène de la lumière, l'azote est minéralisé, donc il y a une explosion d'espèces héliophiles et nitrophiles, puis le peuplement commence à se refermer et la richesse diminue. En rouge sont représentées deux années où, pour des problèmes de charge de travail, nous ne sommes passés qu'une seule fois au lieu de deux : on retrouve immédiatement le biais de non-exhaustivité signalé précédemment.

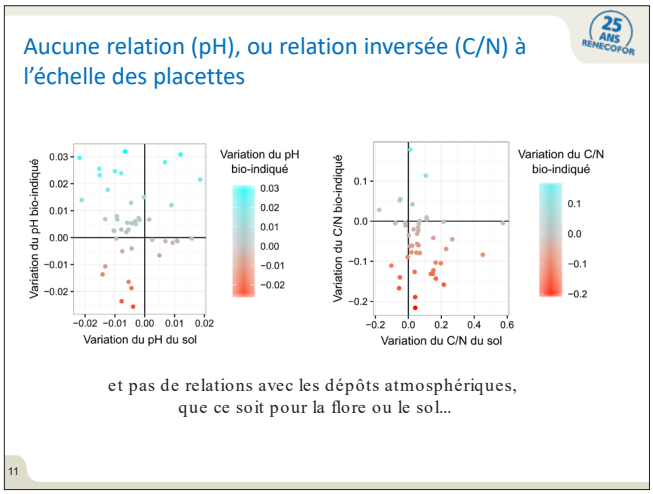
À l'intérieur du grillage (courbe verte), le nombre d'espèces est le même au départ ; au bout de 3-4 ans il est très légèrement inférieur. Mais quelques années après la tempête (quand on a enfin pu pénétrer), on se retrouve avec beaucoup moins d'espèces qu'en-dehors du grillage, et leur nombre décroît encore plus rapidement.

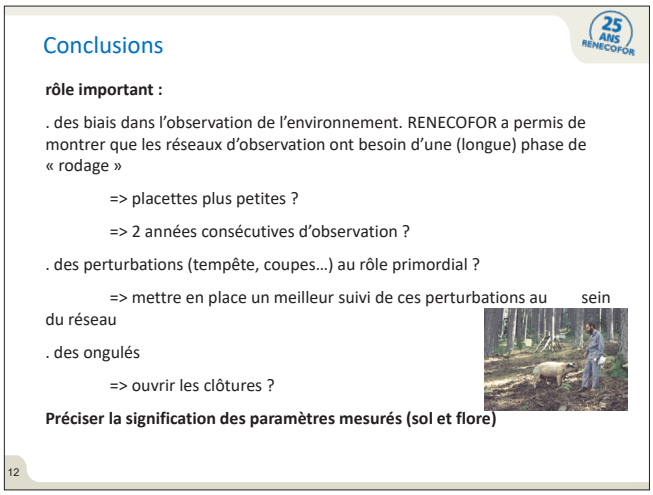


Que se passe-t-il ? Nous avons regardé sur l'ensemble du réseau quelle était, au cours du temps, la différence de richesse spécifique entre l'extérieur et l'intérieur de l'enclos. Le résultat tient dans ce graphique : quand c'est positif, c'est que la progression du nombre d'espèces est plus forte à l'extérieur ; en bleu la strate herbacée (< 50 cm), en rose la strate arbustive basse (< 2m) et en vert la strate arbustive haute (2-7m). On constate une augmentation rapide du nombre d'espèces à l'extérieur, par rapport à l'intérieur. Je dis bien : plus rapide à l'extérieur, là où il y a des ongulés. Pourquoi ? La première réponse est sur la photo. Dans l'enclos, un recrû ligneux s'installe, soit ligneux d'intérêt, soit souvent de la ronce : ce couvert réduit la lumière au sol, induisant une forte contrainte pour les espèces herbacées à l'intérieur de l'enclos.
On a aussi observé (non montré) une différence croissante du caractère nitrophile de la végétation, avec des espèces plus nitrophiles à l'extérieur qu'à l'intérieur. Cela peut encore être lié au niveau de lumière, mais aussi aux déjections animales, ou au piétinement, qui favorisent, là encore, la minéralisation et les espèces nitrophiles. La plus grande richesse spécifique à l'extérieur de l'enclos est donc au profit d'espèces plutôt héliophiles, nitrophiles, à tendance rudérale et plutôt non forestières.
Les enclos RENECOFOR constituent l'une des expériences à plus large échelle qui ait été faite, en termes de nombre de répétitions, sur l'impact des ongulés et l'un des résultats majeurs est que la biodiversité végétale de la forêt française est fortement modelée par les ongulés. Ces travaux viennent d'être publiés dans *Global Change Biology*.



Autre résultat nouveau, peut-être un peu dérangeant, c'est l'évolution tendancielle des valeurs bioindicatrices de la flore pour les paramètres du sol. Je présente en haut les résultats de la mesure directe de la chimie des sols et en bas (en bleu) les résultats issus de la bioindication par la flore ; à gauche ce qui concerne le pH, à droite ce qui a trait à la nutrition azotée. À partir des valeurs indicatrices de la flore (ici, celles d'EcoPlant*), on observe une progression des espèces neutrophiles, c'est-à-dire indicatrices de pH plus élevés ; et une progression des espèces nitrophiles, avec une baisse de la valeur indicatrice du rapport carbone/azote (C/N), qui suggère une augmentation de la disponibilité en azote dans les sols. Or, on observe exactement l'inverse dans les mesures directes de la chimie des sols, avec le pH qui a tendance à diminuer tandis que le C/N a tendance à augmenter. À l'échelle de l'ensemble du réseau, la flore montre une tendance inverse de celle qu'on observe dans les sols !





À l'échelle de la placette c'est la même chose, mais je ne vais commenter que les résultats concernant les variations du rapport C/N, sur la figure de droite. Elle montre la relation placette par placette entre la variation du C/N du sol et la variation bioindiquée par la végétation : au lieu de la droite d'égalité attendue, sur la diagonale 1:1, les points sont dispersés, principalement dans le cadran inférieur droit. Il n'y a donc aucune relation, même à l'échelle placette, entre les variations du rapport C/N mesuré et bioindiqué. Cette absence, voire inversion de la relation peut avoir diverses causes : décalage temporel entre variations du sol et de la végétation, mauvaise appréciation du paramètre réellement bioindiqué par la flore, inadéquation du rapport C/N pour qualifier la disponibilité en azote pour les plantes…

Ce résultat étonnant ne doit pas cacher le fait qu'on observe une augmentation de la présence des espèces neutrophiles et nitrophiles, qui pourrait s'expliquer par un effet des dépôts atmosphériques azotés, ou par une augmentation du rythme et du niveau des perturbations dans les placettes RENECOFOR.

Conclusions et point de vue

L'un des intérêts du suivi de la flore dans RENECOFOR, c'est de nous avoir appris à mieux maîtriser les biais dans l'observation de la biodiversité floristique, et plus généralement dans l'observation de l'environnement. Il y a probablement une période de rodage assez longue dans tous les réseaux de suivi de la biodiversité avant de pouvoir interpréter les évolutions comme indiquant de réels changements de l'environnement. Et cette difficulté ne concerne pas que RENECOFOR. Pour pallier à ce problème, il faudrait essayer de passer plusieurs années consécutives. Deux années consécutives d'observation tous les 10 ans seraient peut-être plus adéquates qu'une année tous les 5 ans.

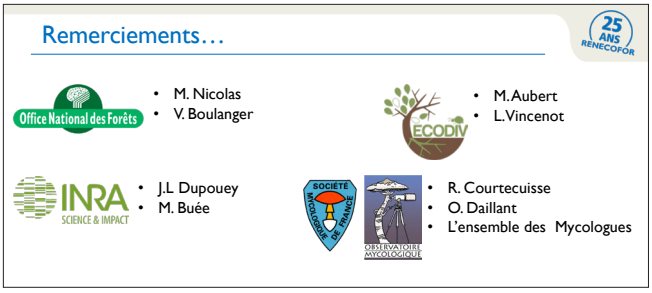
Concernant le rôle significatif des ongulés mis en évidence, il va peut-être falloir ouvrir les grillages des placettes parce qu'à l'intérieur de l'enclos (où se font la majorité des observations du réseau), ce n'est, petit à petit, plus la même forêt qu'à l'extérieur : ce ne sont plus les mêmes espèces, ce n'est plus le même fonctionnement.

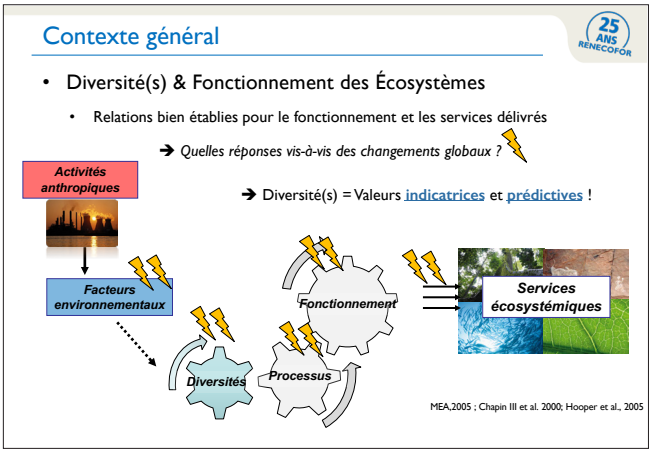
Et puis, pour ne pas se battre entre bioindicateurs et analyses de sols, il nous faut réfléchir à ce que signifient les mesures de pH et du rapport C/N pour la végétation, et à ce que signifient des valeurs bioindiquées de la végétation par rapport au sol.

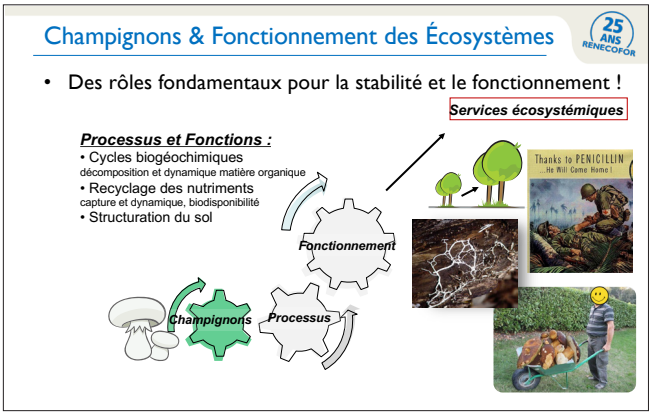
D'autre part, il y a un rôle important des perturbations, qui à mon sens n'est pas encore assez pris en considération, tout comme les effets du vieillissement des peuplements. La session 3 a montré par exemple que l'augmentation du stock de carbone est en partie liée à l'âge. C'est une difficulté qui a été soulevée dès les débuts du réseau : comment prendre en compte, contrôler ou éliminer dans les suivis à long terme les effets du vieillissement et des perturbations locales ou ponctuelles, afin de détecter les effets des changements environnementaux plus globaux ? Il faut au minimum et le mieux possible documenter les perturbations qui peuvent l'être, comme les coupes. Quant à l'âge, on pourrait installer des chronoséquences en appui aux réseaux pour caractériser les effets du vieillissement des peuplements. Ce problème montre que les réseaux de suivi devront être **maintenus à très long terme, sur plusieurs révolutions forestières**, afin de pouvoir comparer le fonctionnement des écosystèmes au même âge, au même endroit, mais lors de siècles différents et ainsi discriminer le conjoncturel du tendanciel. Nous avons reçu en legs quelques rares placettes expérimentales de sylviculture, du début du 20e siècle. Sachons léguer au moins aussi bien à nos successeurs !

COMMENT VARIENT LES COMMUNAUTÉS D'ESPÈCES DE CHAMPIGNONS ?

Benoît Richard
Université de Rouen, Unité Etude et Compréhension de la Biodiversité (Ecodiv)







Merci de m'avoir invité à présenter quelques résultats sur les champignons ; résultats d'une initiative « pionnière » voulue par l'ONF (RENECOFOR) et menée avec le laboratoire Ecodiv de l'université de Rouen et l'INRA Nancy, en partenariat avec l'Observatoire mycologique et la Société mycologique de France.

Je remercie d'emblée toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

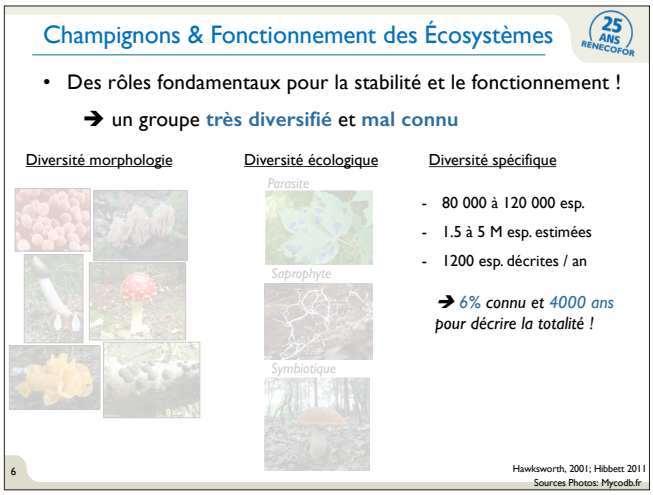
Cette étude s'inscrit dans un contexte général

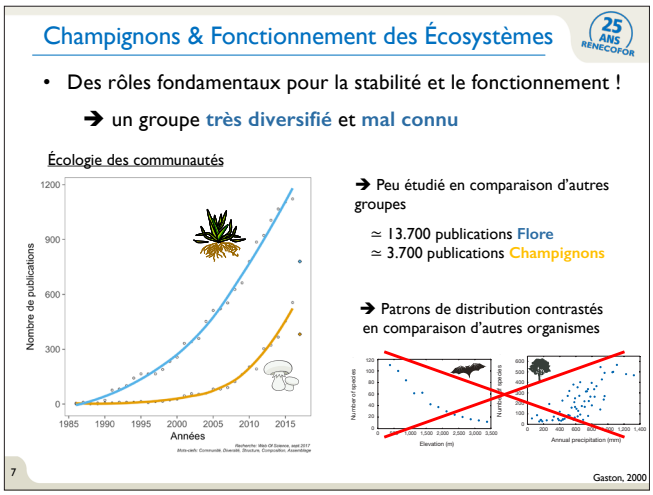
La biodiversité a un lien direct avec le fonctionnement des écosystèmes, c'est une relation qui est bien établie depuis une quinzaine d'années maintenant. La diversité pilote un certain nombre de processus et de fonctionnements qui eux-mêmes ont un lien direct avec la fourniture de services écosystémiques dont les sociétés humaines peuvent tirer bénéfice. La grande question actuellement, c'est d'anticiper ce que vont être les réponses de la diversité vis-à-vis des changements globaux et, en sous-jacent, les effets sur le fonctionnement des écosystèmes. Les activités anthropiques agissent sur les facteurs environnementaux qui eux-mêmes influent sur la diversité et ainsi de suite : processus, fonctionnement et services écosystémiques. Dans ces circonstances, la diversité a une réelle valeur indicatrice et prédictive vis-à-vis de ces changements.

Faisons un focus sur les champignons : ils font partie des micro-organismes, ce sont des acteurs fondamentaux du sol, ils sont présents dans la plupart des écosystèmes et ils y tiennent un rôle essentiel pour la stabilité et le fonctionnement.

Prenons les processus et fonctions-clés : les champignons interviennent dans les cycles biogéochimiques en participant à la dynamique de la matière organique (décomposition notamment) ; ils interviennent dans le recyclage des nutriments, leur remise à disposition vis-à-vis des autres organismes ; ils ont aussi un rôle dans la structuration des sols et j'en passe. De ces fonctions découlent des services écosystémiques comme la production de bois, la régulation des pathogènes (cf. la pénicilline), ou encore des services récréatifs voire alimentaires pour certains…

Photo : Luc Croisé, ONF





Les champignons : groupe fondamental, divers, et méconnu

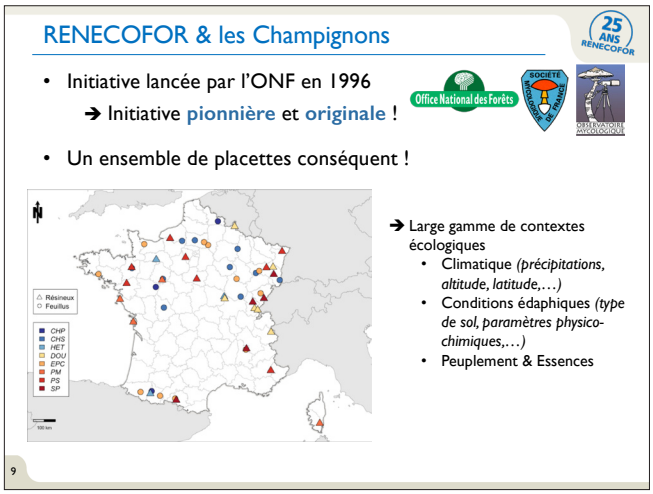
Les champignons ont donc un rôle fondamental dans l'écosystème, mais paradoxalement c'est un groupe qui est assez mal connu. La cause principale, c'est que c'est un groupe extrêmement diversifié.
Diversité de morphologie : ça va des champignons microscopiques, unicellulaires, à des formes spectaculaires ou plus familières, voire suggestives, avec un sporocarpe (l'appareil de fructification du champignon) à pied et chapeau.
Diversité des modes de vie, aussi, ou diversité écologique, avec des champignons qui parasitent d'autres organismes, des champignons qui se nourrissent de la décomposition (des saprophytes) et également des champignons symbiotiques qui vivent en association avec d'autres organismes.
Diversité spécifique ou taxonomique, enfin : il y aurait environ 80 000 à 120 000 espèces décrites à ce jour pour un total estimé de 1,5 à 5 millions d'espèces, avec un taux actuel de description de l'ordre de 1 200 espèces nouvelles décrites par an (surtout grâce aux méthodes taxonomiques moléculaires qui apportent une grande résolution). Autrement dit nous ne connaitrions que 6% environ de la diversité des champignons et, au rythme actuel, il nous faudrait 4 000 ans pour la décrire en totalité. Patience…

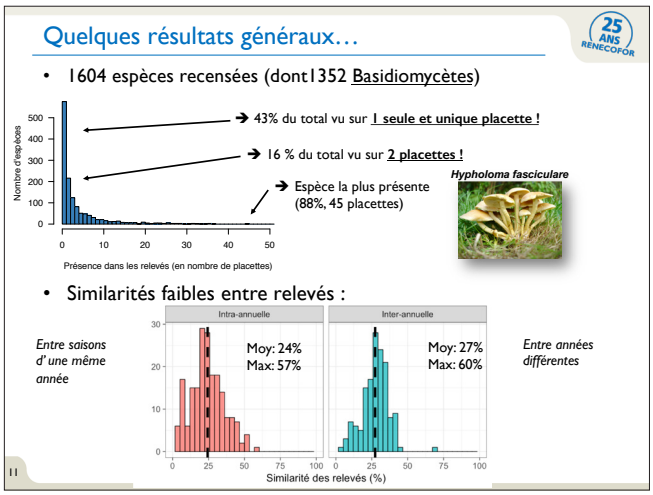
Les champignons sont mal connus aussi en termes d'écologie des communautés. J'ai essayé de comparer le nombre de publications annuelles relatives à l'écologie des communautés pour la flore, d'une part, et les champignons, d'autre part, en faisant une recherche avec une combinaison de mots clés dans les bases de données scientifiques, sans faire de distinction entre « petits papiers » et « gros papiers ». Ce qu'on observe (graphique de gauche), c'est que depuis 1985, il y a eu environ 14 000 publications relatives à l'écologie des communautés pour la flore, alors que dans le même temps il n'y en a eu que 4 000 environ pour les champignons, avec une nette amélioration depuis les années 2000, grâce notamment aux techniques moléculaires.

Autre chose : les patrons de distribution des micro-organismes tels que les champignons contrastent souvent avec ce qui est bien établi chez d'autres organismes, notamment les relations entre le nombre d'espèces et certaines variables environnementales comme l'altitude ou encore les précipitations annuelles.

RENECOFOR et les champignons - Méthode

Dans sa volonté de compléter les mesures sur les placettes, l'ONF a initié en 1996 un partenariat avec la Société mycologique de France et l'Observatoire mycologique, pour l'inventaire des champignons. C'est une initiative qu'on peut qualifier de pionnière et originale, au sens où elle signe une démarche inédite –et forcément très exploratoire– pour ce groupe méconnu. Ainsi deux campagnes d'inventaire ont eu lieu. Un premier test a été fait sur 12 placettes entre 1996 et 1998 et a fait l'objet d'une publication (analyse méthodologique et statistique) dans la série des « livres jaunes » de RENECOFOR en 2002. Sur cette base, la campagne d'inventaire a été reconduite entre 2003 et 2007 sur un groupe de placettes plus étendu, soit sur 45 autres placettes. Au final, 57 placettes ont donc fait l'objet d'inventaires mycologiques impliquant 58 mycologues pour un total de 765 inventaires (cf. méthode ; j'y reviens).



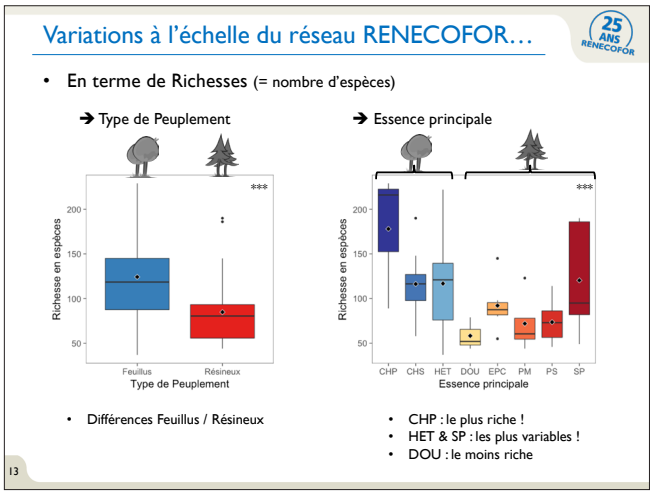


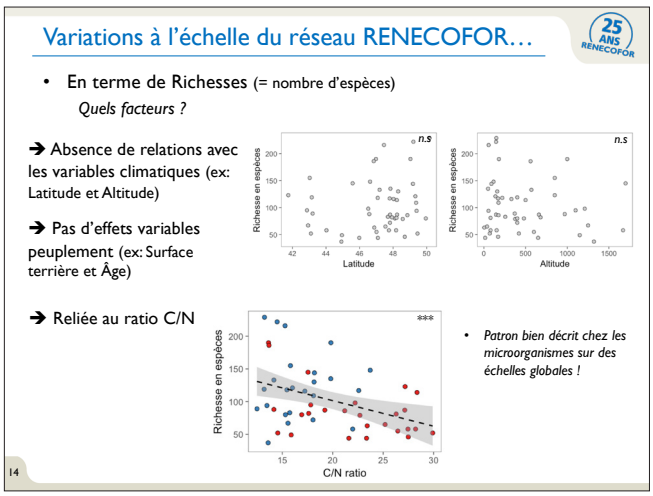
Cela ne concerne donc pas toutes les placettes du réseau, bien sûr, mais ça constitue un ensemble conséquent, qui permet notamment de croiser les relevés mycologiques avec les données d'autres variables mesurées dans le réseau RENECOFOR. On peut ainsi tester des hypothèses (écologie des communautés) dans de larges gammes de contextes écologiques, climatiques, biogéographiques, édaphiques et surtout de peuplements et d'essences.

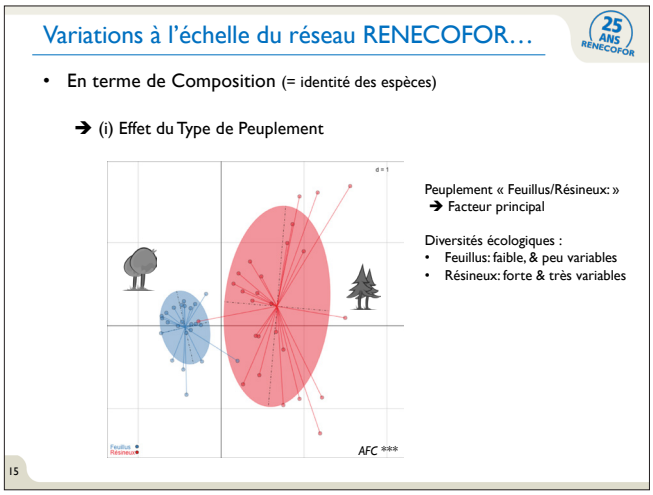
La méthode d'inventaire se base surtout sur l'observation macroscopique des champignons au niveau de leur appareil de fructification. Je rappelle que l'appareil de fructification n'est pas l'élément de base du champignon (c'est le mycélium) et qu'il est généralement éphémère : selon les espèces, sa durée va de quelques heures à quelques semaines, sauf chez les espèces dites pérennes. Pour faire face à cette difficulté les échantillonnages ont été répétés plusieurs fois avec un minimum de 12 visites sur 3 années consécutives (soit 4 visites par an). Les inventaires ont surtout porté sur les basidiomycètes et des ascomycètes, deux groupes principaux de champignons.
À l'issue des inventaires, on s'est d'abord heurté, pour la saisie des données, à l'absence de référentiel taxonomique (ça a été corrigé depuis, grâce notamment à un gros travail de Régis Courtecuisse). Du coup, les relevés effectués sur RENECOFOR, ont nécessité un long travail de mise en forme des données, réalisé par Jean-Luc Dupouey entre 2005 et 2012, et la phase d'analyse a commencé seulement en janvier 2014 dans le cadre d'un post-doc ONF/Université de Rouen.

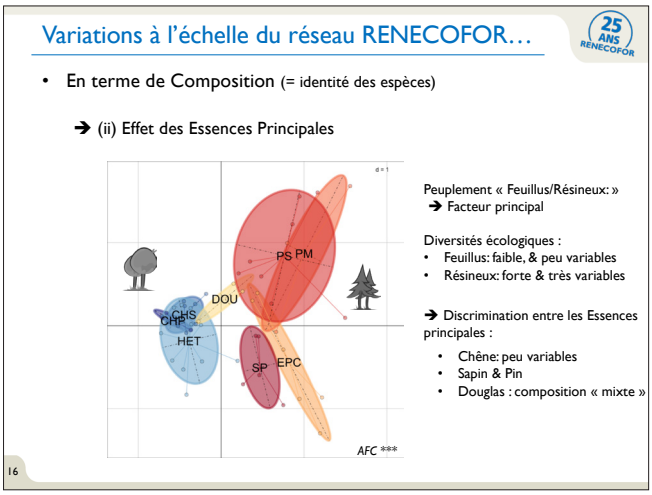
Quelques résultats généraux

Les résultats de cette première analyse sont très descriptifs, pas du tout mécanistiques. Je vais commencer par deux résultats qui illustrent bien le fait que les champignons sont un groupe difficile.
Sur l'ensemble des inventaires, on a une diversité totale de 1 600 espèces environ, dont 1 300 environ chez les basidiomycètes, le groupe le mieux décrit et le plus souvent rencontré par les mycologues. Ce qui est assez frappant, c'est d'abord la distribution très déséquilibrée du nombre d'espèces en fonction de leur présence dans les placettes. On constate que 43% de ces 1 600 espèces n'ont été vues que sur une seule et unique placette, ce qui est assez important, et que 16% des espèces ont été vues sur deux placettes ; l'espèce la plus présente a été vue sur 45 placettes, soit 88% des placettes finalement retenues pour l'analyse (cf. fréquence minimale des relevés et disponibilité des données environnementales).
L'autre résultat frappant concerne la similarité des relevés, c'est-à-dire le % d'espèces communes entre répétitions de relevés. La similarité varie de 0 à 100. Le calcul a été fait entre les différentes saisons d'une même année (graphe de gauche) et entre les années d'échantillonnage, toutes saisons confondues (graphe de droite). Ce qui ressort de ces histogrammes de distribution des valeurs, c'est par exemple que d'une saison à l'autre, sur une placette donnée, on peut retrouver entre 0 et 57% d'espèces identiques (en abscisse), avec une moyenne de 24%. La similarité moyenne intra-année est donc de 24% et elle est de 27% pour l'inter-années, ce qui est relativement faible et signifie qu'au contraire les trois quarts des espèces sont des espèces qu'on voit peu souvent.





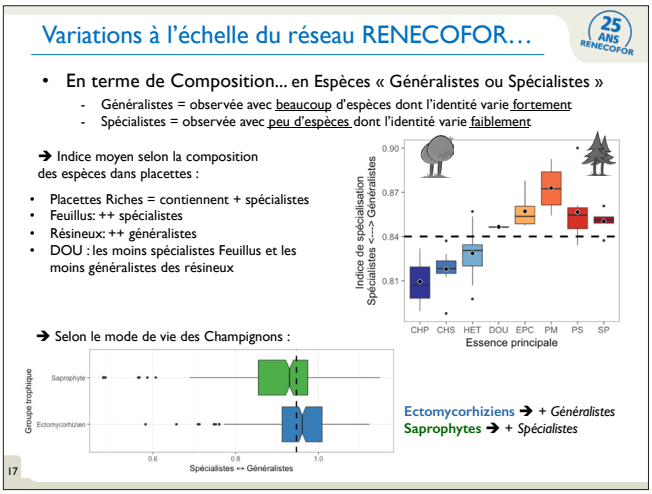


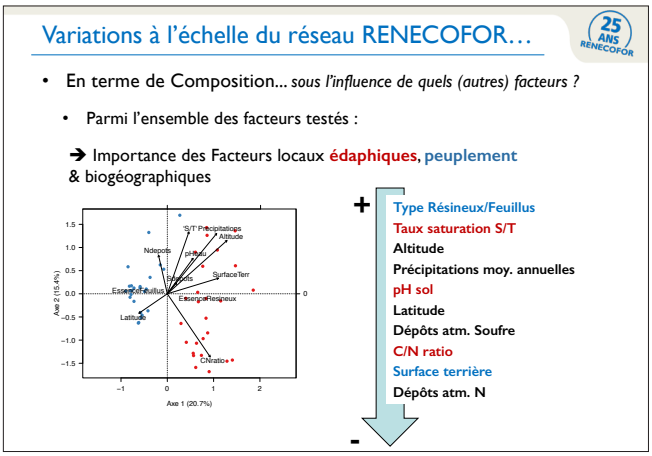


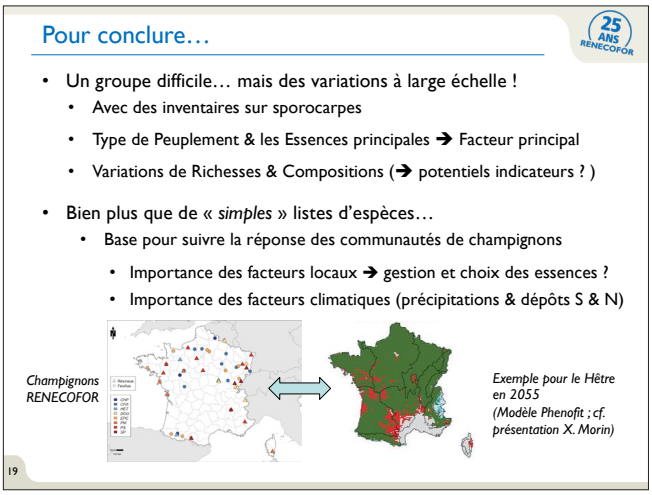
Malgré ces deux résultats assez décourageants, on arrive à détecter des patrons de variations à l'échelle du réseau RENECOFOR en prenant la totalité des placettes. En termes de **richesse spécifique**, tout d'abord. Pour commencer, nous avons tout bêtement cherché s'il y a une différence selon le type de peuplement, résineux ou feuillu, et on observe que la richesse en espèces est plus importante chez les feuillus (en bleu) que chez les résineux (en rouge).
En zoomant un peu plus, on peut voir des différences selon l'essence principale, avec des variations qui diffèrent d'une espèce à l'autre. Par exemple, le chêne pédonculé est celui qui abrite la plus grande richesse en espèces de champignons alors que le hêtre ou le sapin pectiné présentent les richesses les plus variables. Noter que c'est le Douglas qui abrite la plus faible diversité.

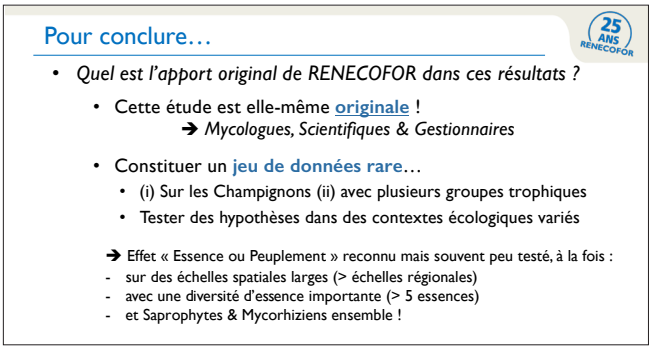
Ensuite nous avons cherché quels étaient les facteurs environnementaux susceptibles d'influencer cette richesse. Le premier constat, c'est l'absence de relations avec les variables climatiques ou biogéographiques, contrairement à ce qu'on observe traditionnellement chez d'autres groupes. Ici, pas de relation avec la latitude ou l'altitude, ni avec les variables de peuplement comme la surface terrière et l'âge. Toutefois, on observe une relation avec le C/N (graphe du bas) : la richesse en espèces de champignons diminue quand le rapport C/N augmente dans les sols. C'est un patron qui est assez bien décrit chez les micro-organismes à des échelles un peu plus larges.

Maintenant si on s'intéresse plutôt à la **composition en espèces**, c'est-à-dire à leur identité dans les communautés, on observe également un effet du type de peuplement. Pour ceux qui ne sont pas familiers de ce type de représentation, sachez que les points représentent les placettes et que leurs positions relatives correspondent à leur composition en champignons. La taille des ellipses représente la variabilité en espèces dans ces placettes. Donc ici on discrimine relativement bien les peuplements de feuillus et de résineux sur la base de leur composition en champignons, avec des diversités relativement peu variables sous feuillus et plus importantes sous résineux.
Là encore, si on zoome, on discrimine assez bien les essences principales : le chêne avec des compositions très peu variables, contrairement aux pins et même au sapin, et le Douglas au centre, en position intermédiaire entre peuplements de résineux et peuplements de feuillus. On pourrait dire que, sous Douglas, la composition en champignons est un peu mixte, et que de ce point de vue c'est le plus feuillu des résineux.









Ensuite nous avons essayé de préciser le caractère généraliste ou spécialiste des espèces, à l'aide d'un indice qui ne fait pas d'apriori sur les variables environnementales, et qui caractérise le généralisme ou spécialisme des espèces sur la base de leurs présences mutuelles : une espèce généraliste est plutôt observée avec beaucoup d'espèces dont l'identité change souvent, tandis qu'une espèce spécialiste se retrouve avec peu d'espèces, toujours les mêmes. En calculant un indice moyen pour les différentes essences, on constate, ce qui est assez commun (avec peut-être un artefact d'analyse),que les espèces sont beaucoup plus spécialistes sous peuplements feuillus, et plus généralistes sous résineux. Noter là encore la position intermédiaire du Douglas, avec les espèces les moins spécialistes de feuillus et les moins généralistes de résineux. En examinant les modes de vie des champignons, on peut distinguer que les ectomycorhiziens sont en moyenne plus généralistes que les saprophytes qui, eux, sont plus spécialistes.

Enfin nous avons cherché à savoir, grâce au set de facteurs disponibles sur RENECOFOR, si la composition varie avec d'autres facteurs environnementaux. La représentation est complexe, mais sachez que le processus de sélection de variables par analyse statistique met en évidence l'importance des facteurs locaux édaphiques et de peuplement et certaines variables biogéographiques. Soit par ordre d'importance décroissante : un effet principal du type résineux/feuillus, mais aussi un effet du taux de saturation des sols (S/T), de l'altitude, des précipitations annuelles moyennes, du pH, de la latitude, des dépôts soufrés, du C/N, de la surface terrière et des dépôts azotés.

Pour conclure…

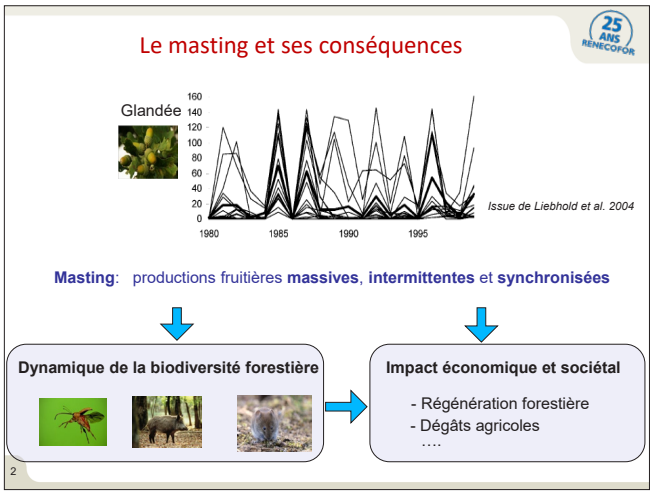
Les champignons sont un groupe assez difficile, et les inventaires sur sporocarpes ne sont pas la meilleure méthode pour évaluer la diversité. Mais, utilisée sur de larges échelles, elle permet quand même de voir des variations. Nous avons mis en évidence un effet principal du type de peuplement et des essences sur la richesse spécifique et la composition des communautés. J'insiste sur le fait que ces résultats sont bien plus que de simples listes d'espèces : c'est une base pour suivre la réponse des communautés. En soulignant l'importance des facteurs locaux, ils apportent des outils de réflexion pour la gestion et le choix des essences, en contexte de changements climatiques. À ce propos, j'ai choisi d'illustrer, pour les perspectives du réseau, le fait qu'il y a un « trou » dans le dispositif pour le suivi des champignons et que peut-être il serait bon de le compléter avec des sites où il y a des disparitions potentielles d'espèce (j'ai mis un exemple de de prédiction pour le hêtre, sans chercher à promouvoir un type de modèle).

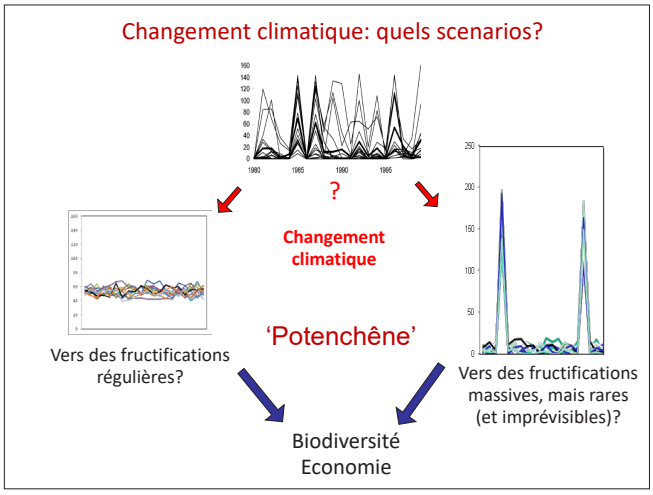
Quel est **l'apport original de RENECOFOR** dans ces résultats ? De fait, c'est l'étude elle-même qui est originale en associant le travail des mycologues, des scientifiques et des gestionnaires, tout ça pour constituer un jeu de données plutôt rare en écologie des champignons. Un jeu de données qui couvre plusieurs groupes trophiques et qui permet de tester différentes hypothèses dans des contextes écologiques variés.
En survolant la bibliographie, j'ai pu constater que l'effet essence et peuplement est assez bien décrit, mais qu'il est souvent peu testé dans ces trois dimensions à la fois : large échelle spatiale, diversité d'essences importante (plus de 5, incluant des résineux et feuillus), groupes trophiques contrastés (saprophytes et mycorhiziens ensemble).

Merci de votre attention.

COMPRENDRE LES FORTES VARIATIONS DES GLANDÉES ET LEURS EFFETS SUR LA BIODIVERSITÉ ASSOCIÉE

Samuel Venner
Université Lyon 1, Laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive (LBBE)





Je vais présenter quelques résultats d'un programme qui vise à mieux comprendre la dynamique des glandées et ses conséquences sur la dynamique de la biodiversité forestière, en particulier des résultats en lien étroit avec le réseau RENECOFOR. Ce programme associe 7 organismes qui ont des compétences très complémentaires et qui s'intéressent à la dynamique des glandées pour des raisons diverses, avec des objectifs très différents ; ils se sont réunis pour construire un programme autour de ce qu'on appelle le masting.

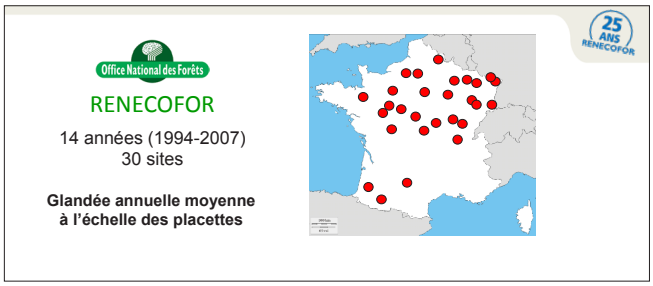
Le masting et ses conséquences

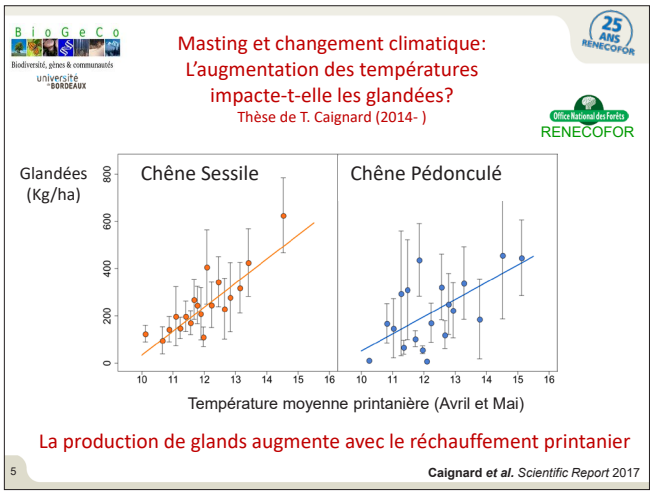
Le masting concerne la dynamique des fructifications à l'échelle d'une population d'arbres. C'est ce qui est représenté sur ce graphique, où chaque ligne correspond à la production d'un arbre de la population. Le masting, c'est une production de fruits massive certaines années, mais il n'y en a pas tous les ans, et les productions sont synchronisées entre les arbres de la population.

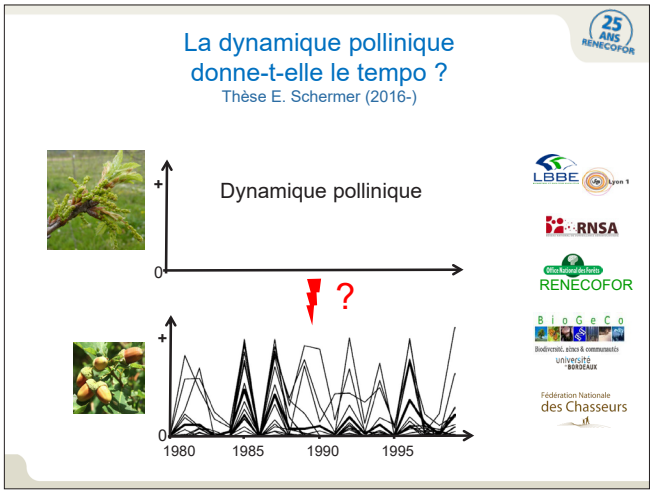
Le masting, celui du chêne en particulier, a des conséquences très importantes sur la dynamique de l'écosystème forestier. Il a bien sûr des incidences sur le succès reproducteur des arbres, le recrutement et la régénération forestière, et donc sur les assemblages d'arbres forestiers. Mais il a aussi de fortes répercussions sur la dynamique des populations de consommateurs, que ce soient des insectes, des ongulés, des rongeurs, des oiseaux, avec de nombreux effets possibles en cascade. Il a aussi des conséquences économiques via les effets sur la régénération forestière et la filière bois, entre autres, et d'un point de vue sociétal, il pourrait jouer un rôle important, par exemple dans la dynamique de la maladie de Lyme (quoi que le lien ne soit pas encore très bien établi).

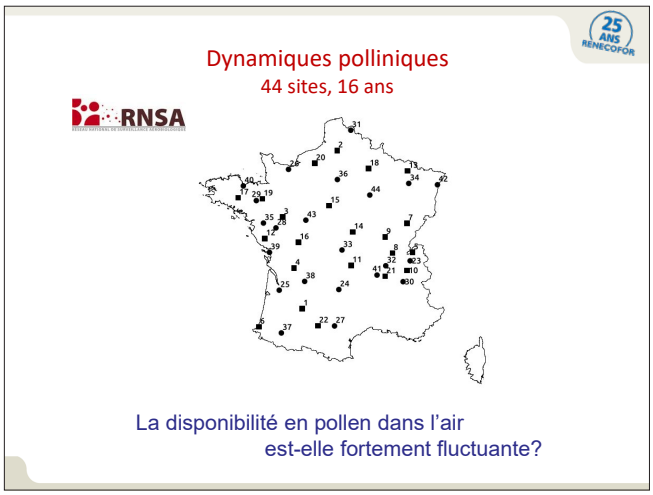
Le problème, c'est qu'on ne comprend pas encore bien les mécanismes qui sous-tendent ces patrons de fructification, ces fortes fluctuations de glandées. Du coup on est incapable de prédire ce qu'elles vont devenir dans le contexte du changement climatique : les glandées vont-elles devenir beaucoup plus régulières ou au contraire va-t-on avoir une amplification du masting avec des fructifications qui deviendront exceptionnelles (rares) et très massives ? Les conséquences sur la dynamique de la biodiversité ou sur le plan économique seront très différentes selon qu'on est dans un cas ou dans l'autre.

Nous avons donc construit **le programme Potenchêne** qui vise à apporter de la lumière sur l'ensemble de ce système.









Je vais présenter quelques résultats qui s'appuient fortement sur les travaux menés par le réseau RENECOFOR, à commencer par la quantification des glandées annuelles à l'échelle des placettes, réalisée sur les 30 placettes de chênaies pendant 14 années de suite, de 1994 à 2007.

Masting et changement climatique : l'augmentation des températures impacte-t-elle les glandées ?

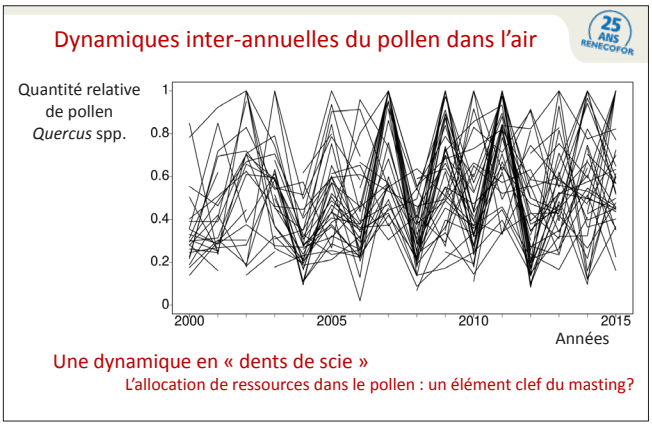
Première question traitée dans notre programme : l'augmentation des températures décrite dans le contexte du changement climatique est-elle susceptible d'impacter la dynamique des glandées ? Ce travail a été pris en charge par Thomas Caignard qui fait sa thèse à l'université de Bordeaux sous la direction de Sylvain Delzon. Il a testé l'effet des températures de diverses périodes sur les glandées, avec un résultat spectaculaire : l'intensité des glandées augmente fortement avec les températures printanières, en particulier au mois d'avril et au mois de mai, que ce soit chez le chêne sessile ou chez le chêne pédonculé. De plus, un réchauffement printanier a été observé pendant cette courte période temporelle de 14 années, et on voit aussi une augmentation de la production de glands sur cette courte période.

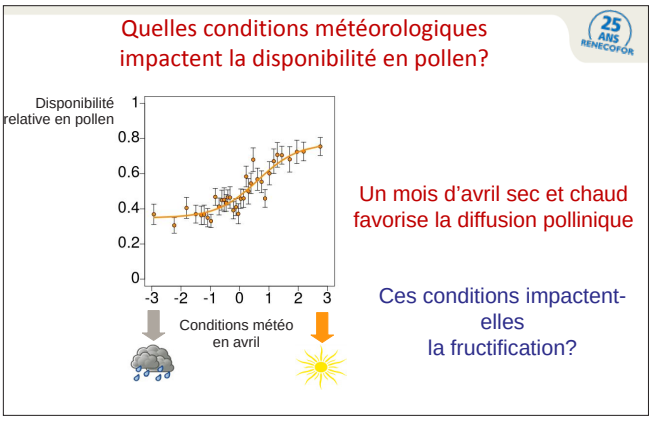
La dynamique pollinique donne-t-elle le tempo ?

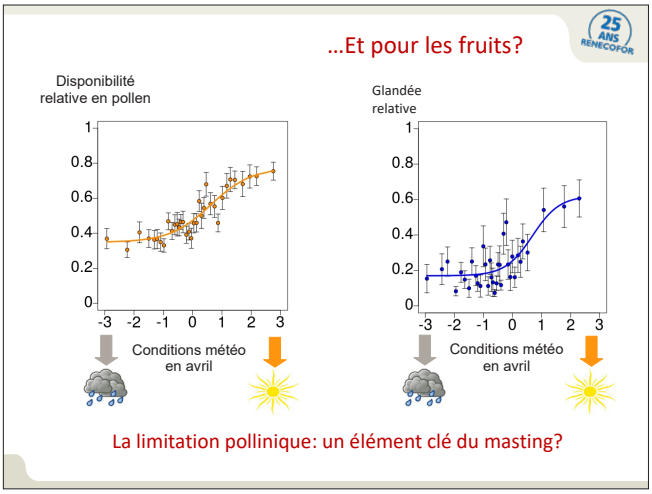
À ce moment de l'année, le cycle reproducteur en est au processus de pollinisation. D'où cette question : la dynamique pollinique donne-t-elle le tempo, est-ce elle qui pilote la dynamique des glandées ? Éliane Schermer étudie cette question, dans le cadre de sa thèse à l'université de Lyon (thèse cofinancée par l'ONF).

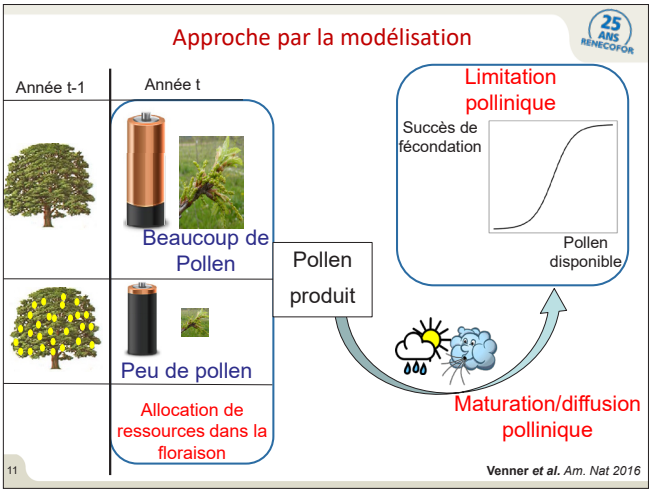
Elle a commencé son travail en analysant la dynamique des émissions polliniques de chêne à travers les données fournies par le RNSA (réseau national de surveillance des risques aérobiologiques) qui suit un grand nombre de sites en France.

Photo : T. Triballier, ONF







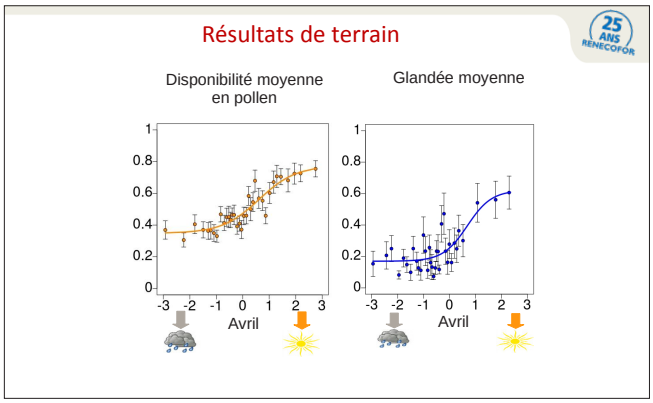


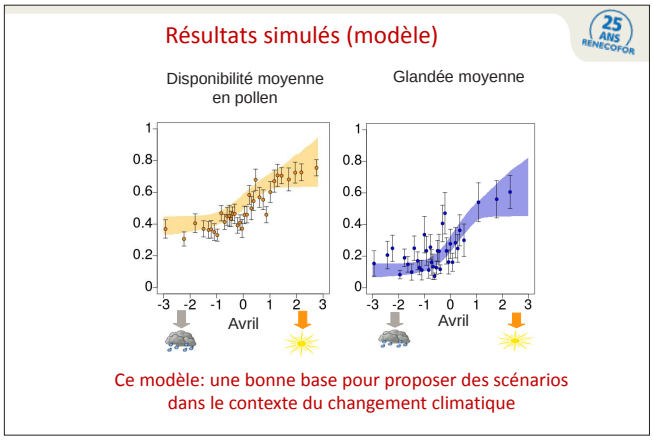
Éliane s'est évidemment demandé si la disponibilité en pollens de chêne dans l'air fluctue fortement, à la façon de ce qu'on observe pour les glandées. Ce graphique représente la dynamique interannuelle du pollen dans l'air, sur les 44 sites qui sont suivis pendant les 16 dernières années. On constate d'abord que les quantités de pollen sont extrêmement fluctuantes d'une année à l'autre, avec un patron qui ressemble un peu à celui des glandées. C'est une dynamique particulière, en dents de scie, qui ne peut pas s'expliquer seulement par les conditions météo mais qui peut s'expliquer probablement par une synchronisation des arbres à l'échelle d'un site, dans leur allocation de ressources dans la production pollinique. Comme ces patrons ressemblent en partie à celui qu'on observe au niveau des glandées, la dynamique pollinique joue probablement un rôle important dans le masting.

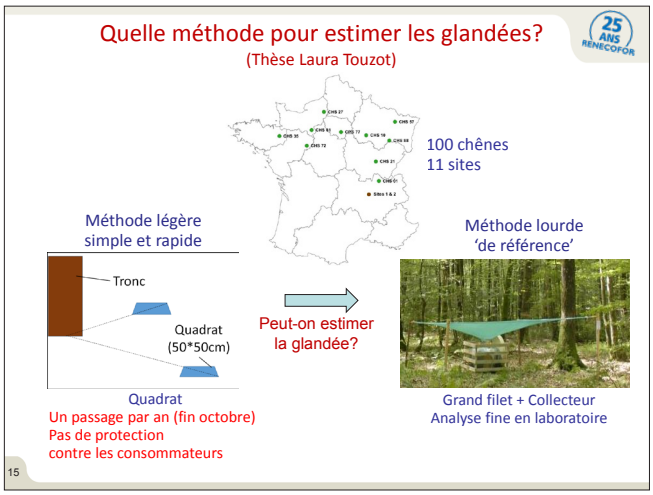
Éliane a cependant analysé finement les conditions météo susceptibles d'impacter la disponibilité en pollen. Elle a testé un ensemble de périodes différentes, et diverses combinaisons de conditions météo. Il en ressort d'abord que la période du mois d'avril joue un rôle clé. Nous avons donc créé un index météorologique du mois d'avril : plus on va dans le négatif (à gauche sur l'axe des abscisses), plus les conditions météo d'avril sont humides et froides, et les précipitations importantes ; plus on va vers le positif (vers la droite), plus le temps du mois d'avril est chaud et sec. Et on constate qu'il y a une relation très forte entre cette variable météorologique synthétique et la disponibilité en pollen dans l'air. Le mois d'avril sec et chaud favorise la diffusion du pollen. Ce n'est pas un scoop en soi, mais ça repose une question : est-ce que ces conditions impactent pareillement la fructification ?

Nous avons donc réanalysé les jeux de données RENECOFOR avec cet indice climatique, que nous avons calculé année par année pour chaque site. Nous montrons ainsi qu'il y a entre l'intensité des glandées et ces conditions météo en avril une relation très similaire à celle qu'on observe pour la disponibilité en pollen. Ça suggère que la dynamique pollinique des chênes joue un rôle déterminant sur la dynamique des glandées, d'une part, et que le pollen peut être envisagé comme un facteur limitant de la fructification.
Mais ça ne suffit pas pour en être tout-à-fait convaincu ; nous avons donc construit un modèle mécaniste pour le vérifier.

Je ne vais pas présenter ce modèle en détail, mais simplement donner quelques éléments, quelques mécanismes déterminants pour comprendre le masting. D'abord on considère que l'allocation de ressources dans la floraison, et donc dans la production de pollen, dépend du niveau de glandée de l'année précédente. Si un arbre produit peu de glands une année donnée, il va pouvoir produire beaucoup de pollen l'année suivante ; au contraire, s'il produit beaucoup de glands une année donnée, il produira peu de pollen l'année suivante. Du coup, on peut calculer la quantité de pollen produite par les arbres à l'échelle d'une population. Ensuite on intègre au modèle le fait que la quantité de pollen disponible pour la reproduction dépend des conditions météo, en particulier des conditions météo du mois d'avril. Enfin on introduit un dernier élément qu'on appelle la limitation pollinique et qui est central : on considère simplement que le succès de fécondation d'une fleur femelle dépend de la quantité de pollen dans son environnement.







Vérifier ou tester nos hypothèses, ça consiste à voir si ce modèle mécaniste relativement simple permet d'obtenir par simulation des résultats proches de ce qui est observé sur le terrain, que ce soit pour le pollen ou pour les glandées.

Voici donc ce que ça donne : les zones colorées correspondent aux résultats de simulation, avec de nombreuses répétitions, et ça correspond assez bien aux données de terrain. Cela suggère que notre modèle pourrait constituer une bonne base pour proposer des scénarios sur le devenir du masting des chênes dans le contexte du changement climatique.

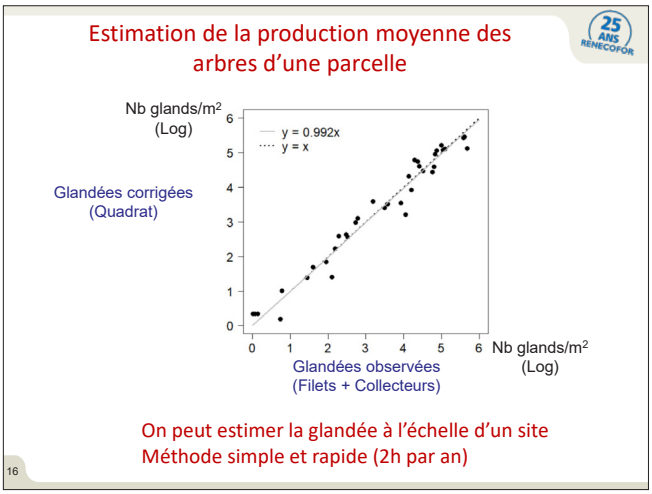
En réalité, le modèle est encore très imparfait. En particulier il simule très mal les dynamiques à l'échelle de l'individu arbre : il ne rend pas bien compte de la variabilité des fructifications entre les arbres.

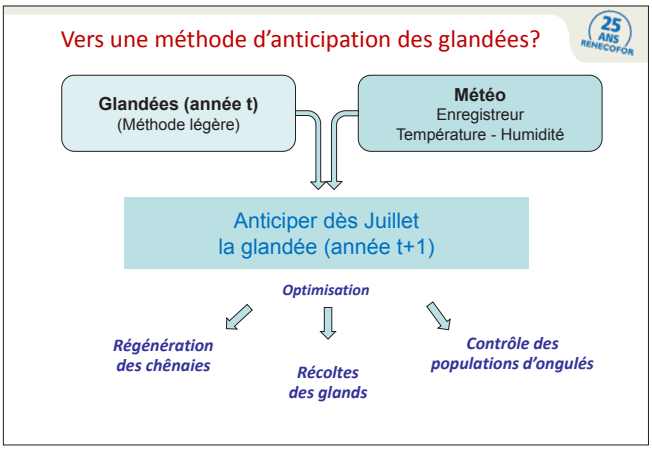
Des mesures par arbre pour mieux comprendre le masting

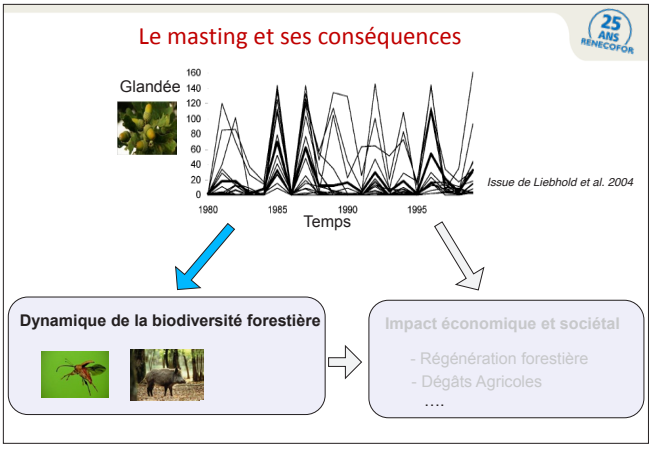
Pour étudier cette variabilité, nous avons décidé dès 2012, avec Vincent Boulanger (du département RDI de l'ONF) et avec le soutien du réseau RENECOFOR, de mettre en place un nouveau réseau de suivi des fructifications de chêne : l'idée est d'avoir une approche beaucoup plus fine et de suivre ce qui se passe à l'échelle des individus. Sur 15 sites (dont 12 sites RENECOFOR), nous suivons au total à peu près 150 chênes sessiles. Nous avons mis en place au pied de ces chênes de grands filets de 20 m² et ce qui tombe dans ces filets est récupéré dans un collecteur au centre du filet. Grâce à ce dispositif nous allons pouvoir suivre la floraison femelle des arbres, leur fructification, le taux d'infestation par les insectes ; en parallèle, il y a aussi un suivi de la croissance de ces arbres et de leur phénologie, ainsi qu'un bilan annuel de leur état sanitaire (avec le DSF*). Ça fera un jeu de données très puissant, probablement à partir de 2022. Les résultats, c'est donc plutôt pour le 30e anniversaire de RENECOFOR ; mais nous pourrons produire des premières analyses en 2018.

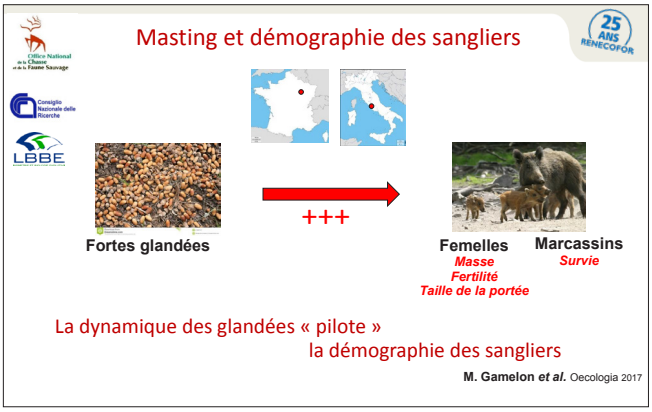
Ceci dit, nous avons déjà pu exploiter un peu les premières données fournies par ce réseau d'observation, pour répondre à une préoccupation qui nous concerne tous, chercheurs et forestiers : savoir estimer les glandées à l'échelle d'un site. Nous avons profité de ce réseau pour mettre en place une méthode simple d'estimation des glandées. Notre méthode « lourde » avec filets et collecteurs sert de référence pour tester différentes méthodes « légères » et voir si on obtient les mêmes résultats.

Une méthode simple et rapide à mettre en œuvre, et qui *a priori* marche assez bien, consiste à placer des quadrats au sol fin octobre à raison d'un seul passage par an et sans aucune protection contre les consommateurs. Permet-elle une estimation correcte des glandées ?









Ce graphe montre qu'il y a une très bonne corrélation entre les glandées estimées à partir des quadrats (estimations moyennes à l'échelle d'une parcelle) et les glandées observées avec nos dispositifs lourds (filets + collecteurs).

Cela signifie que nous avons là une méthode très simple et rapide d'utilisation qui permet, en deux heures par an, d'estimer précisément les glandées à l'échelle d'un site.

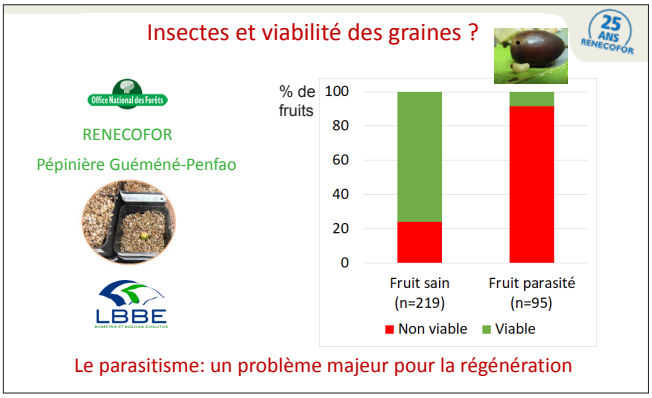
Pourquoi est-ce intéressant ? Il y a de nombreuses utilisations possibles, mais ça peut devenir intéressant en particulier pour anticiper les glandées. Avec cette méthode légère, on va en effet pouvoir suivre la dynamique des glandées sur un site. Si on enregistre sur ce même site les conditions météo (température et l'humidité) à l'aide de capteurs et enregistreurs classiques qui sont désormais abordables, nous pensons être en mesure de proposer dans les prochaines années une méthode qui permettra d'anticiper les glandées dès le mois de juillet. À ce moment-là, ça pourrait rendre service en termes de gestion pour optimiser par exemple la régénération des chênaies ou bien la récolte des fruits ou encore le contrôle des populations d'ongulés dont la démographie dépendrait de la dynamique des glandées.

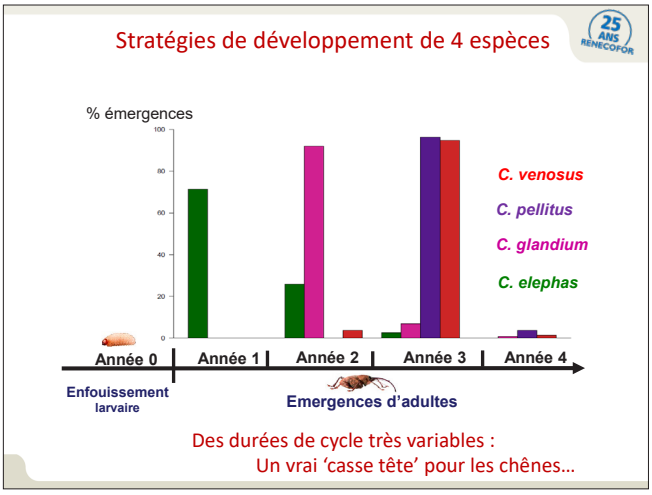
Impacts du masting sur la biodiversité animale

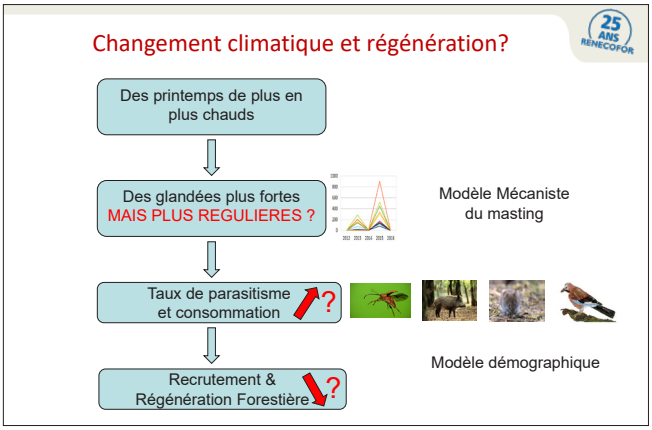
Ce qui m'amène à l'autre approche du programme Potenchêne : étudier l'impact du masting sur la démographie de certaines espèces et en particulier des espèces de consommateurs. Nous nous sommes focalisés surtout sur le sanglier et les différentes espèces d'insectes.

Pour ce qui est de la relation entre masting et **démographie des sangliers,** on s'éloigne un peu du réseau RENECOFOR : l'étude est conduite sur deux sites, l'un en France (Arc-en-Barrois), l'autre en Italie. Ce travail a permis de montrer qu'il y a un impact très fort de l'intensité des glandées sur les paramètres démographiques de ces populations de sanglier. Les fortes glandées s'accompagnent d'une augmentation de la masse, de la fertilité, de la taille des portées des femelles, puis de la survie des marcassins. La dynamique des glandées pilote donc au moins en partie la dynamique des sangliers et, du coup, suivre la dynamique des glandées pourrait être un moyen de mieux contrôler la démographie de ces sangliers qui pose éventuellement de nombreux problèmes.

Photo : Erwin Ulrich, ONF







L'autre volet, c'est l'impact des glandées sur la **dynamique des communautés d'insectes**. Quel est le problème avec ces insectes ? À l'échelle d'un arbre, on trouve communément 5 espèces d'insectes qui pondent dans les fruits et dont les larves se développent aux dépens des fruits. La première question est donc de savoir si la présence des insectes impacte la viabilité des graines et du coup affecte potentiellement la régénération des chênaies.

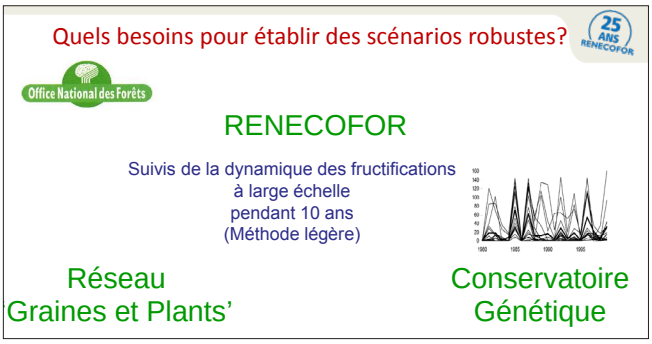
Nous avons mis en place, grâce au réseau RENECOFOR et aussi à la pépinière de Guéméné, un dispositif pour tester la viabilité des graines en fonction de leur taux d'infestation. Le constat, c'est que pour les fruits « sains », 81% des graines sont viables ; dès que les fruits sont infestés par les insectes, la viabilité chute à moins de 10% et les graines viables sont probablement moins bien parties dans la vie que celles qui ne sont pas infestées. Le parasitisme peut ou pourrait donc avoir des conséquences très négatives sur la régénération forestière.

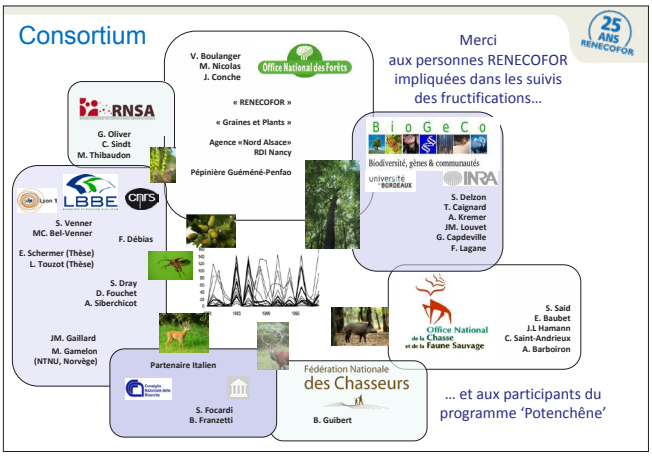
Ces insectes posent un autre problème, qui est lié à la stratégie de développement d'au moins quatre espèces sur les cinq.

Nous avons étudié leur cycle de vie. Quand on laisse s'enterrer les larves qui se sont développées la même année dans le même arbre et qu'on suit les émergences sur plusieurs années, on fait le constat suivant : l'une des espèces sort surtout la première année et un peu la deuxième, une autre sort surtout la 2e année et enfin deux autres espèces sortent surtout la 3e année. Ces espèces très proches phylogénétiquement ont des cycles de durée très variable, et pour le chêne c'est probablement un vrai casse-tête de contrôler cette communauté d'insectes. On peut imaginer que la seule solution qui s'offre au chêne pour gérer ça, c'est d'avoir des fructifications massives mais complètement imprévisibles par ses consommateurs. Sinon il ne peut pas s'en sortir…

Changement climatique et régénération ?

Je n'ai pas détaillé l'ensemble de notre programme, mais nous sommes encore loin de pouvoir proposer des scénarios robustes sur ce que deviendra le système dans le contexte du changement climatique. Pour autant on peut essayer de dégager quelques petites pistes. On sait *a priori* que les printemps vont être de plus en plus chauds ; en conséquence les glandées vont être de plus en plus fortes. Reste cette question : vont-elles être aussi de plus en plus régulières (ce qui est fort possible) ? Si les glandées devenaient plus fortes et plus régulières, les premiers bénéficiaires seraient sans doute les consommateurs à commencer par les insectes. Du coup on pourrait se trouver avec des taux de parasitisme très importants, et avec une très forte densité de consommateurs qui entrainerait une consommation massive de ces glands. Dès lors, ces glandées fortes et régulières pourraient paradoxalement s'accompagner d'une chute du recrutement et de problèmes de régénération forestière.





Mais comme je l'ai dit, nous sommes encore un peu légers pour proposer des scénarios robustes. Ce qu'il faudrait idéalement, pour réussir à établir ces scénarios, c'est amplifier le suivi de la dynamique des fructifications sur davantage de sites et au moins pendant 10 ans. Pour en avoir discuté avec plusieurs personnes de l'ONF intéressées par les fructifications, je pense qu'il serait pertinent que ces suivis soient mis en place non seulement avec RENECOFOR mais aussi en partenariat étroit avec le réseau graines et plants et le Conservatoire génétique des arbres forestiers.

En attendant, je tiens à remercier les personnes ici présentes et surtout les membres du réseau qui sont très largement impliqués dans le suivi des fructifications sur nos 15 sites, ainsi que les participants du programme Potenchêne.

Discussion

Questions / Réponses

Georges Hache, sylviculteur privé en Côte d'Or - Ma question s'adresse à Samuel Venner et François Lebourgeois. Le premier vient de dire qu'il y a un effet pollen important sur la fructification du chêne alors que le second a dit (session 2) le contraire, qu'il n'y avait pas d'effet pollen sur la fructification du chêne, mais seulement pour le hêtre. Comment conciliez-vous vos résultats ?

François Lebourgeois (FL) - En fait, nous sommes très cohérents. Il y a un effet très fort de la température du mois d'avril. Dans les modèles que j'ai mis en évidence (session 2) cet effet a tant de poids sur la prédiction de biomasse des fruits que l'effet pollen, qui lui aussi est lié aux températures d'avril, ne sort pas de façon évidente : c'est pour ça que j'ai dit qu'on ne voyait pas d'effet pollen. Ensuite, j'ai travaillé à l'échelle du réseau alors que Samuel travaille au niveau de la population (du peuplement), avec des sources de données et une approche très différentes. Ça peut aussi expliquer ce genre de chose : en fonction de la méthodologie qu'on emploie, on met des poids différents aux variables.

Nicolas Delpierre (co-auteur de la présentation de François Lebourgeois) - Je pense en effet que la différence principale tient dans les approches. Samuel montre un effet pollen très important en faisant l'analyse avec un modèle mécaniste, et c'est le modèle mécaniste qui permet de le mettre en évidence. Quand on analyse simultanément de manière statistique les données de fructification avec les données température et les données pollen, alors l'effet température ressort en premier ; mais quand on a une formulation mécaniste du problème, on voit que peut-être (d'après les résultats de Samuel, que je découvre ici), l'effet pollen est prépondérant. En fait la température agirait sur le pollen et, de là, sur la fructification.

Samuel Venner (SV) - On va en rediscuter ensemble. J'ai aussi dit que le chêne a intérêt à avoir un « bruit » considérable dans la dynamique de ses fructifications du fait de la grande diversité de consommateurs de glands. Et comme c'est très bruité, c'est très difficile à analyser, très difficile de sortir des résultats forts. D'ailleurs je pense en réalité, sans avoir encore les résultats définitifs pour énoncer cette conclusion avec force, que le processus de pollinisation joue un rôle central et que la phénologie pollinique est déterminante. Je suspecte en particulier que les chênes en région tempérée émettent leur pollen très tôt pour que ça ne marche qu'exceptionnellement, qu'ils émettent leur pollen à une période ordinairement défavorable à la diffusion pollinique pour que les consommateurs ainsi privés de glands restent contrôlables. Nous sommes en train de travailler là-dessus. Ça veut dire qu'avec le changement climatique le système pourrait complètement changer d'allure : si les conditions deviennent plus régulièrement favorables, les fructifications

pourraient devenir beaucoup plus régulières et ça, ça changerait la donne.

Myriam Legay, ONF RDI - Si les glandées devenaient massives et régulières, cela n'aurait-il pas un effet majeur sur la dynamique des réserves dans le chêne ? Et quel serait le poids de cet effet par rapport à l'effet indirect sur le succès de reproduction via l'augmentation des consommateurs ?

SV - Pour bien appréhender la dynamique des fructifications, je pense qu'il faut décomposer cette dynamique en deux : une composante que je dirais déterministe, et une composante stochastique (aléatoire). La composante déterministe, c'est qu'après une année de forte fructification, on a toujours une année de faible fructification ; cela peut être interprété comme de l'épuisement des ressources internes de l'arbre, encore qu'on ne le sache pas du tout. Toujours est-il que c'est probablement une stratégie efficace pour contrôler une grande partie des consommateurs de graines qui, après avoir bien profité d'une bonne glandée, vont se prendre une grosse claque derrière les oreilles. Ce qui est stochastique, c'est quand surviendra la forte glandée suivante. Mais si les conditions deviennent favorables tous les ans, les chênes seront probablement capables d'en produire régulièrement, tous les 2 ans en réalité, et tous les consommateurs sauront évoluer rapidement pour se caler sur cette éventuelle rythmicité (les insectes y sont déjà prêts).

Eric Dufrêne - Une remarque : on oublie dans cette discussion que le débourrement avance de 2 jours par décennie ; le débourrement du chêne a déjà avancé de 20 jours et il va continuer d'avancer probablement, on ne sait pas jusqu'à quand. On parle ici de l'augmentation de la température en avril, mais il n'est pas du tout sûr que le chêne va bénéficier de meilleures conditions de diffusion pollinique puisqu'il va débourrer au mois de mars...

SV - Il faut effectivement s'intéresser au devenir de la phénologie pollinique et aux conditions dans lesquelles le pollen sera diffusé, sachant que ces conditions peuvent être découplées dans le contexte du changement climatique ; mais en fait on n'en sait rien. Nous avons cependant constaté (et ça vient d'être publié), que sur les 14 ans de suivi de RENECOFOR, il y a eu une augmentation de la température d'avril et de mai, qui a suffi à expliquer une augmentation de l'intensité des fructifications. Ça veut dire que quand il y a eu une augmentation de la température printanière, la phénologie n'a pas été suffisamment avancée pour brider la pollinisation, en tout cas.

Hubert Schmuck, ONF, agence de Sarrebourg - Concernant la fructification des chênes, a-t-on fait le lien entre les données RENECOFOR et les données du réseau graines et plants de l'ONF sur les récoltes annuelles de glands dans les peuplements classés ?

SV - Joël Conche (expert ONF graines et plants) a été invité tardivement sur notre programme, nous travaillons désormais de près avec lui là-dessus. La force du réseau graines et plants de l'ONF, c'est d'avoir un suivi depuis 1980 jusqu'à 2016 : ça fait un jeu de données impressionnant. Pour évaluer sa fiabilité, nous avons confronté les données de 1994 à 2007 à celles de RENECOFOR, et il y a de belles corrélations ; nous sommes donc plutôt confiants. La faiblesse de ce jeu de données c'est qu'il s'agit de récolte, et que la récolte est conditionnée à la fois par les fructifications sur chacun des sites et par la commande. Or on n'a pas toujours l'information commande de manière rigoureuse. Cependant, avant de lancer les commandes, Joël a fait aussi une estimation qualitative des glandées (en code : 0 – 1 – 2) : on devrait pouvoir travailler avec ça pour corriger les collectes et obtenir un jeu de données extrêmement puissant. C'est donc très intéressant, mais je pense qu'il faut réfléchir à mettre en place un réseau de suivi des fructifications, probablement au-delà des chênes, en travaillant sur les trois forces de l'ONF : RENECOFOR, le réseau graines et plants et le Conservatoire génétique.

Erwin Ulrich, ONF-RDI - Sur la richesse spécifique des champignons, Benoît Richard a présenté deux graphiques montrant qu'il n'y a pas de signal biogéographique (latitudinal ou altitudinal) à l'échelle du réseau. Compte tenu du nombre d'espèces probablement présentes sur les sites mais non vues encore, et compte tenu de la diversité des stations qui ne sont pas incluses dans l'échantillonnage, mon avis, c'est que l'échantillonnage est bien trop faible pour rendre compte d'un éventuel gradient géographique.

BR - C'était effectivement un peu limite de chercher à explorer ça mais j'avais ces données et je me suis dit « pourquoi pas ». Dans une perspective prochaine je vais essayer de m'intéresser plus spécifiquement aux différents groupes trophiques, pour évaluer l'existence de réponses différenciées entre ces groupes de champignons.

Delphine Derrien, INRA-BEF - Je voudrais proposer à Jean-Luc Dupouey une piste à creuser éventuellement, à propos des bioindicateurs du C/N qui ne correspondent pas avec ce qu'on mesure dans les sols. J'ai essayé de montrer (session 3) que la matière organique des sols est hétérogène et qu'il y a au moins un pool facilement décomposable (les résidus végétaux) et un pool stabilisé. Ces pools de matière organique contribuent tous deux à la valeur du C/N du stock et contribuent tous deux à la minéralisation de l'azote qui devient disponible pour la végétation. Le désaccord entre les observations dans le sol et ce qui est vu par la plante vient vraisemblablement de ce que le système est hors équilibre et que ces deux pools n'évoluent pas de façon similaire mais contraire. C'est à creuser.

Jean-Luc Dupouey (JLD) - Je suis parfaitement d'accord ; il faut aller plus loin sur l'interprétation du C/N, qu'on a utilisé pendant des années comme un indicateur de la disponibilité en azote. On peut élargir un peu la question : comment apprécier la disponibilité en azote pour les plantes ? On peut creuser la piste des formes de matière organique, mais peut-être serait-il aussi intéressant de tester d'autres indicateurs ? Serait-il par exemple utile de mesurer la minéralisation potentielle dans RENECOFOR ? Il y a en tous cas une réflexion à avoir sur la mesure de la disponibilité en azote pour les arbres et les plantes herbacées, pourquoi pas dans le cadre de RENECOFOR, qui offre une large gamme de milieux, et où sol et flore sont déjà assez bien connus.

Alain Brèthes, pédologue - Jean-Luc Dupouey a présenté des résultats à 5 ans ; qu'en est-il des résultats année par année ?

JLD - En fait, j'ai présenté des résultats principalement à 10 ans (1995-2005), quelques-uns à 15 ans (1995-2010) et on aura bientôt les résultats à 20 ans. Je pense que c'est ce qui est sous-jacent à la question est : y a-t-il une variabilité interannuelle de la flore qui pourrait par exemple masquer des tendances sur le plus long terme ? La réponse est clairement non. C'est un résultat fort de RENECOFOR : on sait maintenant que la variabilité interannuelle de la flore est faible. Le seul groupe qui ait

montré une variabilité interannuelle significative, liée probablement au climat, c'est celui des mousses. Les années sèches, il n'y a pas forcément moins de mousses, mais on ne les voit pas. Pour ce qui est des espèces herbacées phanérogames, la variabilité interannuelle est très faible. Dit en jargonnant, l'autocorrélation temporelle de la composition des communautés végétales est forte. Dit en clair, ce qu'on voit une année, on a de fortes chances de le retrouver très similaire (mais pas identique) l'année suivante.

Myriam Legay - Quand on voit l'effet des oppositions feuillus/résineux sur la diversité en champignons, le lien avec le C/N, je me demande si ça aurait du sens de regarder le lien entre la diversité des champignons et l'évolution des caractéristiques des sols. Le lien entre les caractéristiques constatées en statique et l'évolution des sols.

BR - L'échantillonnage des champignons ne permet pas de rechercher des évolutions. Quant à rechercher un lien entre la diversité des champignons, les caractéristiques des sols et leur évolution, l'idée ne m'en est pas venue au moment du post doc…

Hervé Jactel - On a souligné la position assez particulière du Douglas vis-à-vis de la diversité des champignons, or c'est la seule essence exotique ; est-ce que ce les résultats présentés ne sont pas la preuve qu'il n'y a pas de flore fongique adaptée et que finalement les champignons qu'on voit dans le Douglas correspondent à un recrutement d'espèces qui sont dans les peuplements voisins ? S'il apparaît proche des essences feuillues, peut-être qu'il recrute des espèces fongiques des peuplements voisins feuillus ?

BR - Je n'ai pas détaillé faute de temps mais oui, notre première hypothèse c'est l'origine exotique du Douglas. À l'INRA de Nancy, Marc Buée a montré sur un réseau de placettes à l'échelle locale un patron similaire au nôtre. Mais dans l'aire de répartition d'origine sur le continent nord-américain, les richesses signalées sont deux fois supérieures. Il y a donc de fortes chances que la principale explication soit là.

Claudy Jolivet, INRA Orléans - L'analyse (remarquable) des inventaires mycologiques conduits sur le réseau RENECOFOR est une façon de caractériser la biodiversité, mais ce n'est pas vraiment un suivi temporel , est-ce que ça a quand même permis de développer un protocole d'échantillonnage qui permettrait d'aller vers un suivi temporel basé sur la récolte et l'observation de sporophores ? Et est-ce que les approches moléculaires disponibles aujourd'hui permettraient d'apporter d'autres éclairages sur la diversité et la composition des pools d'espèces ? D'après la bibliographie, quand on a des séries temporelles basées sur la fructification, on peut trouver des corrélations avec des effets de changement climatique : il y a pas mal de travaux qui montrent des augmentations de durée de fructification, des décalages dans le temps des périodes de fructification, etc. Les approches moléculaires sont complémentaires : elles permettent d'être bien plus exhaustif, mais elles ne permettent pas vraiment de percevoir ces aspects fonctionnels.

BR - Les inventaires ont été réalisés selon le principe de 4 passages par an répétés sur 3 années consécutives. Certains mycologues en ont fait plus et sont allés jusqu'à 30 passages sur les 3 années consécutives. Sur ces sites où les visites ont été multipliées, où on a donc théoriquement une meilleure approximation de la biodiversité, on voit qu'à chaque nouveau passage il y a de nouvelles espèces. Donc pour la partie échantillonnage c'est déjà difficile d'établir un protocole consensus sur le nombre de relevés dans la perspective d'un suivi temporel. C'est pourquoi les approches moléculaires pourraient permettre de mieux appréhender la diversité (mais à quel coût ?). Je pense surtout aux ascomycètes : il y a des études qui ont montré que, même si on ne voit pas de fructifications, les ascomycètes sont en proportions plus importantes que d'autres groupes comme les basidiomycètes.

Xavier Bartet, ONF Orléans - François Lebourgeois a montré (session 2) qu'il y a une corrélation positive entre les glandées et la croissance, ce qui est pour moi une découverte ; je pensais plutôt que c'était une alternative, du genre « soit je donne dans le bois, soit je donne dans la fructification ». Mais du coup, serait-ce un raccourci trop rapide de dire qu'on peut s'attendre plutôt à un accroissement en volume du chêne dans les années à venir avec le changement climatique ? [rires]

SV - On parle ici de compromis entre la croissance et la reproduction, et c'est vrai que les ressources allouées à la reproduction ne peuvent pas l'être à la croissance ; mais peut-être que ça ne peut être détecté que quand il y a des fructifications très massives. Or ces fructifications très massives sont rares (sur les 15 sites que nous suivons depuis 2012, il n'y en a que 3 qui aient connu une grosse fructification), il est donc impossible de répondre proprement à cette question. D'autre part, sur le réseau RENECOFOR, les données de fructification ont été établies à l'échelle de la placette, or pour répondre à cette question proprement il faudrait travailler à l'échelle de l'individu arbre. On pourra le faire dans une dizaine d'années avec le réseau de suivi des fructifications que nous avons mis en place pour le projet Potenchêne. Actuellement, dans la littérature, il y a des résultats qui vont dans les deux sens : on peut trouver une corrélation positive (quand il y a une forte fructification, il y a une forte croissance simultanée), mais il y a aussi des résultats inverses qui sont proposés, il n'y a pas de consensus.

Eric Dufrêne - Il faut faire attention aux effets saisonniers : l'allocation de carbone à la croissance du bois ne se fait pas forcément en même temps que l'allocation de carbone au grossissement des glands, qui intervient probablement plus tard. Le début du processus de fructification (émission de pollen), ça ne compte pas dans le bilan de carbone : c'est négligeable par rapport au bilan total. Par contre, le moment où les glands se remplissent, c'est relativement tardif en saison. Sur le long terme, le bilan de carbone s'équilibre quand même via les réserves, mais sur une année donnée, on peut imaginer un découplage qui permet à la photosynthèse d'alimenter successivement (et non à la fois) la croissance et la fructification.

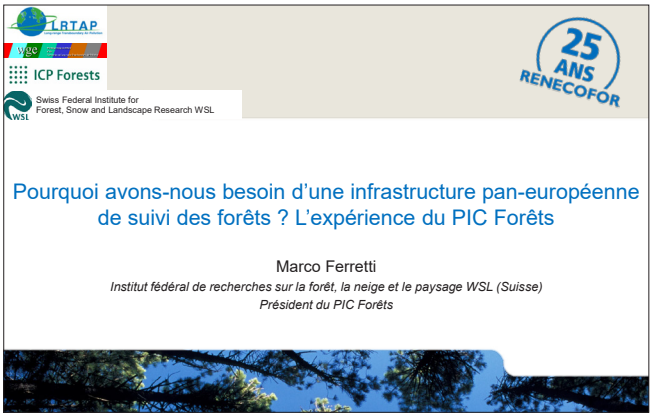
Nicolas Delpierre - Effectivement, le découplage saisonnier de l'allocation des ressources est très net : la croissance du bois (en diamètre, je ne parle pas de la croissance en densité) s'arrête très tôt, vers mi-août, alors que le remplissage des glands se fait à partir de ce moment-là pour avoir une augmentation nette en masse. Chez le hêtre, par contre, le patron est complètement opposé, avec une corrélation négative très forte croissance-fructification, et là c'est un résultat assez classique dans la littérature.

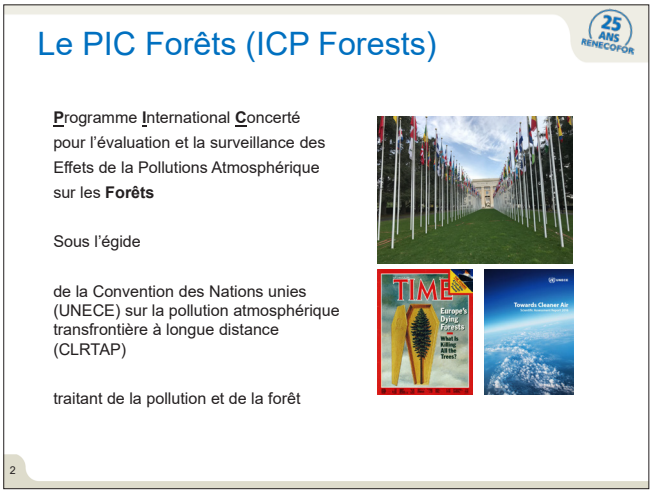
SV - La réponse définitive à la question sera apportée avec les dendromètres électroniques : on aura la cinétique de croissance pendant toute la saison, qu'on pourra croiser avec l'intensité des fructifications.

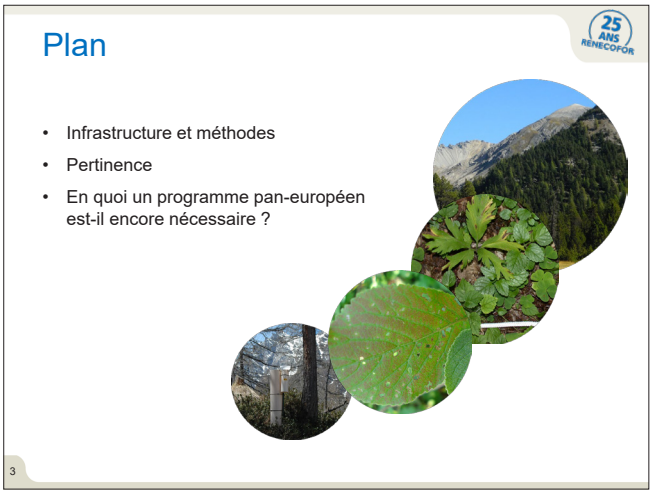
SESSION 7 - L'OBSERVATION DES FORÊTS À L'ÉCHELLE PAN-EUROPÉENNE

INTRODUCTION

Marco Ferretti
WSL Zurich, Président du programme international de suivi des forêts ICP Forests







Je remercie Manuel Nicolas et toute l'équipe RENECOFOR de m'avoir invité à introduire cette session. Je suis heureux et honoré d'être ici pour plusieurs raisons.

Premièrement, je pense que RENECOFOR un des réseaux de suivi des forêts les plus fructueux parmi les différents pays européens. J'ai eu le plaisir d'y contribuer un peu à l'occasion de quelques projets, et j'ai la chance de revoir ici les collègues et amis rencontrés au cours de ces collaborations depuis plusieurs années.

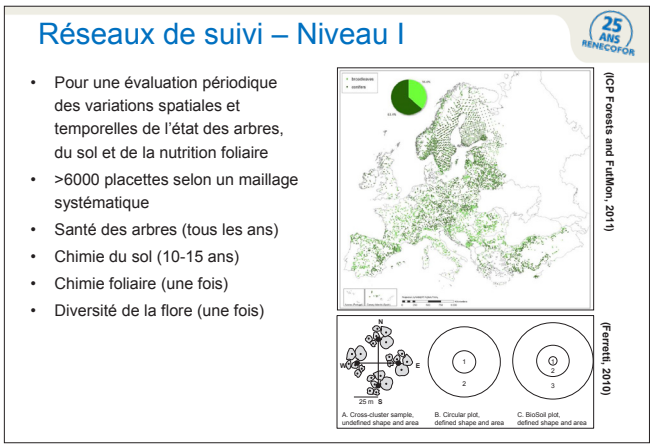
L'autre raison, c'est que je suis ici pour représenter le PIC Forêts, qui est sans doute le programme de suivi forestier à long terme le plus vaste au monde. C'est donc à la fois un honneur et une certaine responsabilité, sachant que j'incarne en quelque sorte l'esprit du PIC Forêts : je suis un scientifique italien qui travaille en Suisse et qui a été désigné par l'Allemagne pour présider une organisation internationale.

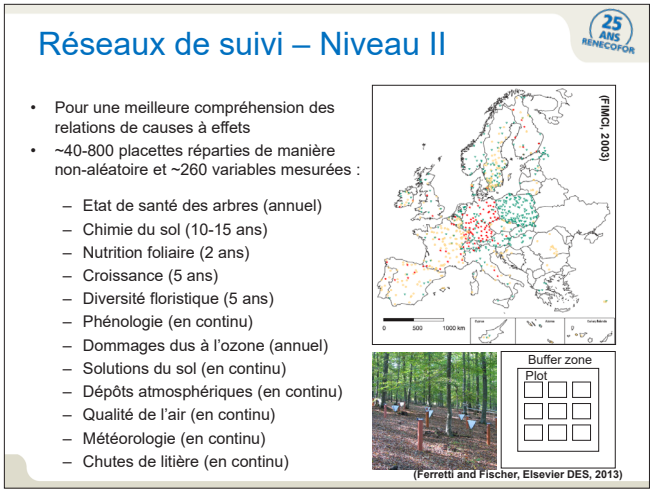
Comme vous le voyez dans le titre de la présentation, mon propos est d'expliquer en quoi avons toujours besoin d'un programme européen de suivi des forêts et de vous faire part de l'expérience du PIC Forêts en la matière.

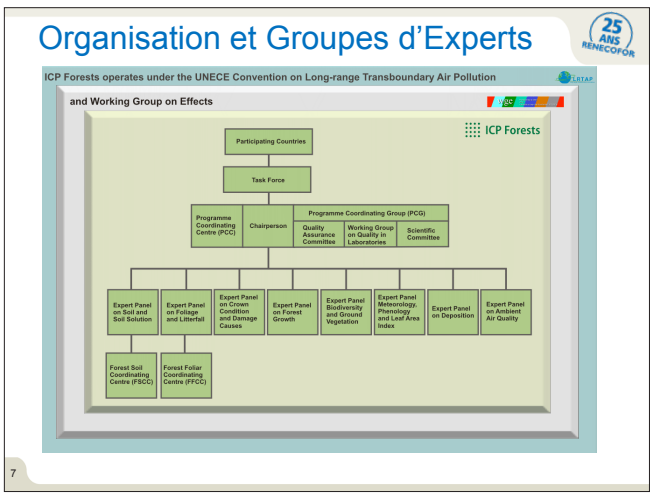
Rappelons ce qu'est le PIC Forêts et quel est son positionnement dans le paysage mondial et européen. « PIC » signifie Programme International Concerté, et « Forêts » renvoie à la surveillance des effets de la pollution de l'air sur les forêts. Il a été institué sous l'égide des Nations unies – de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (UNECE) – dans le cadre de la Convention des Nations unies sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance (CLRTAP).

Cette convention a été établie en 1979, dans une période de grande inquiétude vis-à-vis de la pollution atmosphérique et de ses conséquences potentielles sur le déclin, voire la mort, d'une grande partie des forêts européennes. En termes d'échelle, je dirais que cette inquiétude était comparable à celle que suscite aujourd'hui le changement climatique. C'était une préoccupation très sérieuse et vous voyez que même un magazine international comme *Time* l'exprimait de façon très explicite.

Nous savons maintenant que, par chance, ces craintes ne se sont pas réalisées, peut-être parce que les mesures nécessaires ont été prises. Néanmoins je voudrais dire en quoi l'infrastructure qui a été mise en place est toujours pertinente pour différents sujets et pourquoi nous en avons encore besoin. Mais d'abord je vais rappeler les éléments de base, qui serviront aux présentations suivantes, sur l'infrastructure et les méthodes.







Le PIC Forêts : infrastructure

En pratique, le PIC Forêts a été institué en 1985 et compte aujourd'hui quelque 42 pays participants. L'objectif est d'obtenir de l'information de long terme et à une vaste échelle sur l'état des forêts et sur les relations de cause à effet relatives à cet état : quels sont les facteurs qui peuvent occasionner des problèmes, des déséquilibres, une mauvaise santé ou une faible croissance dans nos forêts ? Deux programmes de monitoring ont été conçus à cet effet, dits de niveau 1 et niveau 2. En France, comme dans bien d'autres pays européens, vous avez les deux ; RENECOFOR appartient au programme de niveau 2. Et le « plus » du PIC Forêts, c'est qu'il attache une grande importance à l'harmonisation des méthodes, à l'assurance qualité et au contrôle qualité.

Au final, ce que nous faisons dans le PIC Forêts, c'est collecter, valider, traiter, stocker, et fournir des données à l'intention des scientifiques, des collectivités, du public, selon une politique commune et explicite de mise à disposition des données. Ces données portent sur la santé des forêts, la croissance, la diversité, la phénologie, la composition chimique, les dépôts atmosphériques, l'ozone troposphérique…

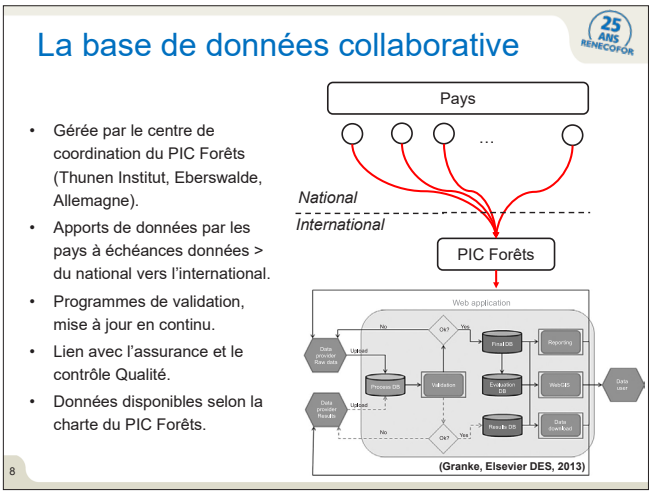
Les deux types de réseaux sont assez différenciés. Le niveau 1 est conçu pour fournir un bilan périodique des variations spatiales et temporelles de l'état des forêts, ou de leur *santé* pour le dire plus familièrement : état des arbres, du sol et de la nutrition foliaire sur une base systématique, avec environ 6000 placettes à travers l'Europe. Je crois qu'il y a même eu jusqu'à 8500 placettes renseignées dans la base de données. Nous relevons l'état de santé des arbres tous les ans, l'état des sols tous les 10-15 ans environ ; la nutrition foliaire et la diversité de la flore ont été relevées une fois (au cours de la dernière décennie), sans répétition prévue.

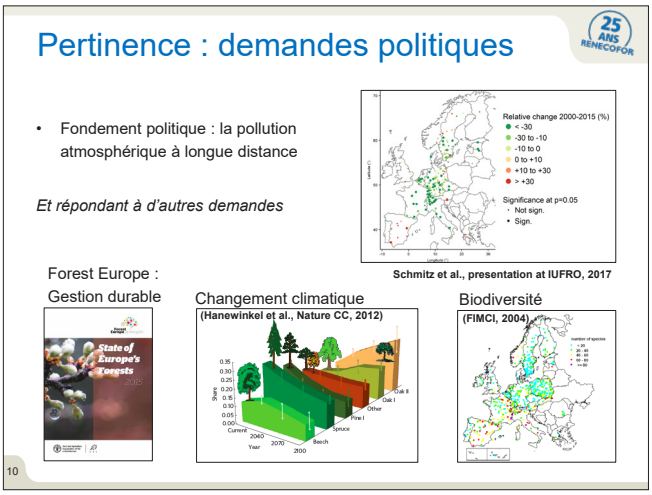
Le niveau 2 n'est pas conçu sur une base systématique mais plutôt sur un schéma d'étude de cas. L'intérêt est d'observer l'état d'un écosystème sélectionné et de mesurer différents paramètres de cet écosystème, depuis la santé des arbres, la croissance, la diversité, jusqu'à la chimie des sols, à la nutrition foliaire, aux dépôts atmosphériques. En somme, ça couvre presque toutes les composantes de l'écosystème, et ça a été fait sur un ensemble de 40 à 800 sites selon le paramètre considéré.

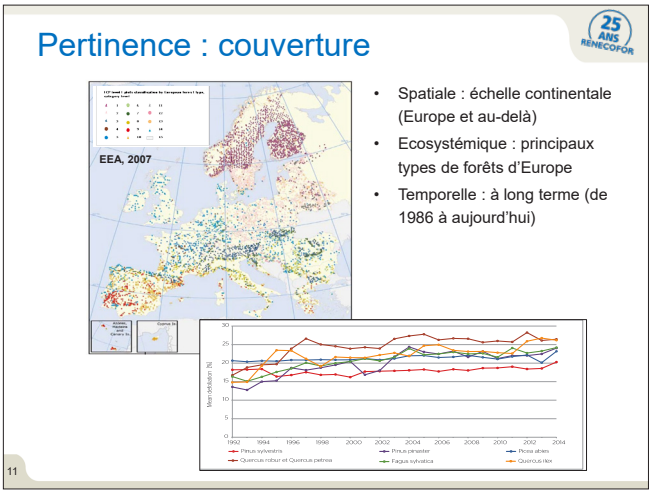
Les méthodes

Une des forces du programme, c'est son organisation et ses panels d'experts, des scientifiques qui travaillent ensemble depuis presque trois décennies. C'est une prouesse exceptionnelle : je ne connais pas d'autre programme de grande échelle qui ait été capable de fédérer des gens de toute l'Europe pendant si longtemps. Ça n'a pas été sans discussion. La discussion est même inhérente à ce programme et je pense que c'est ce qui fait sa richesse, pour développer des méthodes qui peuvent ensuite être appliquées au niveau européen. Bien sûr, il y a des difficultés, des problèmes ici et là, mais c'est inévitable à une si vaste échelle.

Nous avons donc des experts pour presque tous les aspects que nous mesurons, et ils se réunissent pour développer des procédures communes d'assurance qualité, comme on le verra dans les présentations suivantes.







Une autre de nos forces, c'est ce que nous appelons la base de données collaborative. Il y a beaucoup d'autres réseaux en Europe, comme par exemple celui des inventaires forestiers nationaux, qui pour des raisons historiques suivent un chemin différent. Les inventaires forestiers ont été conçus sur des fondements strictement nationaux depuis les années 1920, au moins pour les pays scandinaves. Aujourd'hui, on assiste à une phase de rapprochement et d'harmonisation de leurs résultats. Le PIC Forêts a eu une approche différente : il est né au niveau international. La dimension internationale est donc constitutive du PIC Forêts. Ainsi toutes les méthodes employées pour la collecte des données et pour leur convergence vers la base de données centrale ont été conçues d'emblée dans un but d'harmonisation.

Est-ce qu'on y est réellement arrivé ? Oui, pour l'essentiel. Et c'est là un autre de nos points forts : des procédures consolidées pour la vérification, le contrôle des données, et pour leur mise à disposition de tous les scientifiques qui en ont besoin.

Le PIC Forêts est-il toujours pertinent ?

L'activité que nous avons développée ces 30 dernières années est-elle pertinente, et à quelles fins ? J'ai déjà dit que le PIC Forêts répondait à une demande politique née de l'inquiétude soulevée par la pollution atmosphérique et par ses effets sur les forêts. Aujourd'hui, il ne répond plus à une seule mais à **plusieurs demandes politiques.**

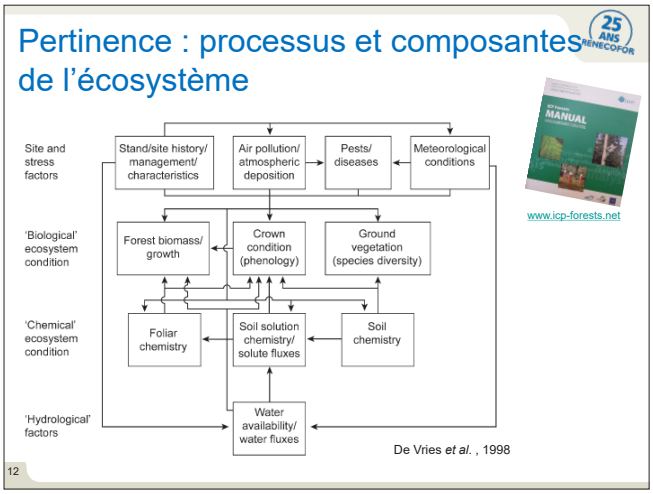
Nos données servent par exemple à renseigner au moins un des six **critères de la gestion forestière durable.** Dans le rapport sur l'état des forêts d'Europe (*State of Europe's Forests*), on voit que les indicateurs du critère 2 se fondent presque tous sur le PIC Forêts.

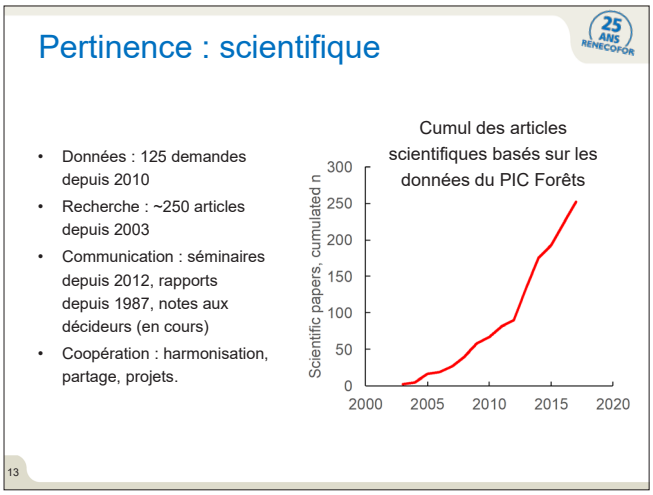
Il est pertinent aussi pour le **changement climatique**, et à plusieurs titres. Nous mesurons tout ce qui est nécessaire pour estimer, notamment, la contribution de la forêt à la séquestration de carbone, mais pas seulement. À partir de nos données, par exemple, Marc Hanewinkel et ses collègues ont pu modéliser la valeur future des forêts dans les prochaines décennies en tenant compte des effets du changement climatique et des changements de répartition des espèces forestières (article publié dans Nature climate change). Et il est pertinent pour la **biodiversité**. Nous collectons des données non seulement sur la diversité des arbres forestiers mais aussi sur celle des plantes vasculaires ou des lichens dans un grand nombre de sites.

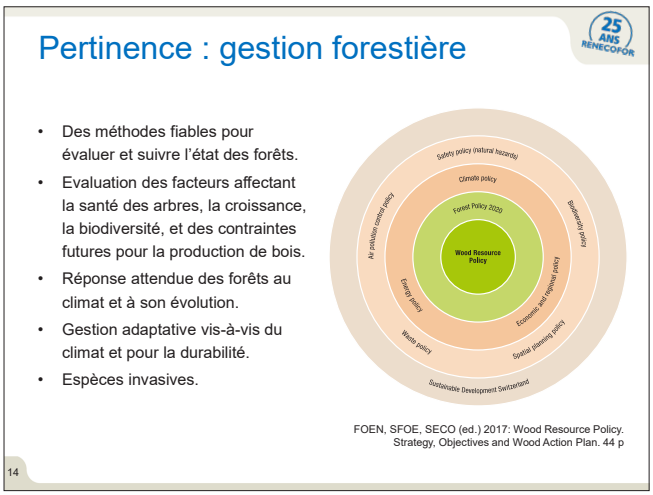
Ces trois thèmes, gestion forestière durable, changement climatique et biodiversité, sont tous très présents dans l'agenda politique ; et nous y apportons une contribution.

D'autre part nous sommes pertinents en termes de couverture. Nous travaillons sur une grande échelle en Europe et au-delà. Grâce à ça, nos sites de suivi englobent les principaux types forestiers d'Europe. En fait, la classification des types de forêts européennes repose dans une large mesure sur les données du PIC Forêts.

La couverture vaut aussi dans le temps, sur le long terme, c'est-à-dire depuis 1986 jusqu'à aujourd'hui, pour les séries les plus longues.







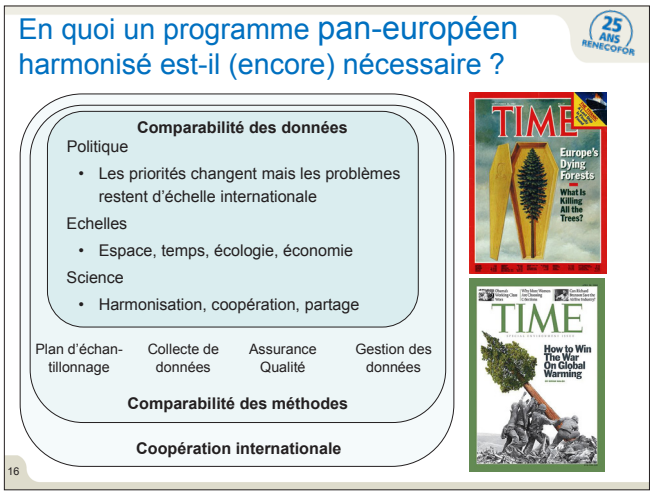
Nous sommes pertinents en termes de couverture des processus et des composantes de l'écosystème. Voici un vieux schéma de Wim de Vries et ses collègues (1998), qui reste d'actualité à mon sens. Il montre la matrice complexe des mesures et des connexions entre différentes composantes de l'écosystème, différentes variables que nous pouvons étudier avec nos données.

Nous sommes aussi pertinents pour la science, et je dirais même de plus en plus. Vous voyez ici la progression du nombre cumulé d'articles scientifiques fondés sur les données du PIC Forêts depuis 2003. Aujourd'hui, nous en sommes aux alentours de 250 articles, et vous pouvez voir une brusque accélération à partir de 2012, à peu près au moment où nous avons lancé les colloques scientifiques du PIC Forêts. Nos données sont donc de plus en plus utilisées et nous avons eu ces dernières années plus de 125 demandes de chercheurs intéressés par notre travail.

Enfin nous sommes pertinents pour la gestion forestière. J'ai utilisé une figure de la *Politique de la ressource bois* en Suisse, juste pour démontrer que même les sujets qui paraissent très loin des enjeux liés à la pollution atmosphérique considèrent différents facteurs qui peuvent impacter la ressource bois dans le futur. Le climat et d'autres facteurs de stress ont à voir avec la production de bois et seront certainement à considérer à l'avenir. Avec nos mesures nous pouvons fournir aux gestionnaires des informations sur les facteurs qui affectent la santé des forêts, la diversité, la croissance, et la façon dont les forêts vont répondre demain au changement climatique.

Le PIC Forêts fournira aussi des données sur les espèces invasives. Il fournira des données pour élaborer une gestion adaptative vis-à-vis du climat. Je pense que c'est aussi particulièrement pertinent et qu'une grande part du potentiel du PIC Forêts est encore inexploitée.

Photo : Sébastien Macé, ONF



Un programme pan-européen est-il encore nécessaire ?

Oui, et pour plusieurs raisons.

Par exemple en termes de politique. Notre programme a un fondement politique, donc les enjeux politiques sont un déterminant important de notre développement, même si les priorités changent. Vous voyez ici la couverture du même magazine à 25 ans d'intervalle : la première montrait un sapin dans un cercueil, la seconde parle de la guerre contre le changement climatique. Donc les priorités des politiques ont changé et changeront encore, mais elles sont toujours de dimension internationale et nous sommes un programme international.

De plus, nous embrassons les échelles écologique, spatiale, économique et temporelle depuis plusieurs décennies. Et nous avons un rôle pivot à jouer face à plusieurs enjeux scientifiques, en particulier quand il est question d'intégration, de coopération et d'échanges d'information.

Mais comment y arriver ?

Pour cela, il faut obtenir des données comparables. Ça signifie que nous devons pouvoir nous fonder sur des plans d'échantillonnage comparables, sur des méthodes comparables de collecte des données, sur une assurance qualité et sur des traitements de données comparables.

Comment y parvenir sans avoir au départ des méthodes comparables ?

Et comment avoir des méthodes comparables sans coopération internationale ?

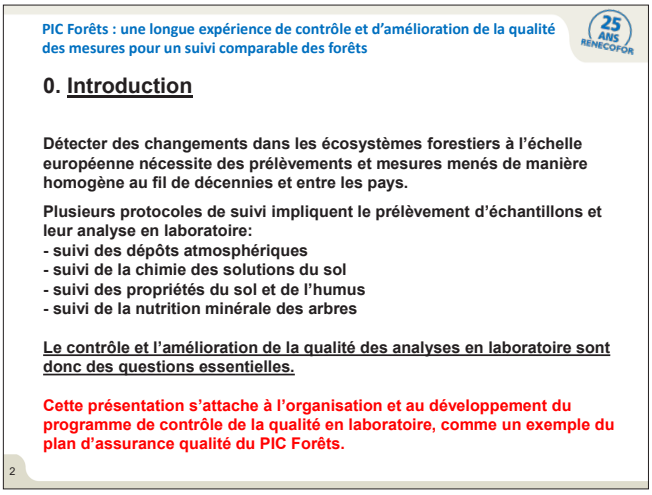
Je suis sûr, et je le dis depuis longtemps, que si pour une raison quelconque nous arrêtions le Programme International Concerté pour l'évaluation et le suivi des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts, il y aurait au bout de quelques années quelqu'un pour se plaindre : pourquoi n'avons-nous pas de programme européen de suivi des forêts ?

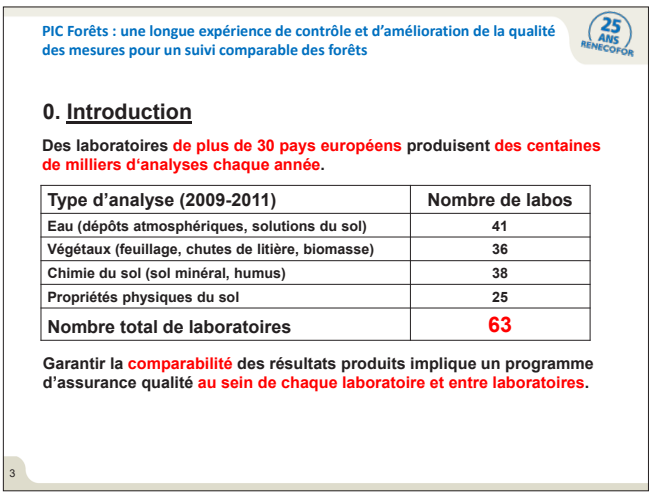
J'en termine là-dessus, pour présenter la suite de cette session avec nos trois orateurs : Nils König parlera du contrôle d'assurance qualité au sein du PIC Forêts, c'est un aspect fondamental ; Mathieu Jonard parlera de la nutrition des arbres en Europe et de sa détérioration dans les années passées ; enfin Marcus Schaub évoquera une autre menace, que l'ozone pourrait faire peser sur nos forêts.

Je vous remercie pour votre attention.

UNE LONGUE EXPÉRIENCE DE CONTRÔLE ET D'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ DES MESURES, POUR UN SUIVI DES FORÊTS COMPARABLE À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

Nils König
Institut de recherche forestière du Nord-Ouest allemand, Directeur des analyses environnementales





Je suis heureux de participer à ce séminaire ; c'est un plaisir de vous y voir si nombreux.

Je vais parler du contrôle de la qualité dans le grand réseau de suivi qu'est le PIC Forêts*, et expliquer en particulier comment on y veille à la qualité des analyses en laboratoire.

Je commencerai par des informations générales, puis je présenterai la structure du Programme d'assurance qualité en laboratoire. Ensuite je détaillerai les 4 piliers de ce programme : des méthodes harmonisées et documentées ; des dispositions de contrôle de la qualité en interne à chaque laboratoire ; un contrôle externe de la qualité *via* des tests inter-laboratoires ; et un échange d'expérience au sein des panels d'experts et groupes de travail du PIC Forêts. Et j'en arriverai à quelques conclusions.

Pour détecter des changements dans les écosystèmes forestiers à l'échelle européenne, toutes les méthodes de prélèvements et mesures, sur le terrain et en laboratoire, doivent être mises en œuvre de façon homogène sur des décennies, et bien sûr entre tous les pays contributeurs. Pour beaucoup des suivis du PIC Forêts, vous devez prélever des échantillons sur le terrain et les adresser à des laboratoires pour mesurer différents paramètres. Dans bien des domaines ces mesures reposent sur des analyses chimiques : le suivi des dépôts atmosphériques, des solutions du sol, des propriétés du sol et de l'humus, et aussi la nutrition des arbres. Par conséquent, l'évaluation et l'amélioration de la qualité des analyses en laboratoire sont un point essentiel.

Ceci dit, le programme de contrôle de la qualité en laboratoire n'est qu'un des multiples volets du plan d'assurance qualité du PIC Forêts.

Le PIC Forêts a affaire à de nombreux laboratoires, répartis dans plus de 30 pays européens, et qui produisent des centaines de milliers d'analyses chaque année. Dans certains pays, on fait appel à des laboratoires différents pour le sol, l'eau et les végétaux. Et il y a des pays comme l'Allemagne, où les laboratoires diffèrent selon les régions. La situation est donc complexe. Pour l'année 2011, par exemple, ça faisait au total 63 laboratoires dont il fallait garantir que tous leurs résultats soient bien comparables.

Et pour garantir cette comparabilité, il faut un programme d'assurance qualité au sein de chaque laboratoire et entre tous les laboratoires : c'est le principe que nous appliquons au sein du PIC Forêts.

PIC Forêts : une longue expérience de contrôle et d'amélioration de la qualité des mesures pour un suivi comparable des forêts

1. Le programme d'assurance qualité du PIC Forêts en laboratoire

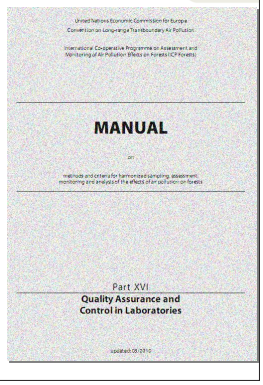
Le programme est fondé sur 4 piliers :

- L'utilisation de méthodes d'analyses harmonisées et documentées précisément,
- Un système de contrôle de qualité en interne à chaque laboratoire,
- Un système de contrôle externe via des tests inter-laboratoires coordonnés par le PIC Forêts,
- Un échange d'expérience permanent via :
  - le site Internet du PIC Forêts,
  - les réunions du groupe de travail sur la qualité en laboratoire,
  - et les réunions des directeurs de laboratoires.

PIC Forêts : une longue expérience de contrôle et d'amélioration de la qualité des mesures pour un suivi comparable des forêts

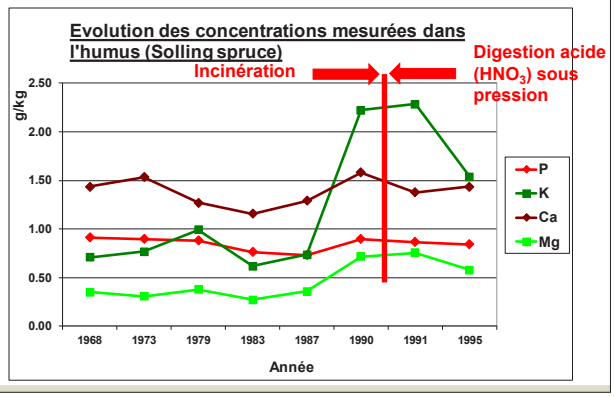
2. Des méthodes d'analyses harmonisées et documentées

- Pour produire de longues séries de données comparables, il faut utiliser des méthodes d'analyse harmonisées (méthodes de référence).
- Si de nouvelles méthodes sont développées, il faut vérifier que leurs résultats sont comparables à ceux des méthodes de référence.
- Il est très important que les méthodes utilisées soient documentées.
- Le Manuel du PIC Forêts a été constitué pour cela. Il est mis à jour de manière continue.



PIC Forêts : une longue expérience de contrôle et d'amélioration de la qualité des mesures pour un suivi comparable des forêts

Exemple: un changement de méthode sans vérification préalable



6

PIC Forêts : une longue expérience de contrôle et d'amélioration de la qualité des mesures pour un suivi comparable des forêts

3. Dispositions de contrôle de la qualité en interne à chaque laboratoire

A partir du Manuel du PIC Forêts, chaque laboratoire membre développe son propre système de contrôle.

Les fondements sont :

- l'utilisation de méthodes d'analyse harmonisées et documentées précisément (méthodes de référence du PIC Forêts)
- plusieurs tests de cohérence des résultats :
  - balance ionique
  - différence entre l'azote total et les formes d'azote inorganique
  - conductivité mesurée vs conductivité calculée selon teneurs en ions
  - gammes de valeurs vraisemblables
- La vérification de cartes de contrôle, produites par l'analyse d'échantillons de référence intercalés systématiquement dans les séries de mesure

7

La structure du programme d'assurance qualité en laboratoire

Ce programme repose sur 4 piliers. Le premier, c'est l'utilisation de méthodes d'analyses harmonisées, bien définies et bien documentées. Le deuxième est un système interne de contrôle de la qualité dans chaque laboratoire. Le troisième est le contrôle externe, avec en particulier des tests inter-laboratoires coordonnés par les organisateurs du programme. Et le quatrième consiste en l'échange permanent d'expérience, via le site internet du PIC Forêts, en réunion avec différents groupes d'experts.

Premier pilier : des méthodes harmonisées et documentées

Quand on veut garantir la comparabilité des données sur de longues séries, il importe d'utiliser les mêmes méthodes, ou bien des méthodes harmonisées ou comparables. Ce sont les méthodes de référence. Et s'il vous faut introduire de nouvelles méthodes ou instruments de mesure au fil du temps (on parle de 25 ans jusqu'ici pour RENECOFOR, 50 ans pour tout le PIC Forêts, qui a intégré des suivis antérieurs à sa création), alors vous devez vérifier que ces nouvelles méthodes sont comparables aux précédentes.

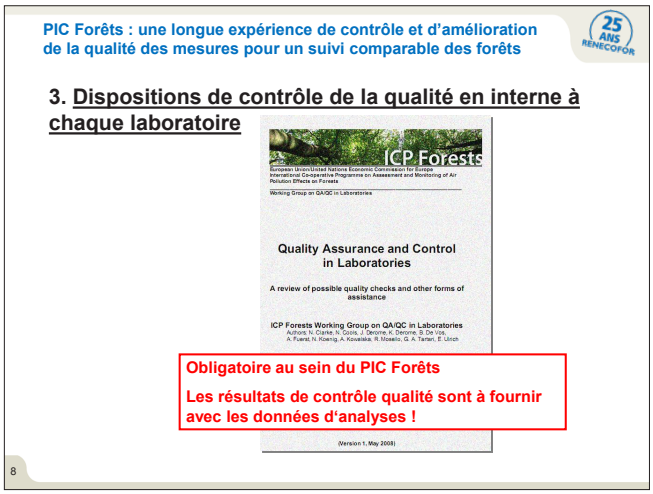
Toutes ces méthodes doivent donc être parfaitement documentées parce que vous aurez aussi à vérifier plus tard si une ancienne méthode était bien comparable. Nous avons donc élaboré à cet effet un manuel que nous mettons à jour régulièrement pour disposer d'une base méthodologique solide.

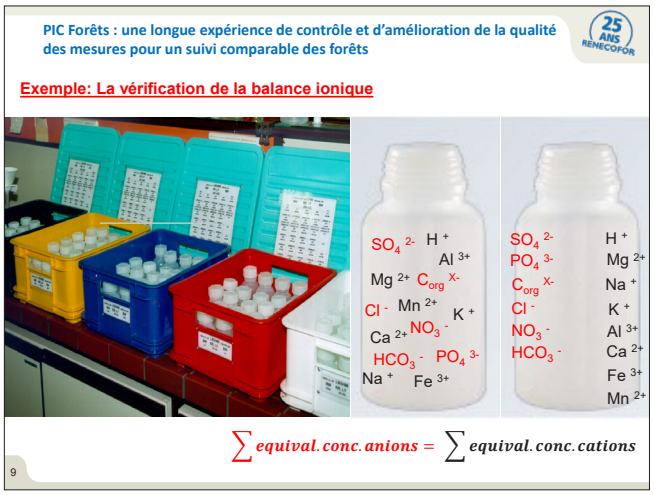
Voici un exemple de ce pourquoi il est si important d'avoir des méthodes harmonisées et comparables. Il s'agit du suivi temporel d'une placette située dans les montagnes du Solling, en Allemagne. Nous suivons ce site depuis maintenant 50 ans et vous voyez ici l'évolution des quantités de différents nutriments – phosphore, magnésium, calcium et potassium. Il semble qu'un gros changement se soit produit en 1990 : les quantités de magnésium et potassium sont bien plus élevées qu'avant et il se passe aussi quelque chose pour le phosphore. Mais il n'y a pas eu de réelle évolution sur le terrain.

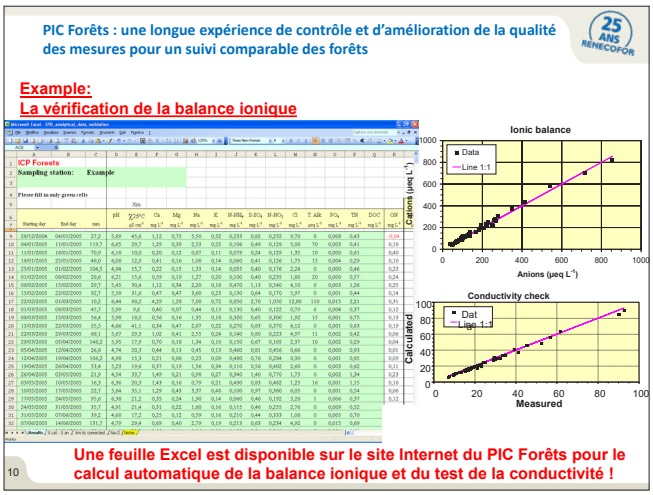
La raison, c'est qu'au début nous utilisions une méthode d'incinération pour « digérer » les échantillons alors qu'ensuite on a procédé par digestion acide sous pression (avec un acide fort). Or les deux méthodes ne sont pas réellement comparables. Du coup, ce suivi n'est pas utilisable, sauf à réanalyser tous les anciens échantillons… si on les a gardés.

Deuxième pilier : le contrôle interne de la qualité en laboratoire

La base de ce contrôle interne, c'est d'abord d'utiliser les méthodes de référence du PIC Forêts, qui sont harmonisées et bien définies ; c'est fondamental. Ensuite, il s'agit de procéder à des tests de cohérence des résultats juste après les analyses. Par exemple, on peut vérifier la balance ionique (j'y reviendrai) ; on peut vérifier la cohérence entre les différentes mesures d'azote ; on peut comparer la conductivité calculée et mesurée des échantillons d'eau… Ou encore on connaît la gamme des valeurs vraisemblables, par exemple les teneurs usuelles en phosphore dans les feuilles, et on peut vérifier que le résultat n'est pas aberrant. Le manuel propose une vingtaine de contrôles à faire directement en laboratoire pour vérifier qu'une analyse est correcte.







Un autre point très important, c'est d'analyser régulièrement des échantillons de référence (chaque jour, chaque semaine ou chaque mois), de façon à pouvoir contrôler le travail du laboratoire. On peut en faire des cartes de contrôle, pour détecter d'éventuels changements de qualité. C'est un fondement très important du travail en laboratoire et c'est pourquoi nous avons décidé d'en faire une obligation au sein du PIC Forêts.

Et donc, quand vous transmettez des résultats à la base de données centrale, vous devez aussi fournir les résultats de vos contrôles internes de qualité en laboratoire. On peut ainsi vérifier dans la base si les données viennent d'un bon laboratoire et si les résultats sont bien comparables et utilisables.

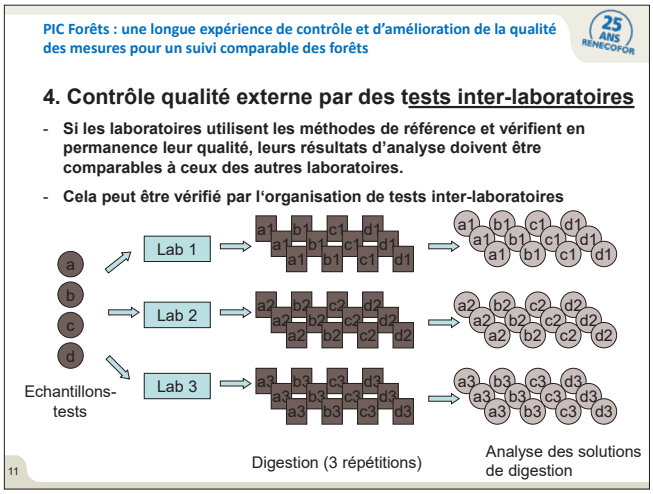
À titre d'exemple, voici comment fonctionne le contrôle de la balance ionique.

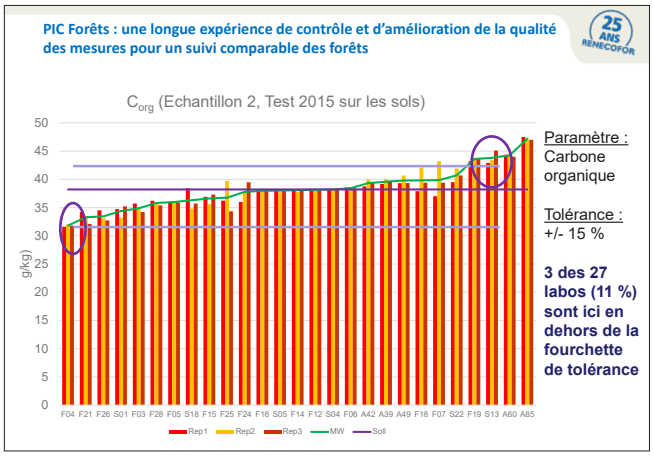
Le laboratoire a des échantillons pour lesquels il doit analyser différents paramètres avec des instruments différents et selon des méthodes différentes. Au final, il peut vérifier si la somme des anions correspond à celle des cations, parce que dans toute solution les « + » et les « - » doivent s'annuler. Les charges électriques cumulées des anions doivent être équivalentes à celles des cations. Si ce n'est pas le cas, il peut refaire aussitôt l'analyse et trouver l'erreur commise pour tel ou tel paramètre.

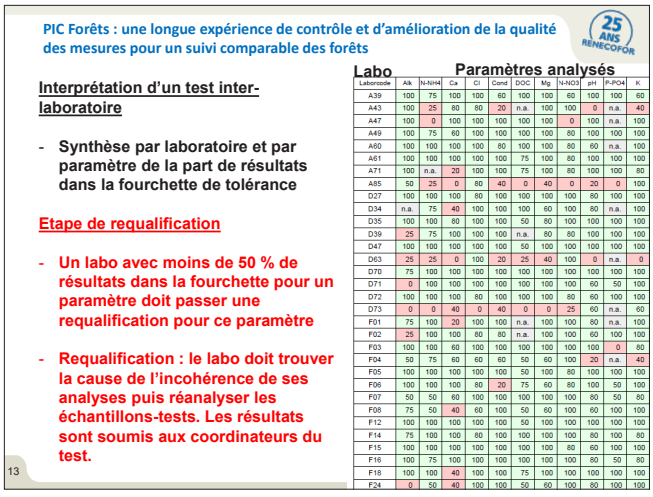
Nous avons produit un fichier Excel, téléchargeable depuis le site internet du PIC Forêts, où on peut saisir les résultats d'analyses sur les échantillons d'eau pour obtenir automatiquement les graphes de test de la balance ionique et de la conductivité. On peut voir si les points sont sur la bissectrice ou pas ; s'ils n'y sont pas, il faut refaire l'analyse.

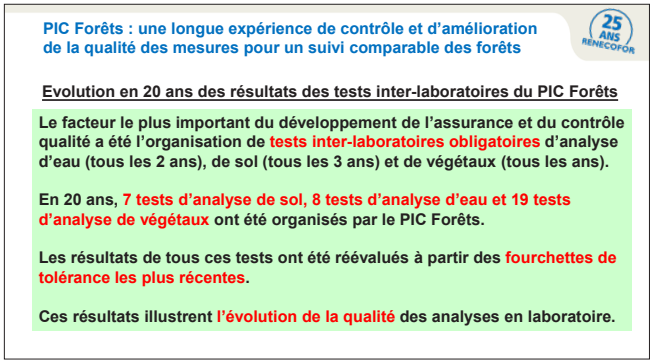
C'est donc très important d'avoir un système interne de contrôle qualité. Chaque laboratoire doit avoir le sien, mais certains points de contrôle sont communs à tous les laboratoires.

Photo : Erwin Ulrich, ONF









Troisième pilier : le contrôle externe de la qualité

Si tous les laboratoires s'autocontrôlent en continu et utilisent les méthodes de référence, alors tous les résultats doivent normalement être comparables, dans le temps mais aussi d'un laboratoire à l'autre. Et ça peut être vérifié par des tests inter-laboratoires.

Comment ça marche ?

On produit par exemple en grande quantité 4 échantillons-tests de des sols contrastés, et on les envoie aux différents laboratoires. Dans ces laboratoires, chaque échantillon est « digéré », par exemple, 3 fois ce qui fait 3 répétitions. Ensuite le laboratoire analyse les différentes solutions résultant de cette opération. Puis il envoie les données aux organisateurs du programme de suivi.

Voici un exemple de ce que ça donne pour un paramètre d'un échantillon distribué aux 27 laboratoires concernés. On distingue la série des 27 laboratoires avec 3 répétitions pour chacun. La ligne bleue représente la moyenne de tous les laboratoires ; de part et d'autre on a les limites de tolérance, entre lesquelles les résultats devraient se trouver. Vous pouvez voir que les résultats de 3 laboratoires sont en-dehors de ces limites : 3 laboratoires sur 27, c'est-à-dire 11% environ, n'ont pas de très bons résultats.

À l'issue du test inter-laboratoire, on obtient cette vue d'ensemble de tous les résultats et on voit, pour chaque paramètre et chaque laboratoire, la proportion de résultats acceptables et quels sont ceux qui ne le sont pas.

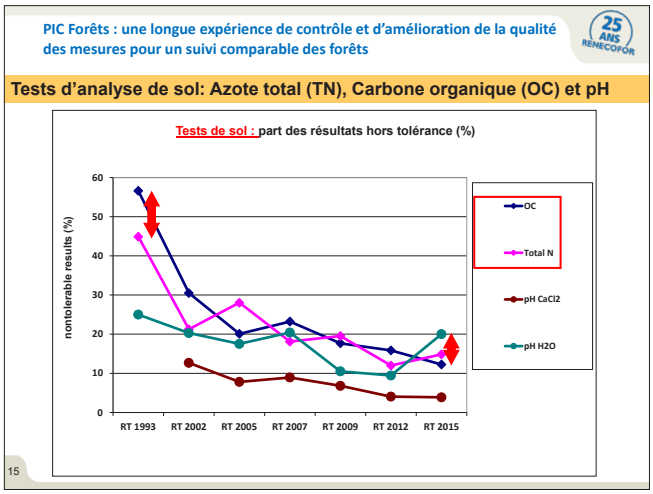
Finalement, et c'est très important, un laboratoire qui a moins de 50% de bons résultats pour un paramètre doit passer par une étape de requalification. Cela signifie qu'il doit trouver d'où vient son erreur pour ce paramètre d'analyse et qu'il doit ensuite réanalyser tous les échantillons et adresser les résultats aux organisateurs du test, avec toute l'information sur l'origine du problème.

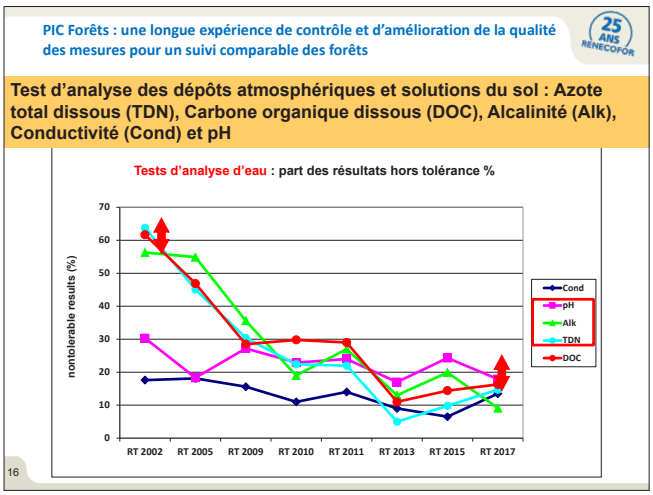
Après quoi nous espérons que ce laboratoire rendra des résultats corrects pour ce paramètre.

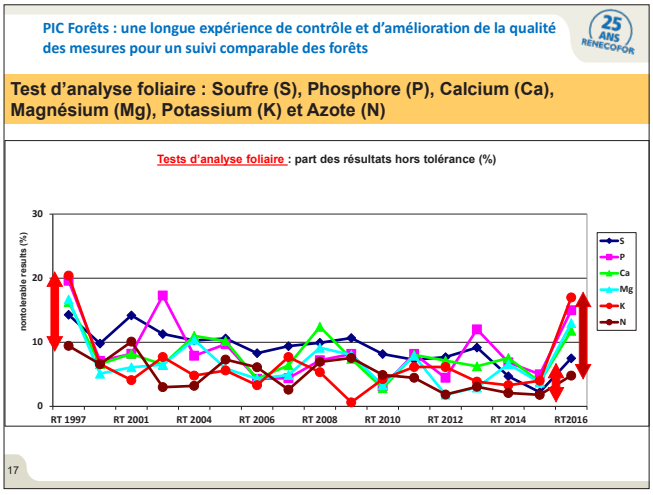
Il est intéressant de se pencher sur les résultats de ces tests inter-laboratoires, avec maintenant 20 ans de recul.

Nous pensons que la participation obligatoire aux tests inter-laboratoires a été l'élément le plus important de notre programme d'assurance qualité. Aujourd'hui nous en faisons chaque année pour les échantillons de feuilles, tous les 2 ans pour les échantillons d'eau et tous les 3 ans pour les sols.

En 20 ans, le PIC Forêts aura ainsi organisé 7 tests inter-laboratoires pour les analyses de sol, 8 pour les analyses d'eau et 19 pour les analyses foliaires. Nous avons réévalué tous ces tests d'après les fourchettes de tolérance les plus récentes, pour comparer les résultats dans le temps, et nous avons pu suivre l'évolution et l'amélioration de la qualité dans les laboratoires.







Je vais vous montrer cette évolution au cours des 20 dernières années pour les 3 types d'échantillons.

Voici d'abord les résultats pour 4 paramètres d'**analyses de sol** : carbone organique, azote total, et les deux types de pH. Vous voyez qu'en 1993, pour les paramètres difficiles (carbone organique et azote total), nous avions un niveau de résultats non-acceptables de l'ordre de 50%. Il y avait donc 50% de résultats vraiment mauvais, et en 2015 il n'y en a plus que 15%. Donc l'évolution a été très positive, et à l'issue de chaque test il y a eu beaucoup de discussions et de travail en laboratoire pour améliorer la qualité des analyses.

Le tableau est presque le même pour les **analyses d'eau**. Nous avons aussi quelques paramètres difficiles, en particulier la mesure de l'alcalinité parce qu'elle nécessite plusieurs points de dosage par échantillon ; c'est parfois très délicat quand l'alcalinité est faible. L'azote total dissous et le carbone organique dissous nécessitent eux aussi des instruments très performants.

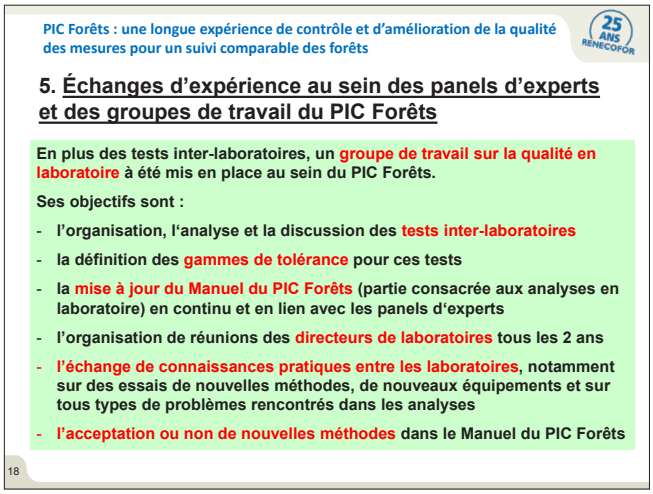
Là encore l'évolution a été très positive depuis les premiers tests organisés en 2002 : 60% environ de résultats non acceptables au départ, et 15% aujourd'hui.

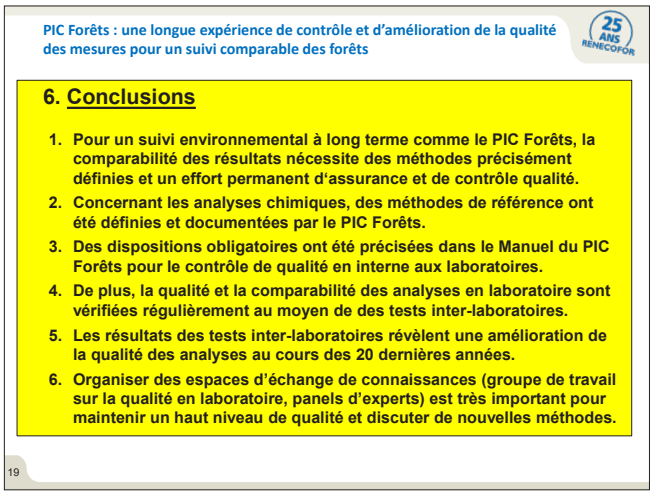
Mais ce n'est pas toujours comme ça. Par exemple, pour les **analyses foliaires**, nous avons commencé en 1997 avec des résultats vraiment bons, seulement 10 à 20% de résultats non acceptables, et en 2015 nous n'en avions plus que 5%. Mais vous pouvez voir que la dernière année, en 2016, les résultats se sont dégradés. Cela montre que la qualité demande un effort continuel pour détecter d'éventuels problèmes. Peut-être que de nouveaux laboratoires ont intégré notre groupe, ou quelque chose comme ça, je ne connais pas la raison exacte de cette dégradation en 2016. En tout cas ça montre qu'il ne faut pas relâcher notre effort de contrôle entre les laboratoires et au sein de chacun d'eux.

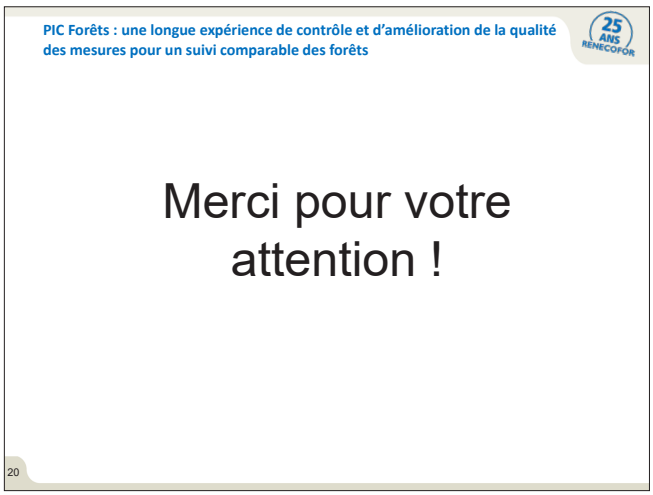
Photo : Erwin Ulrich, ONF

Photo : Jean-François De Falvard, ONF

Prélèvement des échantillons foliaires







Quatrième pilier : l'échange d'expérience entre experts

Le quatrième et dernier pilier, c'est l'échange d'expérience au sein des panels d'experts et du groupe de travail sur l'assurance et le contrôle qualité. C'est en 2002, ici en France, qu'est née l'idée d'un groupe de travail dédié à la qualité des analyses en laboratoire. C'était à l'occasion d'une réunion du groupe d'experts sur les dépôts atmosphériques, organisée par Erwin Ulrich (premier responsable RENECOFOR) et l'Italien Rosario Mosello, qui rassemblait pour la première fois les membres des laboratoires concernés pour confronter, après un test inter-laboratoires, leur connaissance pratique des méthodes d'analyse. Et nous avons estimé qu'il fallait élargir ces échanges d'expérience à tous les chimistes des laboratoires participants.

Nous avons donc constitué ce **groupe de travail sur la qualité en laboratoire**, dont les objectifs sont d'organiser et évaluer l'ensemble des tests inter-laboratoires, de définir les gammes de tolérance de ces tests, de réviser en continu le manuel du PIC Forêts (pour ce qui concerne les analyses) en lien avec les autres panels d'experts, et enfin d'organiser des réunions bisannuelles des chefs de laboratoires. Car nous pensions qu'il fallait être en contact avec les praticiens qui connaissent les procédés, les problèmes, etc. Il y a eu 6 réunions de ce type, dont la dernière a eu lieu dernièrement à Pallanza (Italie). Nous y discutons des méthodes d'analyses, notamment de nouvelles méthodes et comparaisons de méthodes, ainsi que du problème spécifique des instruments : il y a en Europe beaucoup d'instruments et de fournisseurs différents, et il est nécessaire de se tenir au courant. Finalement, c'est le groupe de travail sur la qualité en laboratoire qui décide l'adoption ou non de nouvelles méthodes, en faisant auparavant un test inter-laboratoires pour vérifier si elles sont comparables.

En conclusion

Un programme de suivi à long terme comme le PIC Forêts (dont le réseau RENECOFOR), nécessite des méthodes bien définies et un contrôle permanent de la qualité, de façon que les résultats acquis soient bien comparables.

Pour les analyses chimiques, cela suppose d'utiliser des méthodes de référence, qui sont très clairement définies et dûment documentées dans le manuel du PIC Forêts. Ensuite, il faut un contrôle systématique de la qualité des analyses en laboratoire. Toutes les méthodes correspondantes sont publiées dans le manuel de sorte que chaque laboratoire puisse se les approprier. De plus, les tests inter-laboratoires permettent de contrôler la qualité des laboratoires et de vérifier la comparabilité de leurs résultats dans le temps. Le bilan de ces tests révèle qu'ils ont été très utiles et que la qualité de nos laboratoires s'est nettement améliorée au fil du temps. Nous espérons devenir toujours meilleurs, mais il y a parfois des « rechutes ».

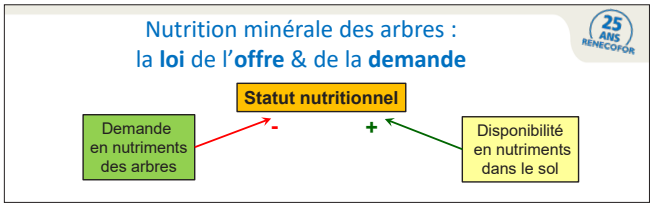
Enfin il faut entretenir un échange d'expérience permanent sur les méthodes d'analyse au sein du groupe de travail sur la qualité et des différents panels d'experts du PIC Forêts. C'est important pour maintenir un haut niveau de qualité et pour intégrer de nouvelles méthodes dans le manuel. C'est ainsi qu'on maintiendra un excellent programme de suivi sur le long terme, pour le PIC Forêts en général et le réseau RENECOFOR en particulier.

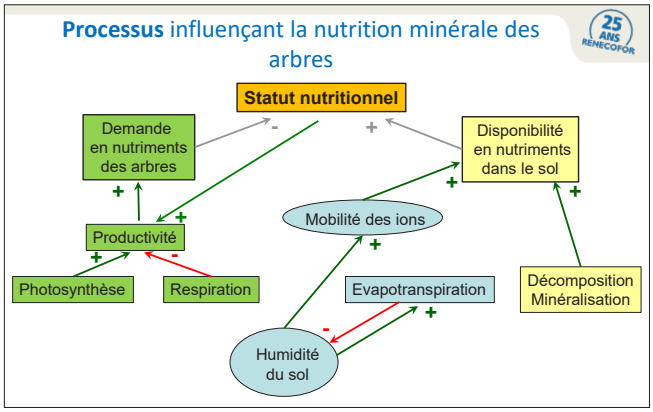
Nous espérons que nous continuerons longtemps à travailler avec nos collègues français.

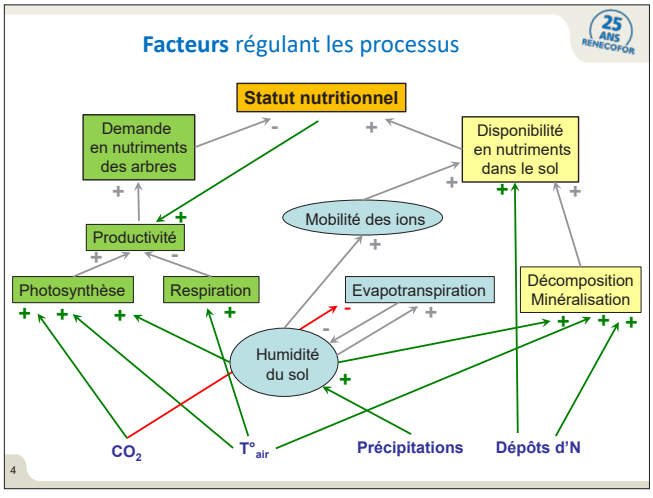
Merci beaucoup.

DÉGRADATION DE LA NUTRITION DES ARBRES EN PHOSPHORE : UN SIGNAL CONFIRMÉ À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

Mathieu Jonard
Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute







Je reviens à cette tribune pour parler non plus de carbone dans le sol mais de nutriments dans les feuilles avec la question de l'évolution de la nutrition minérale des arbres au cours du temps.

Après une première étude réalisée à l'échelle de la France, j'ai eu la chance de traiter les données d'analyses foliaires sur l'ensemble des placettes du PIC Forêts. Et c'est le résultat de cette étude que je vais présenter aujourd'hui. Mais je vous propose de poser d'abord le cadre théorique.

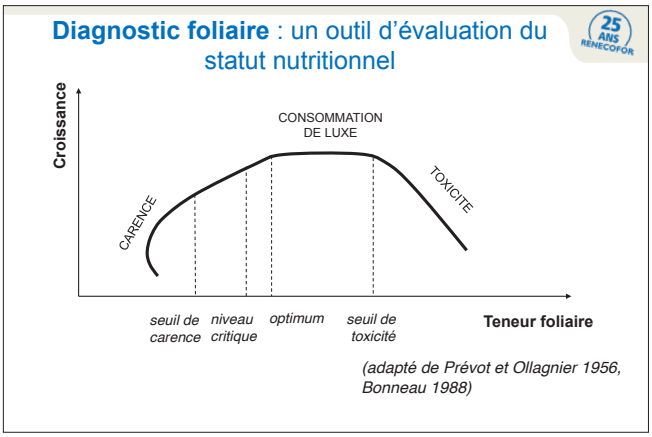
Nutrition minérale des arbres : cadre théorique

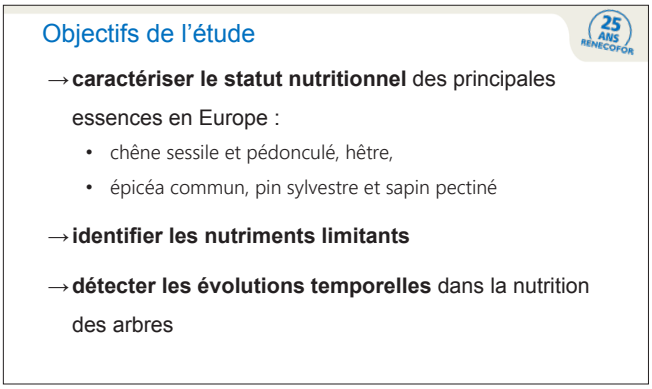
Commençons en définissant le statut nutritionnel d'un arbre. C'est une notion qui traduit en quelque sorte à quel point l'arbre dispose de suffisamment de nutriments pour assurer son développement, sa croissance, sa reproduction. Toutes choses égales par ailleurs, le statut nutritionnel aura tendance à se détériorer si la demande en nutriments de l'arbre augmente, suite par exemple à une augmentation de la croissance. Il sera par contre d'autant meilleur que la disponibilité en nutriments dans le sol sera grande.

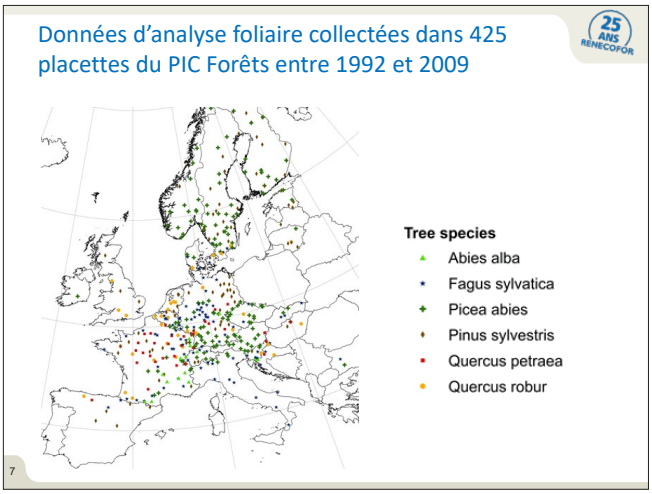
La demande en nutriments de l'arbre dépend directement de la productivité de l'arbre, qui est elle-même déterminée par une série de processus, dont deux processus majeurs : la photosynthèse et la respiration. De son côté, la réserve en nutriments dans le sol est rechargée par la minéralisation de la matière organique mais aussi par l'altération des minéraux (qui n'est pas représentée ici) ; sa disponibilité dépend également de la teneur en eau du sol, qui influence la mobilité des ions, donc leur capacité à migrer vers la racine. Et la teneur en eau dépend de tous les flux d'eau qui se produisent dans l'écosystème, en particulier l'évapotranspiration.

Tous ces flux sont tributaires du climat, des dépôts atmosphériques.

On peut donc se poser la question : comment va évoluer le statut nutritionnel si le climat change, si les dépôts évoluent ? Une manière simple de faire est d'observer comment se fait l'évolution actuellement : ceci prend un peu de temps mais on peut suivre au cours du temps le statut nutritionnel.







Dans cette optique, **le diagnostic foliaire** est un outil très intéressant. Il s'agit de prélever des échantillons foliaires, de les analyser, et de comparer les teneurs foliaires obtenues à des valeurs seuil connues. Cette approche se base sur la relation qui existe entre la croissance et les teneurs foliaires. Pour une certaine gamme de teneurs foliaires, la croissance est optimale ; en-deçà et au-delà de cette gamme, la croissance est réduite par manque ou par excès de nutriments. Ainsi on peut positionner différentes valeurs seuil sur la courbe. D'abord le seuil de carence, qui correspond à une réduction assez forte de la croissance et à l'apparition de symptômes comme par exemple le jaunissement des feuilles de hêtre suite à une carence en magnésium. Puis il y a le niveau critique qui correspond à une perte de croissance de 10% environ, l'optimum qui est la valeur la plus basse de la gamme des concentrations pour une croissance optimale, et enfin le seuil de toxicité qui est la valeur la plus élevée de cette gamme. Sur la base de ces seuils, on peut déterminer le statut nutritionnel des arbres.

Les objectifs de l'étude et les données disponibles

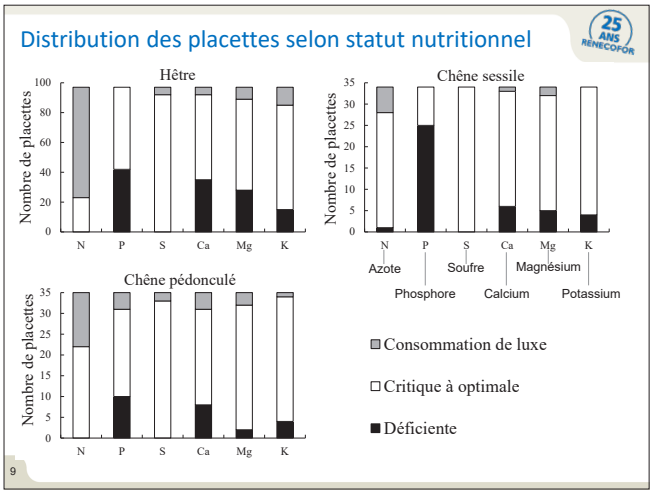
Le premier objectif de l'étude était de caractériser le statut nutritionnel des principales essences en Europe pour lesquelles on avait suffisamment de données. Pour les feuillus, ce sont les chênes sessile et pédonculé et le hêtre, et pour les résineux, l'épicéa, le pin sylvestre et le sapin pectiné.

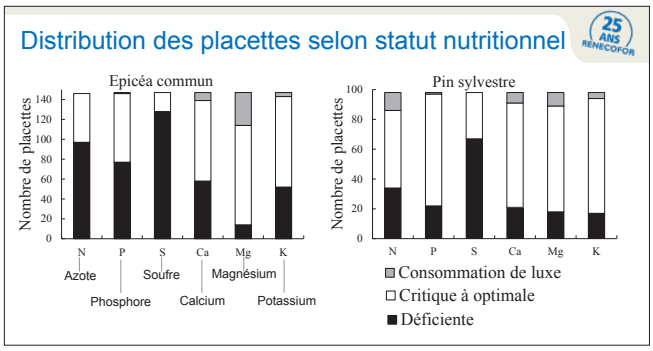
Caractériser le statut des nutritionnel des grandes essences, donc, et identifier les nutriments limitants. Le deuxième grand objectif était de détecter les évolutions temporelles dans la nutrition des arbres.

Pour ça, j'ai eu la chance de disposer d'un excellent jeu de données qui comprend l'ensemble des données d'analyses foliaires collectées entre 1992 et 2009 dans plus de 400 placettes du PIC Forêts réparties dans toute l'Europe. Un des grands avantages du jeu de données, comme Nils König l'a expliqué, c'est qu'on travaille avec des méthodes harmonisées entre les différents pays et qu'on a un programme très rigoureux d'assurance qualité et de vérification de la comparabilité des résultats.

Brièvement, comment se fait l'analyse foliaire ? On prélève des feuilles dans le tiers supérieur de la couronne, sur un minimum de 5 arbres par placette. Pour les résineux, on sépare les aiguilles en fonction de leur âge. Les échantillons sont séchés, broyés puis minéralisés avant d'être analysés chimiquement. Parallèlement, on détermine la masse foliaire (= masse de 100 feuilles ou de 1000 aiguilles).

Passons maintenant aux résultats.





Evolution temporelle de la nutrition foliaire

Essence	Age des aiguilles	Masse foliaire	Concentrations foliaires (mg g^{-1}) N	P	S	Ca	Mg	K
Hêtre		+++	-	---	---	-	---	
Chêne sessile			---	---	---	-		-
Chêne pédonculé		(+)						
Sapin pectiné	année en cours		--				+	
Epicéa commun	année en cours	+++			---		(+)	--
Pin sylvestre	année en cours			-	---			
Sapin pectiné	1 an			-				
Epicéa commun	1 an		-	---	--			---
Pin sylvestre	1 an					+++		

Des tendances déjà observées à l'échelle de la France (entre 1993 et 2005)

Groupes	Nb	Masse foliaire	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Cl
Chêne pédonculé - Sols acides	9				↘	↘	(↘)			↗
Chêne sessile - Sols acides	22		↘		↘↘					↗
Hêtre - Sols acides	18	↗	(↘)		↘↘↘↘		↘			↗↗
Hêtre - Sols eutrophes	8				↘	↘				↗
Douglas - Sols acides	6		↘					(↗)		
Épicéa - Sols acides	12		(↘)			(↘)				
Épicéa - Sols eutrophes	3	↗	↘			(↘)		↗		
Pin maritime - Sols acides	5				↘↘↘	(↗)				
Pin sylvestre - Sols acides	14				(↘)					
Sapin pectiné - Sols acides	6		(↘)		↘			↗↗		
Sapin pectiné - Sols eutrophes	5		↘↘							

Le statut nutritionnel des arbres, par essence

Le premier résultat concerne, pour chaque essence, la distribution des placettes selon le statut nutritionnel, classé en 3 niveaux : un niveau de carence (nutrition déficiente), un niveau intermédiaire entre le niveau critique et l'optimum et, au-delà de l'optimum, un niveau de consommation « de luxe » voire, pour certains éléments, de toxicité.

D'abord les placettes de **feuillus**. On voit que la nutrition azotée (N) est assez bonne, et que pour une proportion non négligeable de placettes c'est même une consommation de luxe, notamment pour le hêtre. Par contre, au niveau du phosphore (P), il y a un nombre important de placettes qui sont en carence (entre 30 et 70 % des placettes). Pour le soufre, la nutrition est bonne. Et pour les cations basiques (calcium, magnésium, potassium), elle est bonne en moyenne mais avec tout de même une proportion non négligeable de placettes qui présentent des carences selon les éléments, notamment au niveau du calcium (jusqu'à 30% de placettes en carence). Finalement, l'élément qui semble le plus limitant en ce qui concerne les essences feuillues, c'est le phosphore.

Pour ce qui est des **résineux**, le schéma est à peu près semblable, avec cependant certaines différences, notamment au niveau de la nutrition azotée pour laquelle la proportion de placettes en carence est bien plus importante. En ce qui concerne le soufre, les teneurs foliaires sont basses, mais on ne peut pas vraiment parler de carence parce qu'on n'avait pas de seuil ; dans ce cas les placettes ont simplement été classées en 3 niveaux de concentration (basse, moyenne ou élevée). Pour les cations basiques, c'est un peu comme chez les essences feuillues. Finalement, il semblerait qu'il y ait pour les résineux une co-limitation encore forte par l'azote et le phosphore, sans doute en lien avec l'impact, dans le jeu de données, des placettes résineuses des pays nordiques.

Qu'en est-il des évolutions temporelles ?

Voici un tableau qui reprend les essences en distinguant, pour les résineux, les aiguilles de l'année des aiguilles d'un an, et qui récapitule les tendances qui se sont montrées significatives sur la période 1992-2009. Quand il n'y a pas de signe « + » ou « – », c'est qu'il n'y a pas d'évolution. On remarque que, lorsqu'il y a une évolution significative de la masse foliaire, c'est à la hausse, alors que pour les teneurs foliaires, ce sont plutôt des évolutions à la baisse en ce qui concerne l'azote, le phosphore et le soufre et aussi le potassium. Pour le calcium et le magnésium, on a des évolutions à la baisse dans les peuplements feuillus et des évolutions plutôt à la hausse – quand il y en a – pour les peuplements résineux.

Ces résultats sont très semblables à ceux qu'on avait obtenus quelques années auparavant à l'échelle de la France, sur la période 1993–2005. Il y avait des essences supplémentaires (Douglas, pin maritime), et on avait distingué les types de sol. Les tendances détectées étaient les mêmes : augmentation de la masse foliaire et diminution des teneurs.

Evolution temporelle de la nutrition foliaire

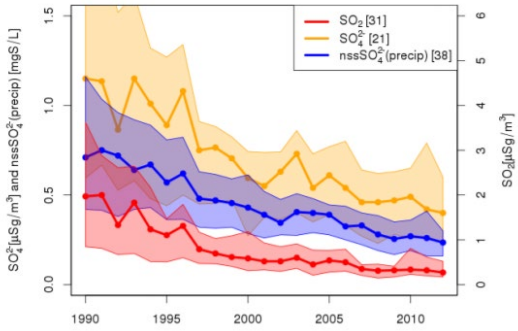
Essence	Age des aiguilles	Masse foliaire	Concentrations foliaires (mg g^{-1}) N	P	S	Ca	Mg	K
Hêtre		+++	-	---	---	-	---	
Chêne sessile			---	---	---	-		-
Chêne pédonculé		(+)						
Sapin pectiné	année en cours		--				+	
Epicéa commun	année en cours	+++			---		(+)	--
Pin sylvestre	année en cours			-	---			
Sapin pectiné	1 an			-				
Epicéa commun	1 an		-	---	--			---
Pin sylvestre	1 an					+++		

- Masse foliaire ↗ ⟹ fertilisation par ↗ du CO_2 atm. et dépôts d'N
- ↘ teneurs foliaires en N et S ⟹ ↘ dépôts atmosphériques
- Masse foliaire ↗ ⟹ teneurs ↘ ⟹ effet de dilution ?

13

Comment expliquer ces tendances ? Je vais seulement pouvoir émettre des hypothèses.
On peut relier l'augmentation de la masse foliaire à une augmentation de la productivité qui viendrait de l'effet « fertilisant » du CO_2 atmosphérique et des dépôts d'azote. C'est le genre de résultat qu'on observe également dans les expériences d'enrichissement en CO_2 ou dans les dispositifs de fertilisation. La baisse des dépôts atmosphériques peut expliquer la diminution des teneurs foliaires en soufre et également en azote mais dans une moindre mesure.
Aude Bourin nous a montré (session 4) toutes les tendances constatées au niveau des dépôts. J'ai juste repris ici un graphe de l'EMEP* pour les évolutions à l'échelle européenne. On voit ici que les concentrations dans l'atmosphère en dioxyde de soufre (rouge), sulfate particulaire (jaune) et dissous dans la pluie (bleu) ont connu une forte baisse au cours du temps. Je pense que cette baisse a eu un impact direct sur la concentration en sulfate dans la solution du sol et en soufre dans les feuilles.
Pour ce qui est de l'azote, il y a une baisse également mais elle est moins prononcée et il est moins facile de dire si cette baisse des dépôts a joué un rôle significatif dans la baisse des teneurs en azote des feuilles.

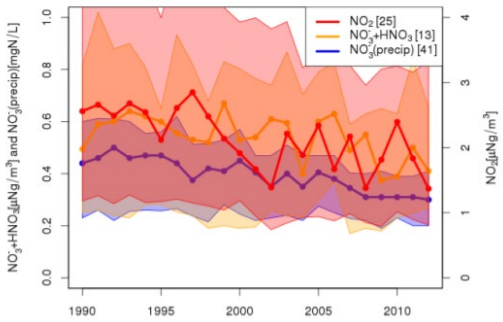
Evolution temporelle de la concentration en dioxyde de soufre, en sulfate particulaire ou dissous dans la pluie



(Colette et al., 2016)

14

Evolution temporelle de la concentration en dioxyde d'azote, en nitrate particulaire ou dissous dans la pluie

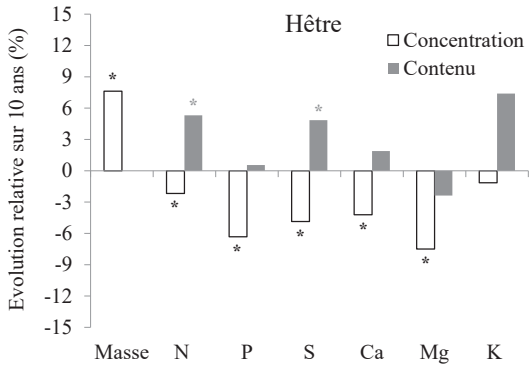


(Colette et al., 2016)

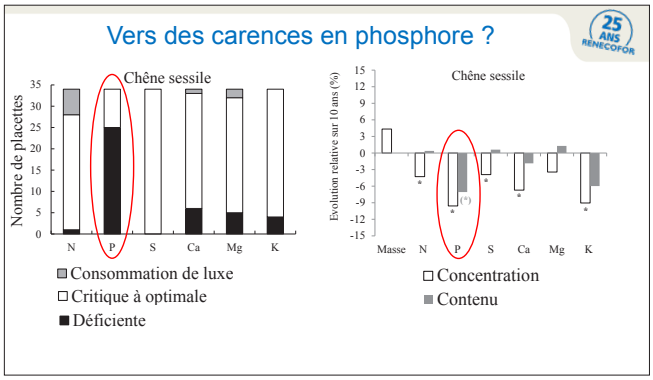
15

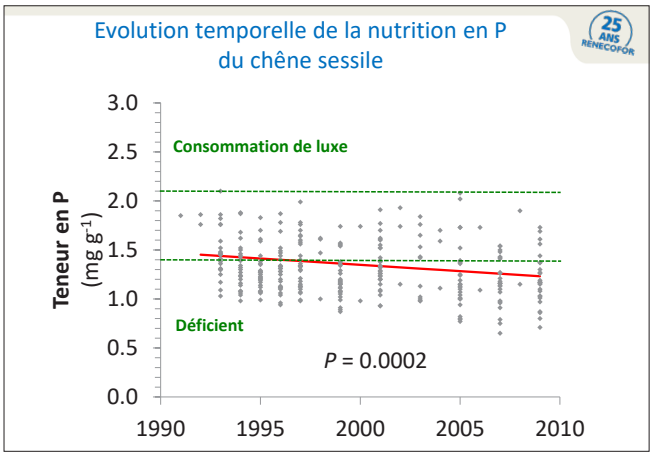
Autre hypothèse pour expliquer l'évolution à la baisse des teneurs foliaires, c'est un effet de dilution suite à l'augmentation de la masse foliaire.
Et cet effet est très bien illustré dans le cas du hêtre. On voit sur ce graphique l'évolution relative sur 10 ans pour les différents paramètres foliaires : il y a une augmentation assez nette de la masse foliaire qui se fait en parallèle d'une diminution systématique des teneurs en azote, en phosphore, en soufre, en calcium, en magnésium, à l'exception du potassium.
Diminution des teneurs (concentrations), mais pas du contenu en nutriments, c'est-à-dire de la quantité de nutriments contenus dans les feuilles, qui n'a pas évolué ou qui a légèrement augmenté. Mais cette augmentation de la quantité de nutriments n'a pas suffi à compenser l'augmentation de la masse foliaire, ce qui fait qu'on a quand même une diminution des teneurs par effet de dilution.
Alors que l'explication marche très bien pour le hêtre, c'est moins clair pour le chêne sessile : on observe une diminution systématique des teneurs foliaires alors qu'*a priori* il n'y a pas d'évolution de la masse foliaire. Pour le pédonculé, c'est le contraire : on voit une légère tendance au niveau de la masse foliaire mais pas au niveau des teneurs foliaires.

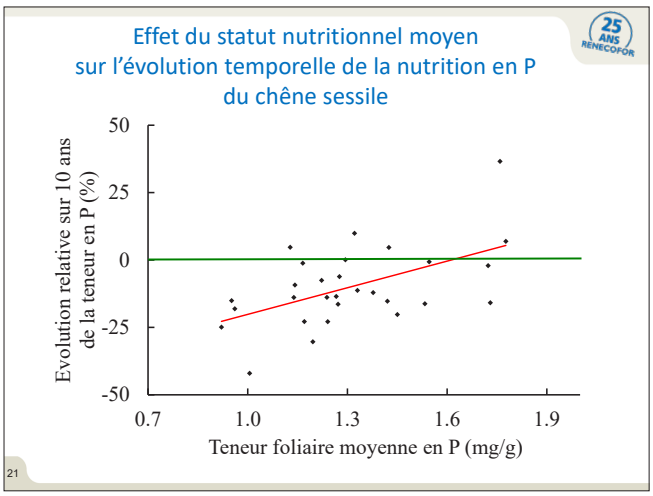
Illustration de l'effet de dilution

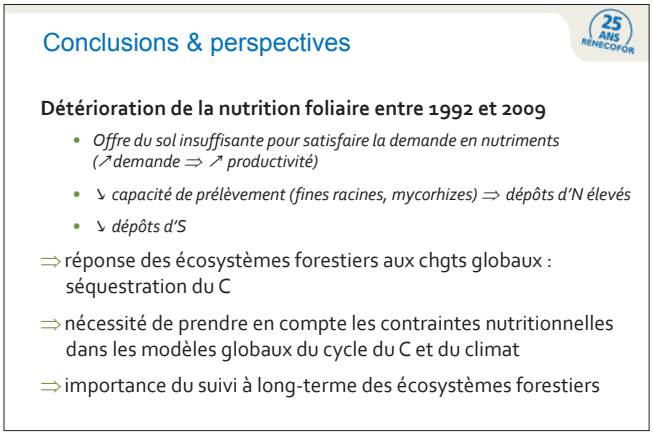


17









L'évolution du phosphore est celle qui me semble la plus préoccupante. Je vous montre ici le cas du chêne sessile, dont plus de 70% des placettes sont en carence pour le phosphore, avec en parallèle une diminution assez claire de la concentration et aussi du contenu en nutriments.

Autre manière de voir l'évolution de la teneur en phosphore au cours du temps, toujours pour le chêne sessile : on était en moyenne au niveau du seuil de carence au début de la période d'observation et petit à petit, on passe au-dessous de ce seuil de carence. Cela ne paraît pas très spectaculaire, mais pour le laps de temps considéré, au regard du cycle de vie d'un arbre, c'est une évolution assez significative.

Plus inquiétant encore, ces évolutions à la baisse sont d'autant plus prononcées que le statut nutritionnel en phosphore est bas. On a ici en abscisse la teneur foliaire moyenne en phosphore sur la période 1992-2009, pour chaque placette de chêne sessile : plus elle est basse, plus l'évolution relative (exprimée ici pour 10 ans) est négative.

En conclusion

On voit une détérioration assez nette de la nutrition foliaire entre 1992 et 2009, et il y a différentes hypothèses (je ne les ai pas toutes présentées) pour expliquer cette détérioration :

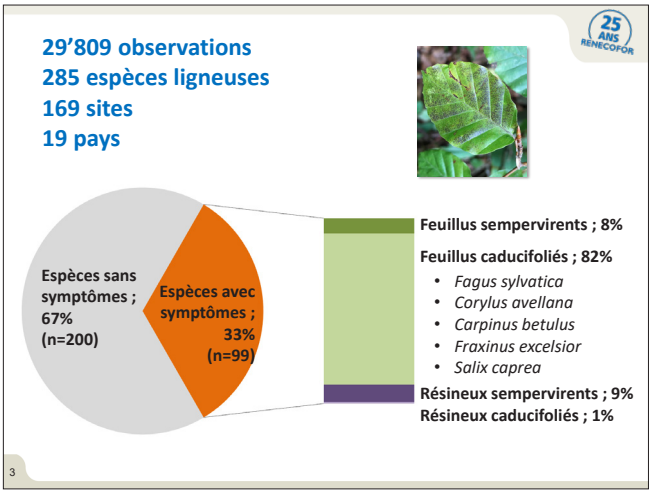
- une offre du sol qui ne suffirait pas à satisfaire la demande accrue en nutriments, liée à une augmentation de la productivité ;
- peut-être une diminution de la capacité de prélèvement des arbres du fait d'une moindre allocation de carbone aux fines racines, aux mycorhizes, suite à une nutrition azotée trop bonne (cette hypothèse ne vaut que pour les feuillus, en lien avec les dépôts d'azote) ;
- la diminution des dépôts soufrés ; ça vaut bien sûr pour les teneurs en soufre, mais la diminution de ces dépôts pourrait avoir induit aussi des effets sur la teneur en phosphore via le sol. Il se pourrait qu'il y ait eu une modification des équilibres entre le sulfate et le phosphate sur le complexe d'échange anionique du sol.

Ces contraintes nutritionnelles qui semblent augmenter avec le temps vont certainement avoir un effet sur la réponse des écosystèmes forestiers aux changements globaux et notamment sur la séquestration du carbone. C'est pourquoi je pense qu'il est très important d'essayer de les intégrer dans les modèles globaux du cycle du carbone et du climat, sinon on risque de surestimer la capacité de séquestration des forêts.
Tous ces résultats soulignent une fois encore l'importance du suivi à long terme. Si on pouvait continuer ce suivi sur une révolution voire plusieurs ça permettrait d'avoir des résultats encore plus intéressants.

Je vous remercie et je profite de l'occasion pour remercier les membres du panel d'experts du PIC Forêts sur les feuilles et les litières, qui ont tous contribué de manière directe ou indirecte à cette étude.

QUELLE CONTRAINTE LA POLLUTION À L'OZONE FAIT-ELLE PESER SUR LES FORÊTS EUROPÉENNES, AU VU DES CONCENTRATIONS MESURÉES DANS L'AIR ?

Marcus Schaub
WSL Zurich, Ecophysiologie forestière



Merci à l'équipe RENECOFOR de m'avoir invité, de me donner le plaisir de parler de nos résultats concernant cette question : quelle menace la pollution à l'ozone fait-elle peser sur les forêts ?

Pour y répondre, mon propos se divise en 3 parties. D'abord je vais parler de ce chacun d'entre nous peut observer sur le terrain. La deuxième partie touchera plutôt aux mécanismes : comment l'ozone affecte la croissance et la physiologie des forêts. Et la troisième partie traitera d'essais de modélisation pour estimer et prédire l'effet de l'ozone sur la croissance des forêts.

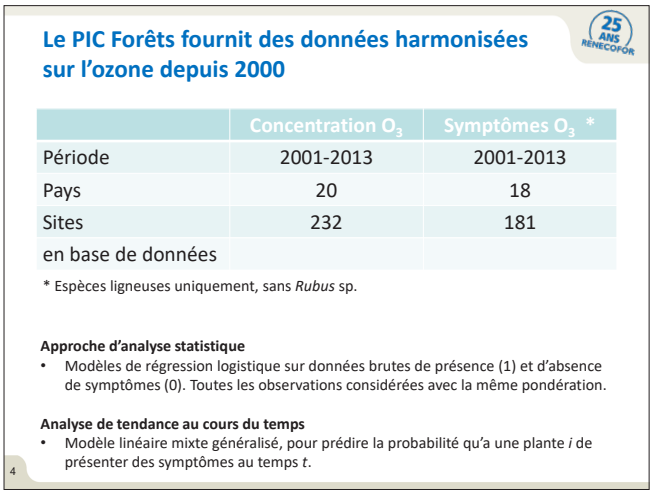
Les symptômes observés sur la végétation

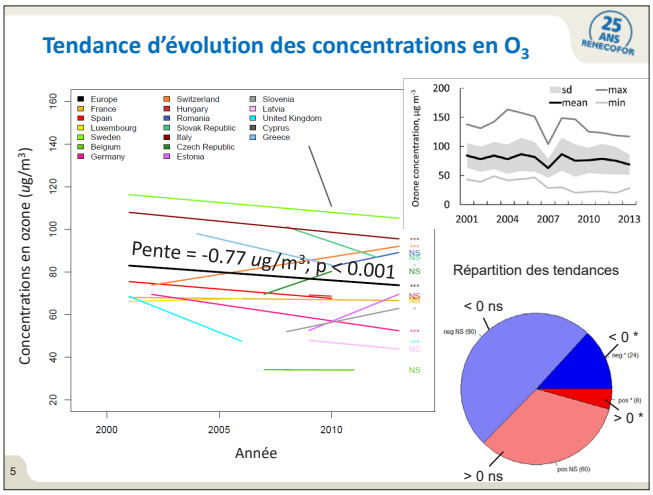
L'ozone est le seul polluant de l'air à causer chaque année des symptômes visibles sur les plantes. À qui douterait des effets de l'ozone sur la végétation, on peut montrer des symptômes manifestes, typiques de l'ozone. Par ailleurs, le dioxyde de soufre n'est plus un problème, la question est résolue pour l'essentiel (au moins en Europe centrale), mais l'ozone reste un problème. Les concentrations d'ozone dépassent les normes nationales et européennes et la végétation est affectée, avec des symptômes visibles. On en a ici quelques exemples (de haut en bas et de gauche à droite) : sur sureau, sur frêne, sur viorne lantane, sur prunellier, sur hêtre, sur frêne à nouveau, sur pin d'Alep et sur érable champêtre. Nous avons en Europe environ 300 espèces qui présentent des symptômes visibles et validés. Bien que les symptômes visibles ne soient pas le seul effet de l'ozone ni le plus important, c'est un premier indice pour évaluer le risque potentiel lié à l'ozone et déterminer les zones forestières exposées à ce risque.

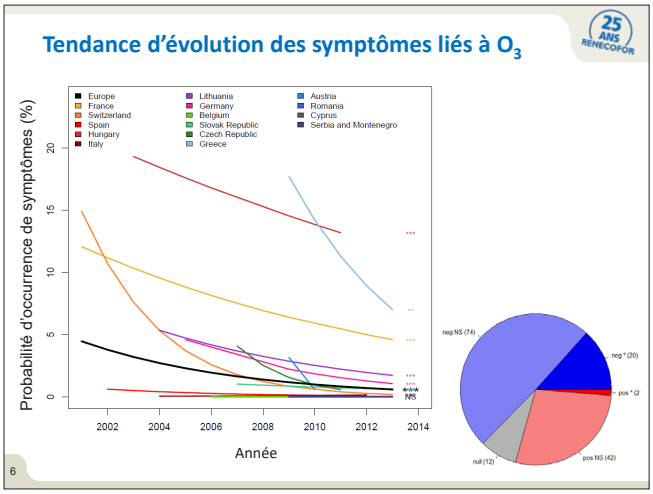
Initié en 2000, notre programme est assez récent au sein du PIC Forêts ; nous sommes le panel d'experts le plus « jeune ». Les données dont je vous parle aujourd'hui vont de 2001 à 2013, soit 13 années de suivi, pour un total de 29000 observations.

Nous avons examiné 285 espèces sur 169 sites répartis dans 19 pays européens. Vous voyez sur la figure du bas que 33% des espèces examinées présentent des symptômes, et que parmi elles on a une immense majorité de feuillus : environ 8% de feuillus sempervirents et 82% de feuillus caducifoliés (ils sont plus sensibles à l'ozone), en particulier le hêtre, le noisetier, le charme, le frêne commun et le saule marsault.

L'observation des symptômes visibles d'ozone obéit à un manuel.







En fait, nous avons 2 manuels : l'un pour les symptômes, l'autre pour la mesure harmonisée des concentrations d'ozone dans l'air.

En ce qui concerne les concentrations d'ozone, nous disposons pour la même période des données de 232 sites répartis dans 20 pays, et sur la plupart de ces sites nous avons aussi observé les symptômes d'ozone.

Pour l'analyse statistique, nous avons appliqué un modèle de régression logistique à l'ensemble des données de présence ou absence de symptômes, chaque observation ayant le même poids dans l'analyse. Le jeu de données est assez délicat car il est très déséquilibré : il y a énormément de données de valeur zéro. La plupart des plantes ou espèces observées ne présentent pas de symptôme, il y a très peu d'espèces symptomatiques en Europe. C'est pourquoi nous avons dû utiliser le modèle de régression logistique.

Pour l'analyse des tendances temporelles, nous avons utilisé un modèle linéaire mixte généralisé de manière à prédire la probabilité qu'une plante i présente des symptômes au moment t.

Vous voyez ici (à gauche) les **tendances temporelles** des concentrations d'ozone pour les différents pays : on peut constater sur ces 13 années une baisse légère, mais significative, des concentrations, de l'ordre de -0,77 microgrammes par m^3 d'air et par an. C'est un résultat intéressant car, au niveau mondial, on s'attend à une augmentation comme l'indiquent plusieurs publications. Une des principales causes serait le changement climatique : l'augmentation des températures pourrait conduire à une augmentation des concentrations d'ozone.

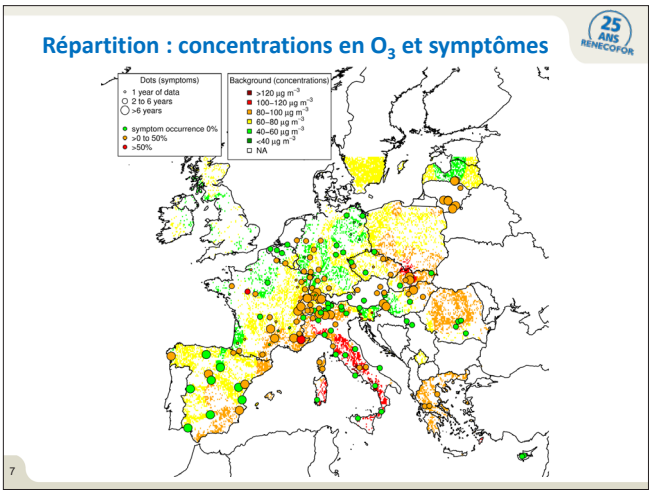
Quoi qu'il en soit, sur ces sites au sein de l'Europe, nous trouvons une tendance à la baisse. C'est d'ailleurs confirmé par le programme EMEP* : l'analyse des mesures de l'EMEP montre une tendance similaire à la baisse. Ça confirme aussi que nos données sont de bonne qualité.

Le camembert en bas à droite récapitule les tendances observées : positives (>0), négatives (<0), significatives (*) ou non (ns).

Pour les espèces symptomatiques, la baisse des concentrations d'ozone va de pair avec une baisse de la probabilité d'apparition des symptômes.

On pourrait être tenté de se dire : magnifique, on a de quoi publier dans *Nature*, ça colle parfaitement ! Mais nous savons pertinemment qu'en plus de la concentration d'ozone il y a de nombreux facteurs qui concourent à l'apparition de ces symptômes visibles.

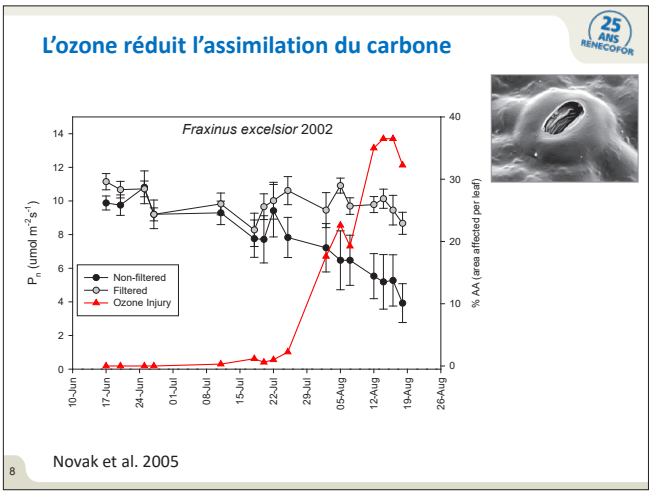
Donc ce n'est pas si simple qu'il y paraît, mais nous y travaillons et nous espérons bien pouvoir publier un jour dans une revue très cotée !



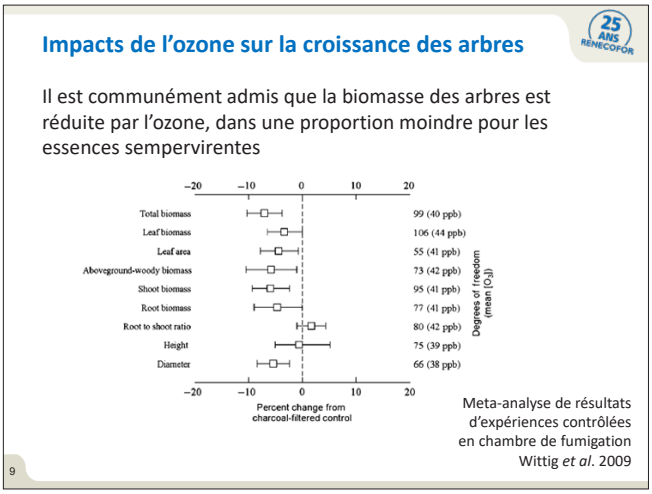
Pour ce qui est de la **distribution spatiale**, nous avons pu produire une première carte pour l'Europe. La couleur de fond indique la concentration d'ozone selon la partie droite de la légende. Et dans la partie gauche de la légende, la taille des points reflète pour chaque site le nombre d'années pour lesquelles on a des données : un petit point correspond à 1 an, un point moyen à 2-6 ans et un gros point à plus de 6 ans. Il faut savoir qu'il s'agit d'un programme volontaire au sein du PIC Forêts, donc certains pays participent sur une base régulière et d'autres de façon irrégulière. Il y a parfois des lacunes ; c'est une difficulté avec laquelle il nous faut composer, et nous devons traiter les données en conséquence. La couleur des points donne le pourcentage d'espèces présentant des symptômes : vert = 0 ; orange = 0 - 50% ; rouge = plus de 50 %. Comme vous le voyez, il n'y a pas vraiment de tendance spatiale qui se dégage. Là encore, ce n'est pas surprenant du fait des nombreux facteurs qui concourent au développement des symptômes.

Effets de l'ozone sur les forêts : quels mécanismes ?

Nous en arrivons maintenant aux mécanismes. Nous savons tous que l'ozone est mauvais pour les plantes, et l'étude de Novak *et al.* (2005) a montré que la concentration d'ozone peut réduire la photosynthèse et l'assimilation de carbone.

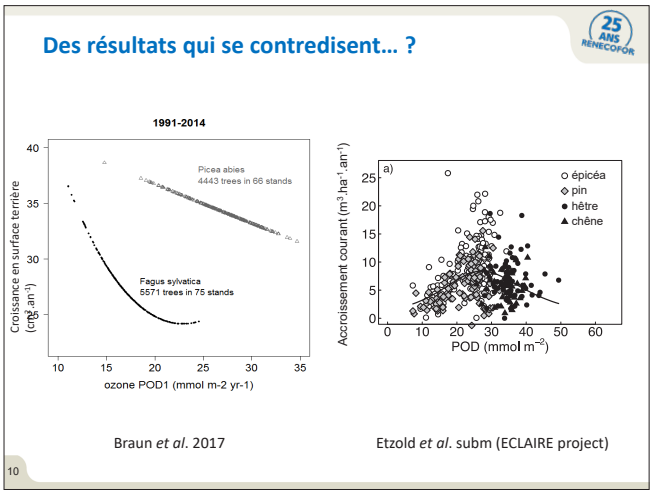


Sur cette figure (c'est une étude en chambre à ciel ouvert), les points gris correspondent à l'air filtré de façon à éliminer 50 % de l'ozone ambiant, et les points noirs correspondent à l'air non filtré, donc à la concentration ambiante en ozone. Et vous voyez qu'au cours de la saison, la photosynthèse (Pn, échelle de gauche) est fortement et significativement réduite en concentration ambiante par rapport à l'air filtré. La courbe rouge indique le développement des symptômes d'ozone (cf. échelle de droite) qui va de pair avec la réduction de la photosynthèse.

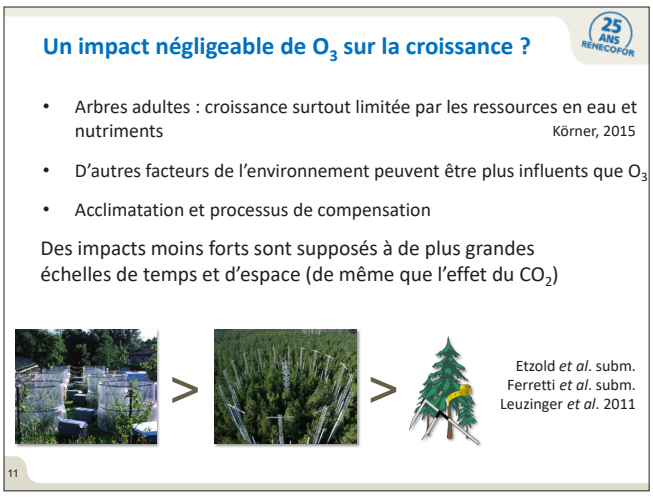


Ici, on pourrait être tenté de dire : voilà, on a répondu à la question ; l'ozone est nocif, il réduit la photosynthèse, il crée des dommages sur la forêt. D'autant qu'il y a d'autres analyses : ici la méta-analyse de Wittig *et al.* (2009) qui compile tous les résultats de différentes expérimentations en conditions contrôlées. Vous pouvez voir que la plupart des études ont trouvé des effets négatifs dus à l'ozone : réduction de la biomasse totale, réduction de la masse foliaire, de la surface foliaire, de la biomasse ligneuse aérienne, de la biomasse des pousses, etc.

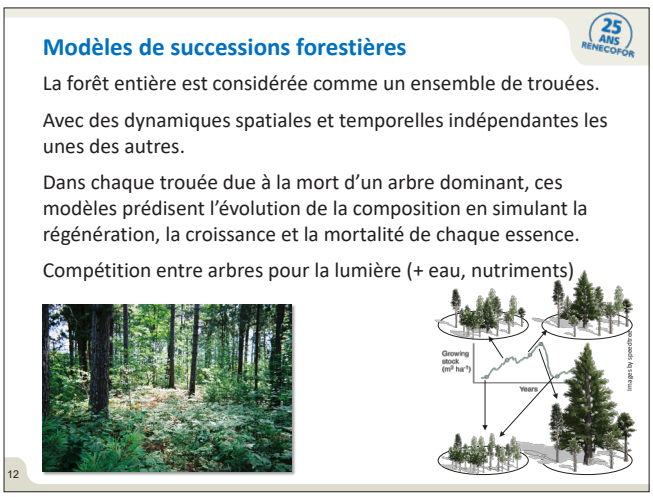
Mais là encore, ce n'est pas si simple. La plupart de ces résultats sont basés sur des jeunes plants en conditions contrôlées ou semi-contrôlées. La question la plus importante, et qui reste ouverte, c'est comment l'ozone affecte l'écosystème forestier et la croissance des arbres adultes.



Nous avons des premiers résultats pour les écosystèmes forestiers en Europe et pour la Suisse. Par exemple, Braun *et al.* (2017) ont trouvé une forte réduction de la croissance en surface terrière, en relation avec le PODy d'ozone : PODy, c'est la dose phytotoxique au-dessus d'un seuil de 1 mmol/m²/an ; on dit aussi flux d'ozone. La norme européenne actuelle, dite AOT40, est basée sur la concentration d'ozone. Mais les scientifiques et les politiques travaillent ensemble à une nouvelle norme, basée sur les flux, c'est-à-dire sur la quantité d'ozone qui entre dans la feuille, dans la plante et ce qu'elle y occasionne. La nouvelle approche est donc une approche de flux. Braun *et al.* (2017) ont trouvé qu'avec une augmentation du flux on a une baisse significative de la croissance en surface terrière de l'épicéa et du hêtre. Cette étude a été menée en Suisse, de 1991 à 2014. Par ailleurs l'équipe Etzold *et al.* a récemment mené une étude à l'échelle européenne (la publication est en cours) ; il s'agit du projet ECLAIRE, auquel beaucoup d'entre vous participent probablement. Or là, aucune corrélation n'a été trouvée entre l'augmentation des flux et l'accroissement courant en surface terrière. Attention : le graphe présenté ici résulte d'une phase exploratoire destinée à tester les différents paramètres ; ne pas l'interpréter tel quel.

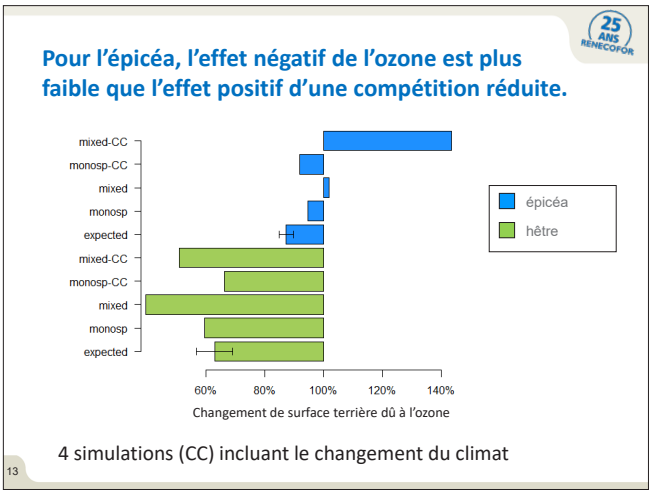


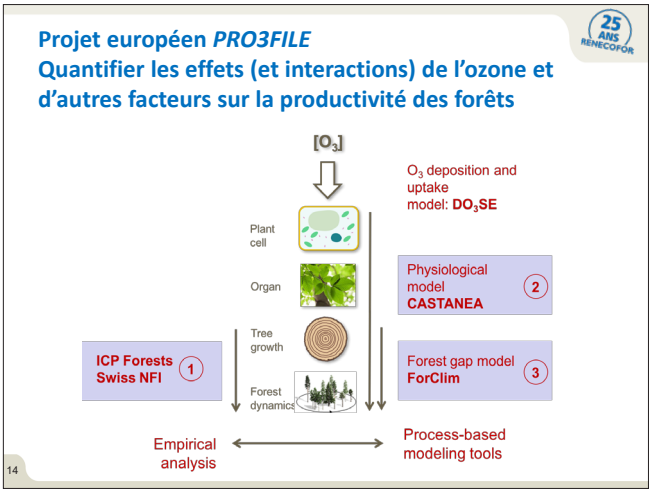
Alors que se passe-t-il ? Ces résultats sont-ils contradictoires ?
Eh bien, la réponse pourrait être ici. Plusieurs études ont montré qu'on observe des effets physiologiques en conditions contrôlées. Lorsqu'on passe à une échelle supérieure, en conditions semi-contrôlées, ces effets s'estompent déjà. Et si on cherche en forêt ces effets qu'on a trouvés en conditions contrôlées, en général on ne les retrouve pratiquement plus. Ce serait donc une question d'échelle ; c'est une conclusion importante, qui nous conduit à proposer une nouvelle approche (j'y reviens). S'agissant d'arbres adultes, la croissance n'est pas limitée par la photosynthèse, mais par la répartition du carbone assimilé, ce qui manque dans les modèles courants. De plus, j'ai indiqué que beaucoup d'autres facteurs environnementaux comme la lumière, l'humidité de l'air, l'humidité du sol, le statut nutritionnel, ont un fort impact sur la croissance forestière et sur la réponse des arbres à l'ozone. Enfin, il y a sans doute des processus d'acclimatation et de compensation qui jouent et qui n'ont pas encore été pris en compte dans les modèles utilisés jusqu'ici.
En conclusion, l'impact attendu de l'ozone pourrait être plus faible que ce suggèrent les relations d'effet dose établies en conditions contrôlées.

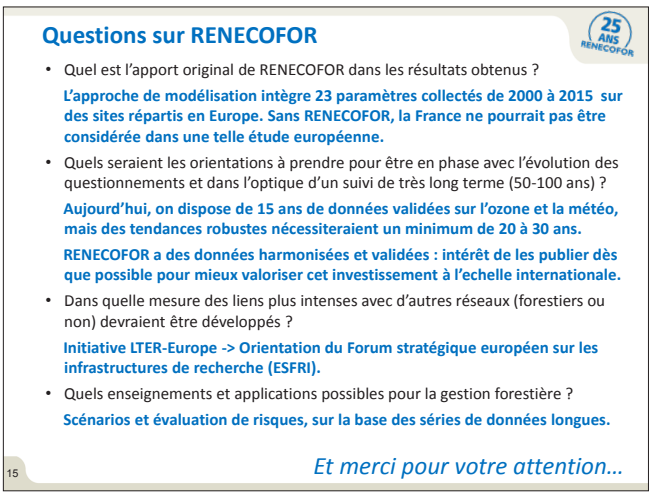


Modéliser pour comprendre

Pour sortir de ce dilemme, ou de cette situation complexe, la solution consiste selon nous à utiliser un modèle de succession forestière. Nous avons la chance d'avoir Maxime Cailleret comme post doctorant dans notre institut. Il travaille depuis plusieurs années avec le modèle ForClim que beaucoup d'entre vous connaissent, et il fait partie du groupe de modélisation CASTANEA, que vous connaissez aussi.
Nous avons essayé de prendre en compte avec ces modèles les facteurs (indiqués précédemment) qui peuvent moduler les effets de l'ozone sur la forêt naturelle. Dans un modèle de succession forestière, la forêt est considérée comme un ensemble de trouées dont les dynamiques spatiale et temporelle sont indépendantes les unes des autres. Et pour chaque trouée causée par la mort d'un arbre dominant, le modèle prédit le changement de la composition en espèces, en simulant la régénération, croissance et mortalité de chaque espèce.







Voici des premiers résultats de cette analyse. Les barres vertes correspondent au hêtre, les bleues à l'épicéa et dans les deux cas la barre du bas (avec l'écart-type) représente la réduction de croissance attendue selon les relations de réponse à des doses d'ozone. Maintenant, si on considère les autres facteurs comme lumière, trouée et mortalité, vous voyez que dans un peuplement de hêtre mélangé (*mixed*), l'effet de l'ozone peut être encore pire. Pour l'épicéa, c'est presque le contraire. Vous voyez sur la barre du bas, que l'effet attendu de l'ozone n'est que légèrement négatif. Mais en considérant l'ensemble des autres facteurs, on arrive à un effet positif en peuplement mélangé. Cela s'explique : l'ozone affecte la croissance, et la croissance est liée à la mortalité. Ainsi pour le hêtre, on suppose que l'augmentation de l'ozone réduit la croissance, augmente la mortalité et conduit de ce fait à une forte réduction de la surface terrière. Pour l'épicéa, nous avons un effet négatif sur la compétition qu'il subit : l'ozone affecte plus négativement le hêtre que l'épicéa dans un peuplement mélangé ; et du coup, en réduisant la compétition du hêtre, il peut avoir un effet positif sur la croissance de l'épicéa.

Voici donc notre proposition, notre idée, le projet européen PRO3FILE : nous voulons combiner CASTANEA, le modèle physiologique, avec le modèle de trouées ForClim. Nous allons utiliser environ 23 paramètres du réseau PIC Forêts, et nous validerons le modèle combiné tout d'abord sur des sites suisses, en prenant aussi en compte les données de l'inventaire forestier suisse. Ensuite nous appliquerons l'ensemble de la démarche à l'échelle de l'Europe. C'est donc un véritable projet intégrateur pour l'Europe, très gourmand en données, et nous comptons sur la collaboration de tous les différents pays.

Poursuivre les observations

En guise de conclusion,voici mon point de vue sur RENECOFOR.
1 - L'apport original de RENECOFOR dans nos résultats ? Nous avons intégré dans ce projet trans-européen environ 23 paramètres collectés de 2000 à 2015. Sans RENECOFOR et son excellente base de données, la France ne pourrait pas être intégrée dans de telles études à l'échelle européenne. Or il y en aura de plus en plus, et elles exigent énormément de données. S'il vous plaît, continuez vos observations.
2 - Les orientations à prendre pour être en phase avec l'évolution des questionnements ? Nous avons environ 15 ans de données validées sur l'ozone et la météo, mais une analyse robuste selon les scénarios climatiques nécessite des données sur au moins 20-30 ans. Nous avons détecté des tendances bien réelles, mais elles n'ont pas encore la robustesse nécessaire ; il faut pour cela des séries de relevés plus longues. Et surtout, pour de tels exercices de modélisation, nous avons besoin de données harmonisées et validées mais aussi publiées et ouvertement accessibles.
3 - Faudrait-il développer des liens avec d'autres réseaux ? En Suisse, je suis la personne contact pour LTER Europe (réseau européen de recherche écologique à long terme) et nous sommes impliqués dans le projet Advance LTER, le but étant de figurer dans le plan d'action du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI*). C'est un label extrêmement important qui peut nous faciliter l'accès aux financements européens. Pour plus ample information, voir le site ESFRI. Il y a une initiative en cours à laquelle les pays sont appelés à contribuer.
4 - Les applications utiles pour la gestion forestière ? Eh bien, les scénarios et l'estimation des risques basés sur de longues séries d'observation nous concernent tous, en particulier les propriétaires et gestionnaires forestiers.

Discussion

Questions / Réponses

Nicolas Delpierre, Université Paris-Sud - Marcus Schaub vient de montrer pour l'ozone qu'on peut voir les manifestations foliaires mais que les impacts sur la croissance ne sont pas évidents. Du coup, je voudrais savoir si ce type d'exercice a été fait pour la nutrition minérale, sur les données RENECOFOR ou du PIC Forêts : comparer les tendances du phosphore, par exemple, avec des tendances sur la croissance. Les teneurs minérales étant très faibles avec des carences générales très fréquentes, est-ce que c'est quelque chose qu'on observe sur les données de croissance ? Par ailleurs, quel crédit apportez-vous à la notion de carence : est-ce que les teneurs limites ont un sens du point de vue fonctionnel pour l'arbre ? On a l'impression, par exemple, d'après les graphiques présentés par Mathieu Jonard, qu'il y a des carences énormes en phosphore sur le chêne, or les croissances observées pour le chêne sont quand même assez bonnes, sur le réseau RENECOFOR notamment. Doit-on remettre en question la notion de seuil critique ?

Marcus Schaub (MS) - J'ai évoqué l'étude de Sophie Etzold sur la croissance, dans le cadre du projet ECLAIRE ; les données de nutrition font partie de cette analyse.

Mathieu Jonard (MJ) - Quant à la notion de carence, c'est vrai qu'elle un peu contrintuitive dans l'étude que j'ai présentée, s'agissant de carences qu'on suspecte être induites par une augmentation de la productivité. Ce n'est pas la carence qui limite la productivité, c'est l'augmentation de la productivité qui progressivement génère une carence. Mais on arrive à une limite. Les autres facteurs, qui favorisent la croissance, ne vont plus pouvoir agir avec la même intensité puisqu'on arrive aux limites du système dans la mesure où on perçoit que les peuplements sont en carence. Je pense que la notion est toujours valable mais il faut l'interpréter dans son contexte.

Erwin Ulrich, ONF - Je voudrais demander à Mathieu Jonard, qui a mis en évidence l'évolution des concentrations foliaires en nutriments, s'il a confronté cette évolution à celle de la qualité des analyses de laboratoire, dont Nils König a parlé précédemment, pour vérifier si ces tendances sur les concentrations foliaires sont bien réelles ?

MJ - Non. J'ai pris les données telles quelles ; je n'ai pas essayé de voir l'impact de l'amélioration progressive de la qualité des analyses. Mais Nils König a montré que la qualité des analyses pour les teneurs foliaires était très bonne dès le début. Dans ce cas précis, je pense donc qu'on peut avoir une assez grande confiance.

Nils König (NK) - Je confirme, car pour les analyses foliaires, nous avons eu des résultats vraiment bons tout le temps, et sans changement de méthode sur la période considérée. Donc pas de risque d'artéfact du type de ce que j'ai montré pour le suivi du phosphore dans l'humus sur le site du Solling.

Anne Probst, CNRS EcoLab - En ce qui concerne les données du PIC Forêts qui peuvent être sujettes à caution pour des problèmes de méthode ou qualité d'analyse, je voudrais savoir si des recommandations ont été faite aux pays confrontés à cette difficulté pour retirer leur données de la base, ou s'il y a des méthodes de filtrage sur la base pour qu'elles ne soient pas utilisées de façon erronée. Si l'utilisation des données d'analyses foliaires ne présente pas de difficultés, on a vu dans la présentation de Nils König que ça pouvait être plus problématique pour certains paramètres du sol, comme le carbone organique ; c'est un paramètre important, très utilisé et qui va l'être encore plus avec la problématique du changement climatique. Par ailleurs je voudrais savoir si Mathieu Jonard a déjà envisagé d'analyser les données sur la nutrition avec le regard des paramètres du sol, par une analyse multifactorielle par exemple, qui permettrait d'avoir un éclairage sur l'influence combinée des dépôts et paramètres édaphiques sur cette nutrition.

NK - Quand on se procure les données de la base européenne, on peut aussi télécharger les informations sur la qualité, sur le laboratoire. Si vous trouvez des résultats insolites et concentrés sur certains sites ou pays, vous pouvez consulter ces informations et voir par exemple s'il y a eu des problèmes au laboratoire pour ce paramètre. C'est une possibilité pour corriger peut-être ou retirer les données « suspectes ». Nous ne filtrons pas directement les données à l'entrée dans la base, mais elles sont contrôlées par différents programmes. Par exemple, il y a des vérifications au fil du temps pour repérer des valeurs de croissance extravagantes, des choses comme ça. Il y a aussi des vérifications avant l'entrée dans la base. Mais on ne peut pas faire tous les contrôles dans cette base. Vous devez examiner les données et les méthodes qui sont utilisées ; vous pouvez obtenir cette information, en particulier si vous voulez travailler sur des données anciennes, et vous devriez sans doute lire aussi la méta-information sur la base de données.

MJ - Pour ce qui est de la nutrition et de mettre en relation les paramètres du sol avec les paramètres foliaires, je pense que d'autres l'on fait à l'échelle européenne. Mais au niveau français j'avais essayé quelques années auparavant de voir quels étaient les déterminants des teneurs foliaires et le premier facteur explicatif qui ressort, c'est l'essence. Après, c'est vrai que le sol (classe d'acidité) influe mais pas pour tous les paramètres. Par exemple, le sol a un effet assez fort pour le calcium, mais pour l'azote et le phosphore c'est différent. À l'échelle européenne aussi on s'est posé la question : ne faudrait-il pas classer les sols et essayer de voir si les tendances de nutrition foliaire varient en fonction des types de sols ? Mais malgré le fait qu'on dispose de plus de 400 placettes, cela ne fait plus que 100-150 placettes maximum par essence, et si on segmente encore par type de sol, la puissance statistique n'est plus suffisante.

Vincent Boulanger, Département R&D à l'ONF - A-t-on suivi la manière dont les progrès méthodologiques réalisés grâce au processus d'assurance/contrôle qualité ont pu être appropriés par les sciences expérimentales ces dernières années ?

NK - Difficile de dire quelle est la cause de l'amélioration des résultats. Ça vient en partie de ce que nous avons maintenant de meilleurs instruments et que les erreurs sur différents paramètres sont moindres qu'avant. Mais c'est aussi une question d'expérience des personnels de laboratoire, de temps depuis lequel ils travaillent avec telle ou telle méthode, etc. Ainsi il est difficile de cerner l'influence de la démarche d'amélioration de la qualité, et on a vu à propos des analyses foliaires qu'on peut avoir des résultats moins bons qu'avant. Il faut donc constamment éprouver les méthodes, faire des comparaisons entre laboratoires, tester différentes méthodes. Ainsi il est parfois possible de « repêcher » les résultats d'une mauvaise méthode du passé, de corriger ces résultats quand nous savons exactement quelle était cette méthode et comment elle a été utilisée. J'en donne un exemple : quand on mesure le cuivre, il peut y avoir un problème à cause du fer également contenu dans les échantillons ; si la teneur en fer est importante, les résultats du cuivre sont incorrects. Nous avons repéré le problème, mais seulement au bout de 10 ans. Cependant, la méthode était parfaitement connue, nous avions tous les résultats de tous les échantillons de ces 10 années, et nous savions à quel niveau le fer provoquait des erreurs pour le cuivre. De sorte que nous avons pu corriger les anciennes mesures. Mais ce n'est pas toujours possible. Nous avons évalué la qualité des données dont certaines remontent à 50 ans, et là c'est difficile de retrouver les méthodes, parce qu'à cette époque elles n'étaient pas très bien documentées. En pareil cas, il faut chercher à réanalyser des échantillons avec les méthodes ancienne et actuelle pour chercher le moyen d'avoir des résultats comparables.

Laurence Dalstein, GIEFS - À propos des effets de l'ozone sur les forêts, je pense que même si les concentrations d'ozone diminuent très faiblement et si les symptômes d'ozone restent sensiblement stables où très légèrement en baisse, l'ozone est le meilleur reflet du changement climatique. On observe globalement ces tendances sur l'ensemble des essences. Mais certaines sont particulièrement sensibles comme le hêtre (pour les feuillus) ou comme les pins ; or sur les pins en altitude, on observe de plus en plus d'effets avec les années et notamment avec les fortes chaleurs. Les sites d'altitudes sont le reflet du changement climatique en priorité car vous avez l'effet non seulement de l'ozone mais aussi directement celui de la température. On a pu montrer dans nos résultats RENECOFOR, avec les épisodes de très fortes températures, que la température jouait un rôle important dans l'expression des symptômes d'ozone. Il faut donc s'en inquiéter et s'il y a quelque chose à continuer en matière de changement climatique, c'est le suivi des effets de l'ozone sur les conifères, notamment d'altitude, et aussi sur le hêtre pour les feuillus.

MS - Oui, l'ozone est lié au changement climatique. Toutefois, avec l'élévation des températures, on s'attend aussi à l'aggravation des sécheresses et par conséquent à une diminution du flux d'ozone, car les plantes ferment leurs stomates. Donc ce n'est pas simple et c'est précisément une question que nous cherchons à démêler avec le modèle CASTANEA et le modèle de trouées forestières. Comme je l'ai dit, on connaît les mécanismes pour les jeunes arbres, ça a fait l'objet de moult publications, mais pour l'écosystème forestier c'est une autre histoire, c'est bien plus complexe et on ne peut pas se contenter de dire qu'avec le changement climatique les concentrations d'ozone augmentent et que c'est un risque pour la forêt. Nous allons voir.

Marco Ferretti (MF) - Je suis un peu impliqué dans ces recherches sur l'ozone. Personnellement, je constate que, si intéressants soient-ils, les résultats expérimentaux ne correspondent pas aux réalités de terrain. Cela prédit pour la Suisse un risque de perte de croissance annuelle de 20% en cas de pollution à l'ozone. En théorie, vu les accidents survenus depuis 20 ou 25 ans, ça fait une perte de croissance assez impressionnante. Mais quand on va sur le terrain en Suisse ou en Italie (pays qui m'est plus familier), on ne voit pas ces effets. En fait, les forêts poussent bien plus vite qu'avant et on n'a pas d'observation d'effet important dû à l'ozone, même en haute altitude. En fin de compte, l'ozone est un oxydant et les arbres qui vivent en altitude sont adaptés à cette contrainte depuis toujours. C'est donc un point que je voudrais souligner et dont il faudra discuter : comment nos réseaux, RENECOFOR à l'échelle de la France et le PIC Forêts à l'échelle de l'Europe, peuvent-ils aider à réconcilier les résultats divergents provenant d'expérimentations en conditions contrôlées, d'une part, et d'observations de terrain, d'autre part ?

Photo : Sébastien Macé, ONF

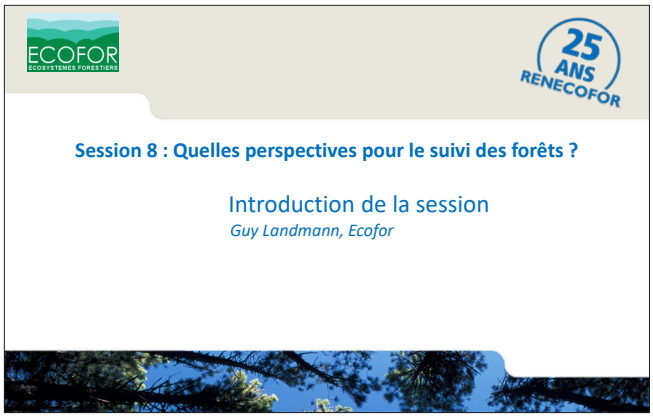
Photo : Sébastien Macé, ONF

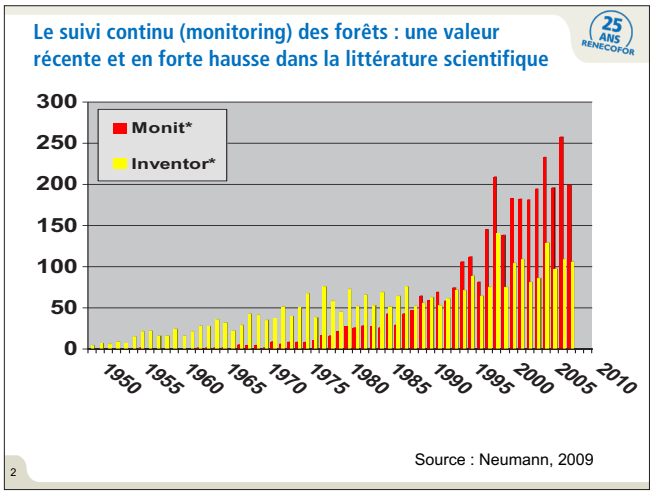
N. König, M. Jonard, M. Schaub avec, dans l'assistance, L. Dalstein

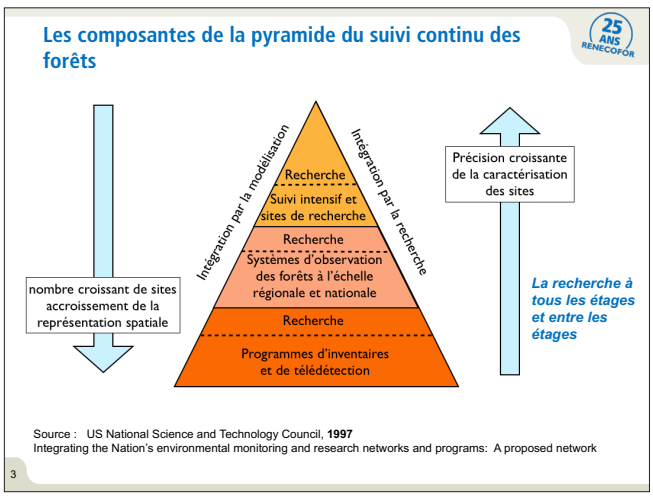
SESSION 8 - QUELLES PERSPECTIVES POUR LE SUIVI DES FORÊTS ?

INTRODUCTION

Guy Landmann
GIP ECOFOR, président du Comité de pilotage scientifique de RENECOFOR







Bienvenue dans cette huitième et dernière session du colloque qui s'interroge sur les perspectives pour le suivi des forêts.

Je vais introduire brièvement cette session par quelques illustrations pour « planter le décor ».

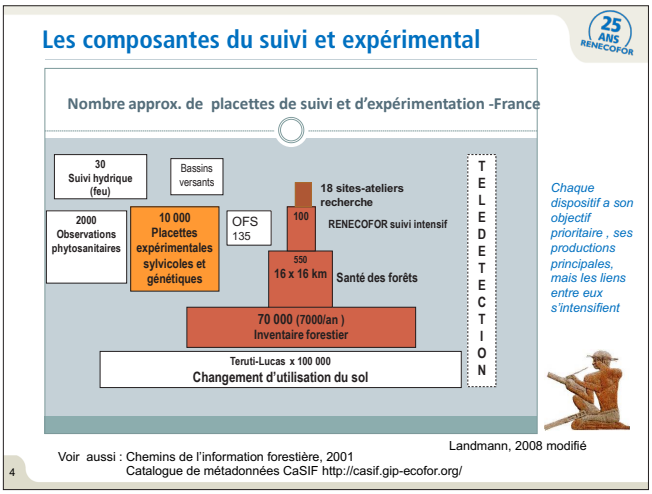
Le suivi continu des forêts, une valeur en hausse dans la littérature scientifique

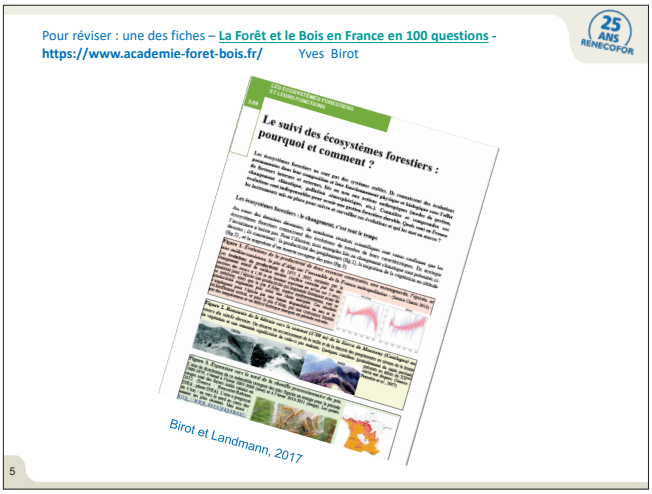
Je commence par cette illustration qu'on doit à un collègue autrichien, un vieil ami du PIC Forêts et du suivi des forêts, qui avait fait il y a quelques années un sondage bibliométrique pour connaître l'occurrence des termes monitoring et inventaire. Ce sont des termes assez proches, qui recouvrent des disciplines dont il sera question dans cette session. L'inventaire, dans les publications scientifiques, ça vient de très loin et ça continue de progresser en termes d'occurrences par an. Pour le monitoring, ici en forêt, c'est-à-dire environnement, le domaine de ce colloque, l'émergence est plus récente : ça a vraiment décollé dans les années 90, et ça a continué à augmenter. Ce serait intéressant de refaire un point plus récent.

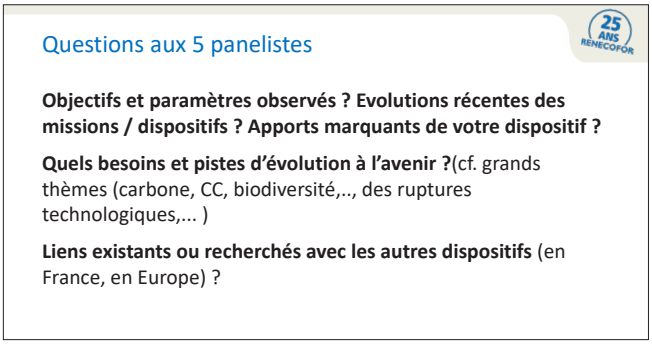
Cadre conceptuel et systèmes de suivi en France

Les composantes de ce suivi continu des forêts sont connues et se disposent assez classiquement selon une pyramide qui a été décrite sous différentes formes dans la littérature.

Je reprends ici une forme qui a été présentée en 1997 dans un rapport américain officiel sur l'intégration des dispositifs de monitoring et de recherche. L'idée était de présenter un concept qui va des programmes d'inventaire et de télédétection (en bas de la pyramide) aux dispositifs de recherche (au sommet), avec une particularité qui m'avait intéressé dès cette époque : il y avait une « couche » de recherche à chaque niveau. Ce qui n'était pas une évidence et ne l'est pas encore pour tout le monde aujourd'hui. Historiquement, on a eu tendance à penser que la recherche c'est vraiment au sommet, dans les dispositifs très complexes, alors que l'inventaire c'est quelque chose qui se fait de façon mécanique, sous l'ordre du préfet auquel on fournit des données statistiques en fin d'année. Cette conception caricaturale, qui n'était pas la mienne, a parfois rendu un peu difficile la compréhension entre les différentes communautés d'acteurs et notamment au niveau français. Quoi qu'il en soit, la précision de caractérisation des sites est évidemment meilleure à mesure qu'on monte dans la pyramide et inversement le nombre croissant des sites vers le bas de la pyramide permet des représentations spatiales, des patrons, etc.







Voici une autre pyramide, que j'ai construite il y a 10 ans et que j'ai modifiée un peu depuis. Le scribe en bas à droite, c'est celui (moi) qui, tous les 5 ans réajuste un peu les éléments de la pyramide. Je laisse de côté le suivi de l'utilisation du sol, tout en bas, et la télédétection qui peut avoir des applications à tous les niveaux, pour me concentrer sur la partie en brun avec l'inventaire forestier, dont parlera François Morneau, le suivi de la santé des forêts (Frédéric Delport lui donnera les noms *ad hoc*), RENECOFOR qu'on ne présente plus et les sites-ateliers tout en haut. Il ne faut pas oublier que chaque dispositif a son objectif prioritaire et ses productions principales ; mais en même temps il y a des liens qui se sont construits avec les étages supérieurs ou inférieurs de la pyramide, et sur lesquels il faut s'interroger.

En haut à gauche, j'ai placé le « nuage » (non exhaustif) composé des autres dispositifs de suivi, dont maintenant l'observatoire des forêts sentinelles (OFS), géré par RNF (Réserves Naturelles de France) où un certain nombre de dispositifs sont aussi suivis de façon biométrique, en partie pour la biodiversité.

Ces sources d'information ont été identifiées en 2001 dans un document du GIP Ecofor intitulé « *Les chemins de l'information forestière* ». Plus récemment, Ecofor a tenté de monter un catalogue de méta-données appelé CaSIF, qui décrit très simplement les informations et où vous pouvez découvrir des tas de choses sur des dispositifs connus ou moins connus. Enfin pour ceux qui souhaiteraient réviser la situation des suivis continus en forêt de façon très synthétique, je signale une des 100 fiches de la collection « *La forêt et le bois en France* », lancée et coordonnée par Yves Birot (qui va prononcer les conclusions du colloque) : il s'agit de la fiche intitulée « *Le suivi des écosystèmes forestiers : pourquoi et comment ?* ».

Questions aux orateurs

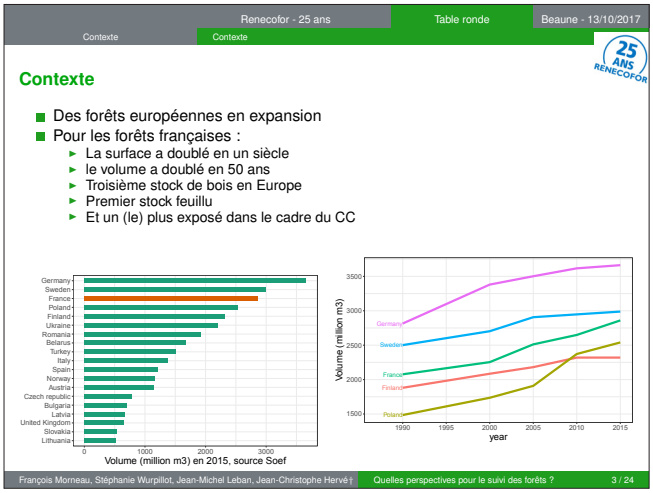
J'ai posé aux panelistes, trois questions à lire ci-contre et dont la première, qui est en fait multiple, peut déjà donner lieu à des messages très forts. Ils interviendront en commençant par le base de la pyramide : François Morneau pour l'inventaire forestier national, puis Frédéric Delport pour la santé des forêts, Manuel Nicolas pour le réseau RENECOFOR, et Laurent Saint-André pour le SOERE F-ORE-T (sites-ateliers) qui a déjà été évoqué plusieurs fois. Enfin Marco Ferretti, interviendra à nouveau pour le PIC Forêts qui représente les deux niveaux du milieu de la pyramide. L'échange qui suivra sera, je l'espère, l'amorce d'une discussion qui pourra être extrêmement utile pour la suite.

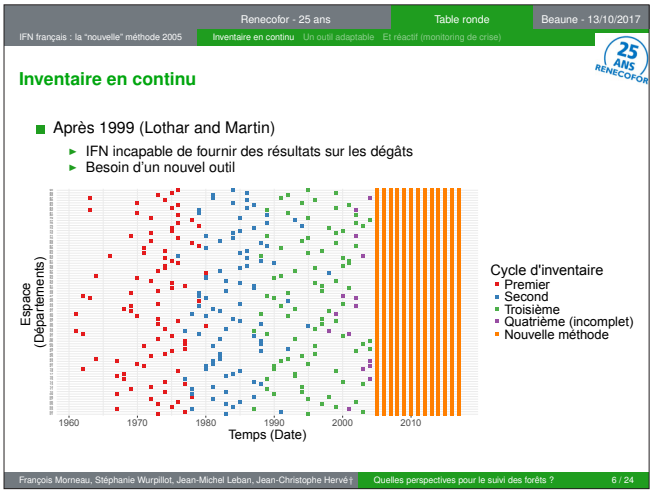
Photo : Sébastien Macé, ONF

Les intervenants : *L. Saint-André, M. Nicolas, M. Ferretti, F. Delport et F. Morneau*

LE POINT DE VUE DE L'INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL FRANÇAIS (IFN)

François Morneau
IGN, Service de l'Inventaire Forestier et Environnemental





Je vais vous présenter un dispositif un peu particulier par rapport à ce que vous avez vu jusqu'ici : l'inventaire forestier et son positionnement dans les questions de suivi des forêts.

Le contexte

Une chose fondamentale à savoir quand on parle de suivi des forêts et des inventaires forestiers, c'est que les forêts européennes sont toutes en expansion. Et dans le cas des forêts françaises, ce n'est pas une petite expansion : la surface a doublé en un siècle. Dès lors qu'on a dit ça, on sait déjà que la moitié de nos forêts sont de nouvelles forêts sur des sols, en gros, agricoles.

Non seulement la surface a doublé en un siècle, mais le volume, lui, a doublé en 50 ans. Ce qui fait que la France a maintenant le troisième stock de bois en Europe et ne devrait pas tarder à devenir le deuxième stock de bois en Europe. Et évidemment un des plus exposés et des plus diversifiés.

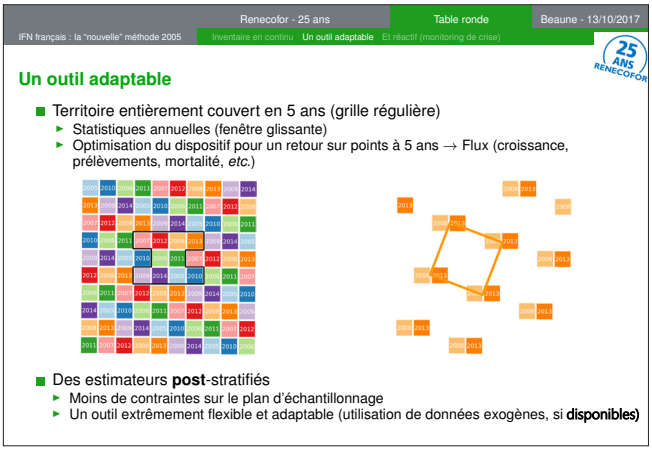
Voilà donc comment on positionne les questions de ressource quand on est un inventaire et qu'on regarde l'ensemble de la forêt. Avec évidemment tous les nouveaux enjeux qui sont ceux du suivi à long terme : changements globaux, transition vers la bioéconomie, monitoring environnemental, etc. Et aussi, très important, le suivi/gestion de crise, le monitoring de crise.

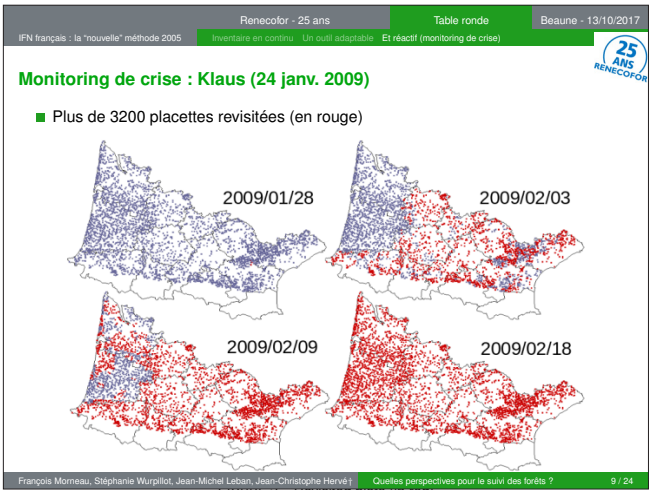
La question, c'est : en quoi les inventaires sont-ils des outils idéalement placés pour répondre à une partie, voire une grande partie, des questions sur ce suivi et ce monitoring ? Je vais parler du cas de l'inventaire français mais c'est en fait un schéma qui est valable, à mon avis, à l'échelle européenne.

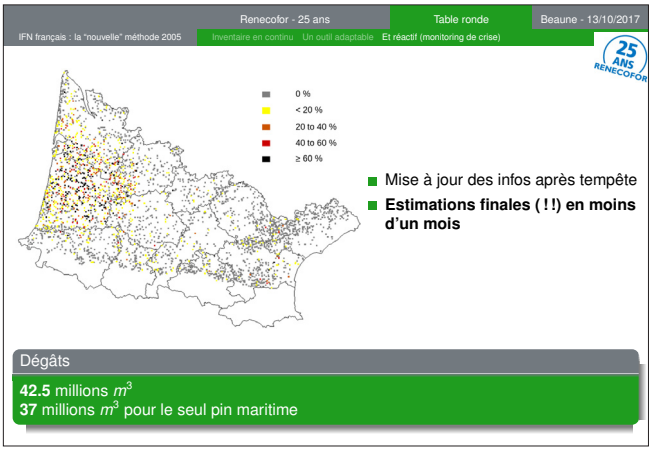
IFN français : la « nouvelle » méthode 2005

Parmi les choses importantes pour l'inventaire français, si vous deviez ne retenir qu'une seule diapo, c'est celle-ci. Nous avons changé en 2005 de type d'inventaire.

Auparavant, l'IFN travaillait département par département (les lignes horizontales du graphique correspondent aux départements métropolitains), et nous avions des cycles d'inventaire : 1er en rouge, 2e en bleu, 3e en vert et 4e en violet. En 1999, arrive une tempête majeure, et l'IFN est incapable de donner des estimations correctes parce qu'en fait nos inventaires avaient des dates un peu anciennes, trop décalées. Nous avons changé du tout au tout le plan d'échantillonnage pour passer à un inventaire en continu du territoire entier chaque année. C'est-à-dire qu'on inventorie 7000 points forêt par an, répartis de manière homogène sur tout le territoire (graphiquement, ça donne pour chaque année une barre qui couvre l'espace complet). Et c'est là qu'est la force des inventaires modernes.







L'autre aspect, c'est qu'en réalité on ne fait pas simplement 7 000 points chaque année. Les propriétés de notre grille d'échantillonnage, qui était plutôt maligne, nous permettent de revenir sur les points inventoriés il y a 5 ans, donc on mesure en fait deux fois 7 000 points chaque année : les nouveaux points et les anciens sur lesquels on va pouvoir mesurer tout ce qui est flux. De plus on a un outil qui est extrêmement souple, mais ce n'est pas ce qui nous importe ici.

Monitoring de crise

Je vais maintenant illustrer le monitoring de crise et ce qui se passe quand il y a une grosse interruption dans des séries représentant des évolutions certes importantes de la forêt mais qui sont relativement linéaires sur des pas de temps de l'ordre de 5 ans. C'est typiquement le cas d'une tempête. Celle de 1999 avait amené l'inventaire à se reprendre complètement, celle de 2009 a constitué un test de cette nouvelle méthode.

Qu'avons-nous fait face à cet événement ? Nous avons revisité 3 200 placettes en 3 semaines. Imaginez : 3 200 placettes alors que notre échantillon annuel est de 7 000.

Et en 3 semaines nous avions les estimations finales : le jour où le dernier point d'inventaire a été mesuré sur le terrain, l'estimation finale avec l'ensemble des ventilations possibles pour l'ensemble des données de l'inventaire a été disponible. Nous avons fait la preuve de la réactivité de l'inventaire et les estimations ont été fournies aux ministères qui en avaient besoin pour déployer les divers plans pour la filière.

Photo : Bernard Gamblin, ONF

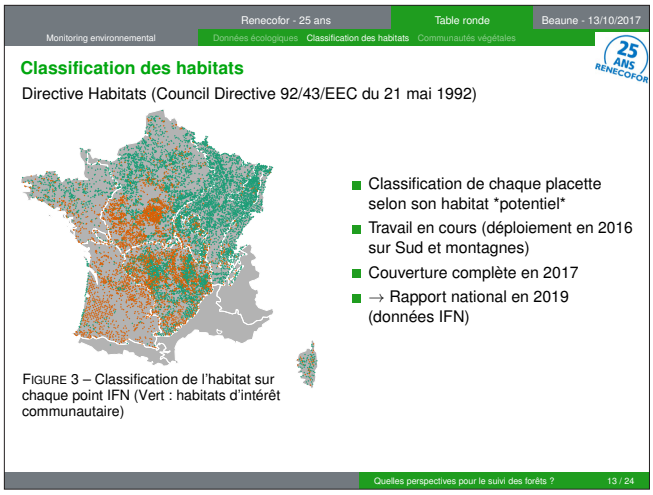
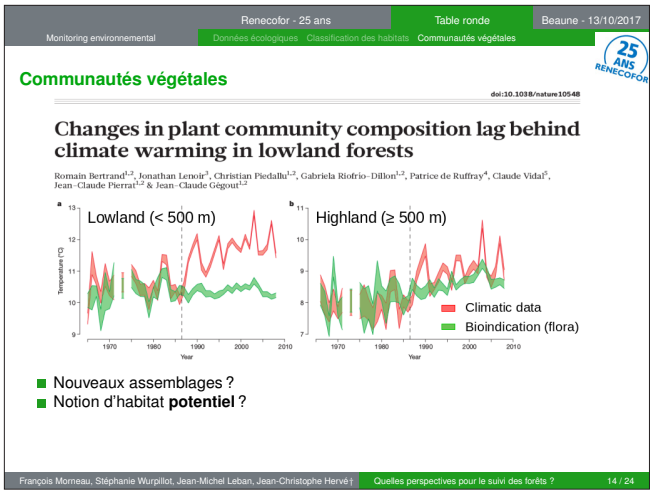


FIGURE 3 – Classification de l'habitat sur chaque point IFN (Vert : habitats d'intérêt communautaire)



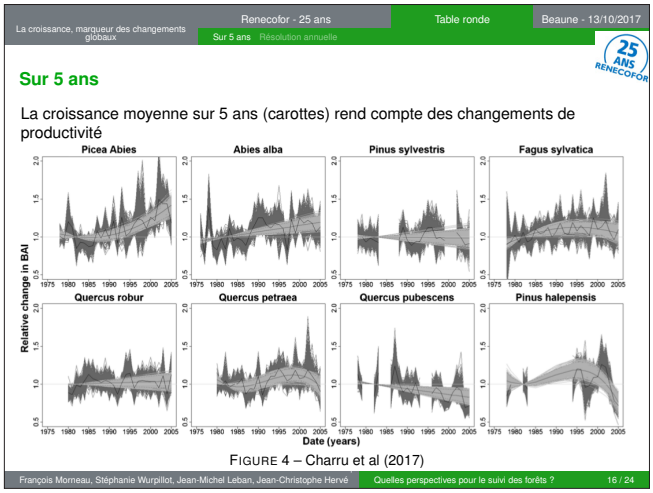


FIGURE 4 – Charru et al (2017)

Monitoring environnemental

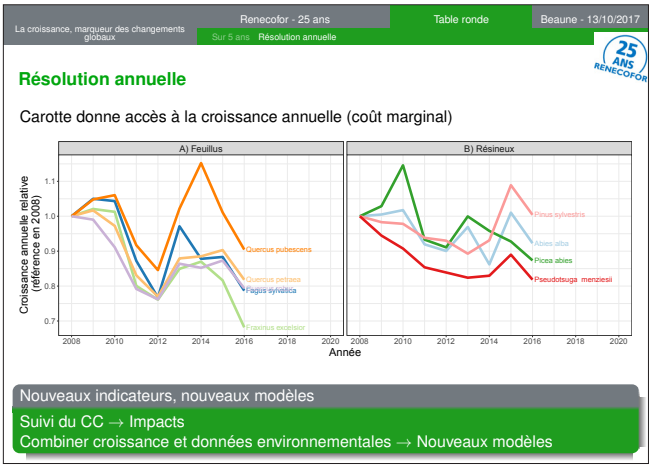
J'insiste maintenant sur des questions qui sont centrales, qui touchent à divers domaines en rapport avec d'autres réseaux dont évidemment RENECOFOR : il s'agit de l'importance des données écologiques. Dans nos inventaires, ces données écologiques se sont rajoutées petit à petit, avec les enjeux de compréhension du fonctionnement des écosystèmes, et pas seulement de la ressource forestière.

Depuis peu, nous avons entrepris de déterminer pour chacun de nos points d'inventaire le type d'habitat forestier au sens de la directive européenne de 1992 (Directive Habitats). Ça, ça va nous permettre pour la première fois au niveau français d'avoir un rapport national fondé sur l'information de l'inventaire avec un classement des points par type d'habitat. Nous serons ainsi au niveau des enjeux européens de reporting sur le suivi des habitats forestiers.

Mais surtout, l'inventaire forestier français offre l'immense intérêt de séries longues et d'une information continue. Globalement, on a 60 ans de données ; la méthode a changé, mais on est capable de reconstituer les séries de données. Et ça permet de voir des choses fondamentales, en ce qui concerne par exemple l'impact du changement climatique sur la composition des communautés végétales. Cette illustration vient d'un article de Romain Bertrand paru en 2011 : il a comparé le climat prédit par la flore locale et le climat réel mesuré, et il s'est aperçu que, en plaine (graphe de gauche), il y a un décalage entre la courbe de température prédite par la flore locale (en vert) et la véritable augmentation de température (en rouge). Grâce à l'inventaire, on sait déjà que la flore est en retard sur l'évolution climatique. Ce n'est pas tout à fait le cas en montagne, où en montant quelques dizaines de mètres, la flore peut récupérer la température qui lui convient. Alors qu'en plaine, ça se traduit tout de suite en dizaines ou centaines de kilomètres (avec tout un tas de questions : barrières, trame verte et autres). L'inventaire permet donc de voir ce genre de chose et de le mesurer directement. Ce qui d'ailleurs pose la question de ce qu'est un habitat potentiel quand on le prédit maintenant alors qu'on a des espèces qui évoluent : est-ce que les habitats qu'on connaît aujourd'hui seront encore les habitats du futur ?

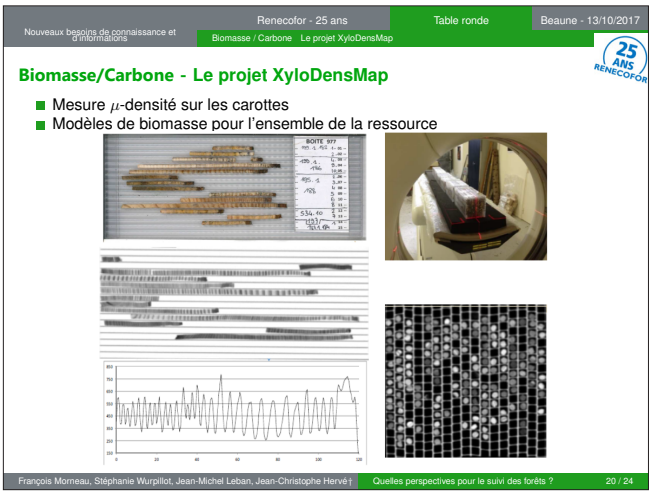
La croissance, marqueur des changements globaux

La croissance est un paramètre fondamental de l'inventaire forestier, et c'est un paramètre qu'on peut utiliser pour étudier l'impact du changement climatique et des changements globaux sur la forêt. Ça nous permet d'observer des grandes tendances. Comme en témoigne cette illustration tirée d'un article de Marie Charru (2017), on arrive avec les données de l'inventaire à qualifier les changements de productivité partout en France et même plus que ça, à voir des contrastes entre essences. Et comme nos données sont spatialisées, on peut régionaliser ces constats, c'est-à-dire aller dans une compréhension plus fine des mécanismes.



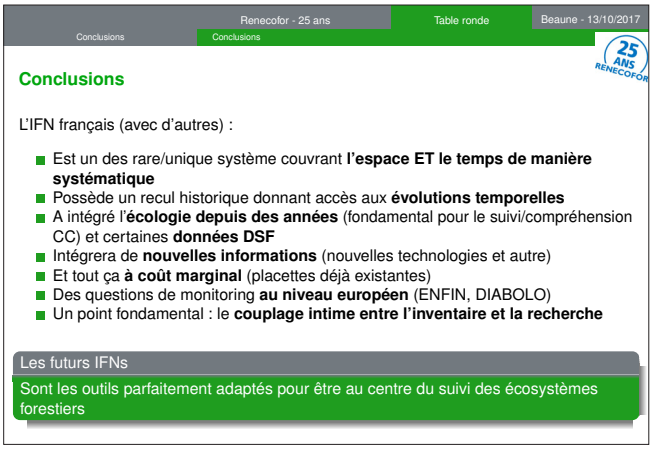
Le prélèvement de carottes, destinées à mesurer les 5 dernières années de croissance pour calculer des flux de bois sur l'ensemble de la ressource, permet d'accéder à coût marginal à des informations supplémentaires. Avec ces carottes on peut mesurer des flux annuels, puisqu'on peut mesurer les cernes annuels. Donc on a une résolution de niveau annuel, ce qui est assez fondamental pour contribuer au suivi de ce qui se passe en forêt. Pour chaque campagne annuelle, nous avons en plus une information annuelle sur les 5 années précédentes. Ça nous permet de détecter des signaux particuliers, comme par exemple une tendance moyenne un peu inquiétante sur le Douglas (courbe rouge sur le graphe de droite, qui concerne les résineux). Après, il y a des travaux de recherche qui portent sur d'autres données pour décorréler l'ensemble des effets et chercher les anomalies véritables.

Nouveaux besoins de connaissance et d'information

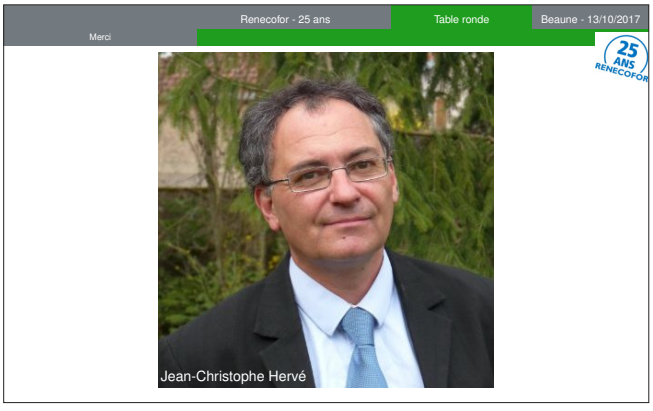


Quant aux nouveaux besoins, ils sont assez classiques. L'inventaire est très sollicité, notamment dans le cadre du changement climatique et des politiques d'atténuation, pour aller chercher des informations sur la biomasse, le carbone, produire des évaluations qui soient vraiment bien faites. Le carbone des sols, typiquement, serait une donnée très utile mais qu'on ne relève pas encore. Pour ces besoins nouveaux, je veux citer un projet innovant qui utilise, à coût marginal là encore, le dispositif de l'inventaire pour produire une information assez révolutionnaire. Ce projet nommé XyloDensMap vise simplement à récupérer, pour les scanner, les petites carottes de bois qui sont systématiquement prélevées dans nos placettes pour la croissance. Les scans permettent d'obtenir la résolution annuelle et la microdensitométrie de ces carottes. Donc on va avoir une information de microdensitométrie sur tous les arbres de l'inventaire forestier, ce qui permettra de faire directement de véritables évaluations en biomasse.

Conclusions



Pour terminer, quelques points de conclusion pour le positionnement de l'IFN français et plus généralement de nos inventaires nationaux.
L'originalité d'un système d'inventaire, c'est de couvrir intégralement l'espace et le temps sur le territoire complet, donc sur l'ensemble des forêts. Ce qui suppose de bien définir ce que sont toutes ces forêts, pour appréhender notamment l'évolution des surfaces forestières. L'autre force, c'est le recul temporel : une soixantaine d'années pour nous, mais les inventaires du Nord vont fêter leurs 100 ans. Depuis des années, nous avons intégré des données sur l'écologie grâce auxquelles on aura aussi des séries temporelles sur divers facteurs environnementaux qui permettent de comprendre, d'appréhender le fonctionnement des forêts. Nous avons aussi intégré, en lien avec les collègues du DSF*, des informations sur la santé des forêts. Et nous continuons d'intégrer de nouvelles données, l'idée étant de le faire à coût marginal puisque, de toute façon, nous inventorions des placettes. Mais évidemment les mêmes questions se posent au niveau européen, et nous sommes donc impliqués dans des processus avec nos collègues européens pour harmoniser nos pratiques afin de faire du monitoring et du rendu d'information à cette échelle.
Enfin un point fondamental pour l'avenir, c'est le couplage nécessaire entre nos inventaires et la recherche. Ça se fait déjà depuis longtemps, mais c'est à développer absolument.
In Memoriam - La grande qualité de l'inventaire forestier national français doit énormément au travail visionnaire de Jean-Christophe Hervé, ancien directeur du Laboratoire de l'inventaire forestier (LIF) et qui nous a quittés brutalement le 16 avril 2017.



LE POINT DE VUE DU DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS (DSF)

Frédéric Delport
MAA, Chef du département de la santé des forêts

Photo : Luc Croisé, ONF

Le Département de la Santé des Forêts (DSF) occupe le deuxième étage de la pyramide présentée en introduction par Guy Landmann, avec un réseau évoqué depuis le début de ce colloque mais dont le nom complet n'a pas encore été prononcé : le réseau systématique de suivi des dommages forestiers.

Le dispositif de surveillance sanitaire du DSF

Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF), c'est aussi ce qu'on appelle le suivi de niveau 1 ou le réseau 16x16 ; son objectif est de caractériser l'évolution de l'état de santé de la forêt, je vais y revenir.

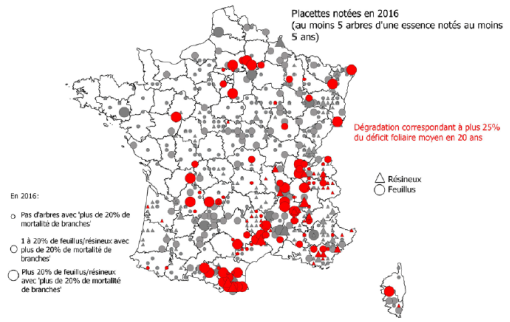
Mais le DSF conduit aussi des suivis spécifiques, qui ne sont pas sur une grille systématique, sur 13 problématiques sanitaires d'importance (ça évolue au fil du temps). Ils portent actuellement sur un certain nombre de pathogènes (maladie des bandes rouges, chalarose du frêne, typographe sur épicéa…) mais aussi sur certaines problématiques (les plantations, les dépérissements) ou même sur des essences particulières, avec des suivis spécifiques sur les problèmes sanitaires des peupliers ou du chêne liège. Certains de ces suivis utilisent des placettes permanentes ou semi-permanentes (sur la processionnaire du pin nous avons des placettes depuis très longtemps), qui complètent le réseau systématique.

Nous avons aussi la veille sanitaire effectuée par les correspondants-observateurs, dont beaucoup sont dans l'assistance, qui constatent des événements sanitaires au fil de leur activité en forêt. Nous assurons la surveillance d'organismes réglementés ou émergents, en notant par exemple des absences, des progressions, ce genre de chose. Et nous faisons enfin du diagnostic conseil à la demande de gestionnaires. C'est tout cet ensemble qui constitue le dispositif de surveillance sanitaire et pas seulement un dispositif systématique.

Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers

Les caractéristiques du dispositif systématique, ou réseau 16x16, c'est un peu moins de 600 placettes (on en a noté 565 en 2016) où on note des indicateurs assez simples et intégrateurs, qui sont mis en œuvre au niveau européen par le PIC Forêts et que nous partageons d'ailleurs avec RENECOFOR puisqu'on y applique le même protocole. Ces indicateurs sont le déficit foliaire par rapport à un arbre de référence, la mortalité de branches, les colorations anormales, et nous notons aussi les dommages sanitaires. Nous sommes sur la même maille que le réseau de monitoring sur la qualité des sols (RMQS) : c'est un point important. Nous suivons les peuplements adultes, et nous avons récemment intégré les jeunes peuplements dans le dispositif pour mieux représenter la forêt française.

Réseau 16x16 : paramètres clés et enseignements



Carte 2 : Etat des mortalités de branches en 2016 et tendance de l'évolution du déficit foliaire moyen entre 1997 et 2016, pour les essences principales (au moins 5 arbres) sur les placettes du réseau.

Réflexions en cours sur le réseau 16x16

- Articulation avec la surveillance des dépérissements : application du même protocole (niveau ponctuel, massif ou régional)
- Ajout de la mesure de la perte de ramification (pour les feuillus), simplification d'autres mesures
- Prendre en compte l'accroissement des surfaces forestières : nouvelles placettes si besoin
- Que faire des essences très peu représentées ?
- Améliorer la représentativité des lisières (intérêt pour certains bioagresseurs) ?

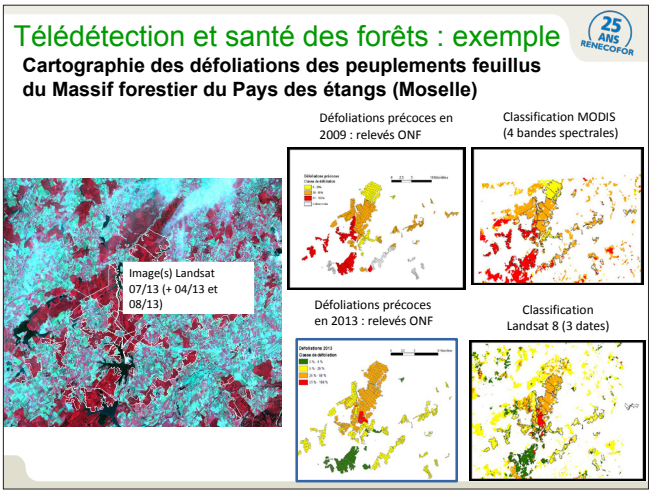
Pour les phénomènes à large échelle : les promesses de la télédétection

- Outils actuels du DSF pour ces phénomènes : fiche large amplitude, RSSDF, exploitation cartographique des 10 000 observations par an, toutes géo-référencées
- Télédétection : déterminer plus finement l'extension spatiale d'un phénomène, détecter les anomalies, guider les prospections de terrain
- Images multi-temporelles : suivre les évolutions
- Qualité et fréquence des images s'améliorent : nécessité de développer des outils d'analyse puissants

Quel genre d'enseignement peut-on en tirer ? Je vais être ultra-simplificateur et je vous demande de m'en excuser. Cette carte, par exemple, combine à la fois le niveau des mortalités de branches (selon la taille du point, triangulaire pour les résineux, rond pour les feuillus) et la dégradation du déficit foliaire moyen depuis 20 ans (points rouges) en regardant des classes assez sévères. On voit qu'il se passe quelque chose en zone méditerranéenne, en zone alpine. Tout le monde pense évidemment au changement climatique, mais il n'y a pas que les facteurs climatiques. En bout de chaîne (la santé des forêts, c'est très intégrateur) on voit l'effet de différents processus à l'œuvre. Bien sûr, il y a des questions de succession de sécheresses, mais il y a aussi des facteurs de station, de gestion (ou non gestion), de maladies… et il faut aussi regarder ça par essence. C'est le genre d'analyse que nous faisons chaque année quand nous sortons nos données sur le réseau systématique.

Nous avons également des réflexions en cours pour optimiser/améliorer les suivis. En interne, d'abord, nous allons nous attacher à appliquer le même protocole dans le suivi systématique et dans nos suivis plus ciblés de dépérissements. Dans ce cadre, nous réfléchissons aussi à la perte de ramification : nous mesurons les mortalités de branches, mais pour compléter le diagnostic il faut aussi voir les branches mortes qui ont disparu, c'est-à-dire la perte de ramification. Il y a par ailleurs la question, soulignée par François Morneau, de l'accroissement des surfaces forestières : peut-être faut-il de nouvelles placettes pour que notre réseau soit vraiment systématique. Nous nous posons aussi des questions sur les essences très peu représentées (que pouvons-nous en faire ?), et sur la prise en compte des lisières, qui peuvent être intéressantes pour certains bio-agresseurs mais dont les arbres sont plutôt moins bien portants en termes de déficit foliaire.

Dans un autre ordre d'idée, nous réfléchissons à la télédétection. Actuellement, pour observer les phénomènes à large échelle, nous avons notre réseau systématique à maille 16x16, nous avons l'exploitation cartographique des 10 000 observations sanitaires que nous enregistrons par an, ainsi que l'outil spécifique « fiche large amplitude » qu'utilisent les correspondants-observateurs et qui repose sur des investigations de terrain. On voit bien que pour compléter ce genre de suivi, la télédétection est une méthode pleine de promesses, à la fois pour déterminer assez finement les extensions spatiales, pour détecter les anomalies qu'on n'aurait pas vues sur le terrain, pour guider les prospections, pour suivre les évolutions avec des images multi temporelles… La qualité et la fréquence des images s'améliorent fortement et nous avons besoin d'outils d'analyse puissants pour en faire quelque chose.



J'ai ici un exemple, concernant la cartographie des défoliations dans une forêt mosellane. À gauche, vous voyez l'une des images satellitaires utilisées pour cette étude. Nous nous sommes basés sur des relevés de terrain scrupuleusement réalisés par Hubert Schmuck (au milieu) pour essayer de retrouver, avec des systèmes de modélisation et de traitement du signal le même genre de patron de défoliation (cartes de droite) à partir des images de télédétection aux dates correspondantes (images MODIS et puis LANDSAT). C'est sur ce genre de chose que nous travaillons, en lien les équipes spécialisées.

Dans un autre registre encore, nous réfléchissons au piégeage d'insectes et de spores. Comme nous suivons la santé des forêts, nous nous intéressons aux ravageurs. Et ces ravageurs, on pourrait les détecter avant même qu'ils aient un impact sur les arbres et sur la forêt, grâce à des systèmes de piégeage. Ça se fait déjà pour un certain nombre de pathogènes émergents ou réglementés. L'idée c'est de déterminer les présences, les progressions, examiner les questions de pression d'inoculum, de niveaux de présence du pathogène, de niveau de risque… Il y a désormais les analyses moléculaires qui aident à faire plus facilement les déterminations (pour ce qui est des insectes, nous en sommes encore aux déterminations manuelles, ce qui prend beaucoup de temps). Tout ça complète finalement le suivi des arbres par des données écosystémiques sur les insectes, les champignons. Dans la session 6, il a été question de la diversité des champignons ; pour nous il s'agit plutôt des champignons pathogènes, mais il y a évidemment un lien avec les suivis en termes de biodiversité.

Liens avec les autres dispositifs

Le DSF est très heureux de s'insérer dans un système avec d'autres dispositifs. Nous avons noué des relations assez anciennes avec l'inventaire forestier, de façon à profiter de sa puissance en nombre de points et répartition spatiale pour relever des données sanitaires à très large échelle. Cette année, nous lui demandons en outre un suivi spécial, au coût marginal, sur la pyrale du buis : c'est une problématique émergente que le DSF n'a pas les moyens de cerner de façon aussi exhaustive.

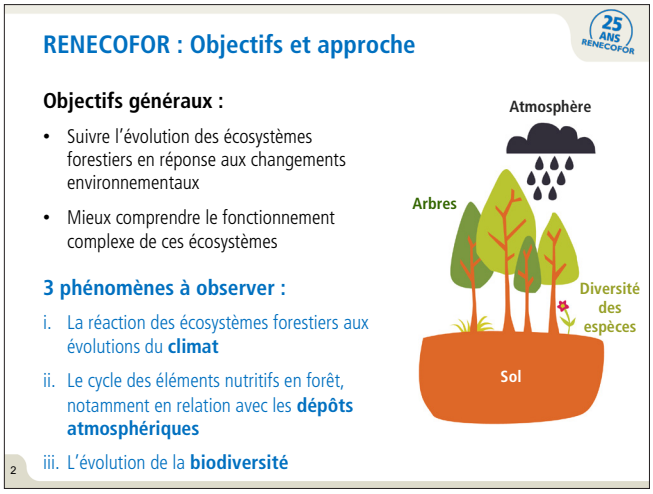
Par ailleurs, les données de RENECOFOR et des sites atelier sont fondamentales pour comprendre les sous-jacents de l'évolution de la santé des forêts, laquelle est la résultante de phénomènes complexes, de facteurs multiples. Comprendre ces facteurs, leur importance relative, leurs interrelations, ça n'est possible que grâce aux suivis plus intensifs de ces réseaux plus restreints.

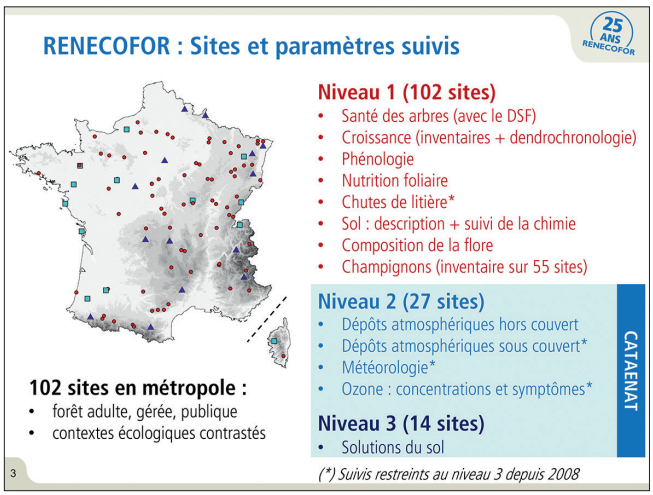
Enfin l'échelle européenne est elle aussi très intéressante pour vérifier si ce qu'on observe en France se produit aussi ailleurs en Europe, s'il y a des signaux communs… Il peut y avoir de petites différences dans l'application des protocoles, mais il est assez facile de les surmonter.

Quel est **l'apport original du DSF** dans ces dispositifs ? C'est la dimension sanitaire et c'est donc, parmi l'ensemble des facteurs, notre regard assez large sur les facteurs biotiques. Sachez que, et ce sera ma conclusion, en termes de santé des forêts, les impacts les plus majeurs observés ces dernières années sont dus à des invasions ou des émergences biotiques (chalarose du frêne, maladie des bandes rouges ou récemment la pyrale du buis), et qu'il peut y avoir des interactions avec d'autres facteurs mesurés sur les autres réseaux.

REGARD SUR LE RÉSEAU RENECOFOR

Manuel Nicolas
ONF, Responsable du réseau RENECOFOR





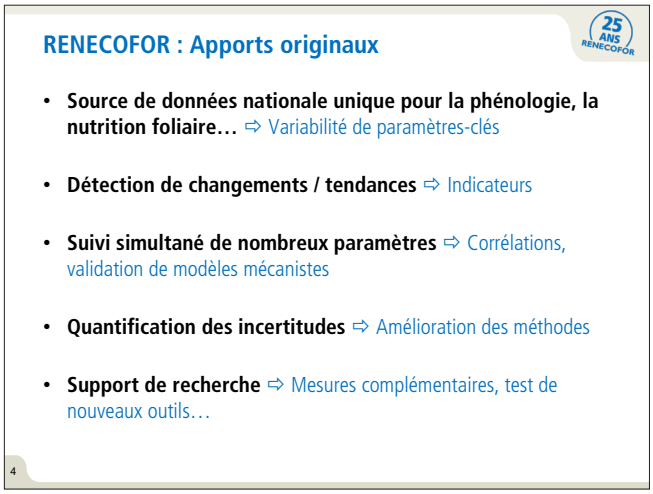
Le réseau RENECOFOR, on en aura parlé tout au long du colloque… Le but est ici de prendre du recul et je suis très heureux de faire l'exercice avec les collègues des autres dispositifs pour croiser nos regards sur l'avenir et peut-être envisager de nouvelles pistes ensemble.

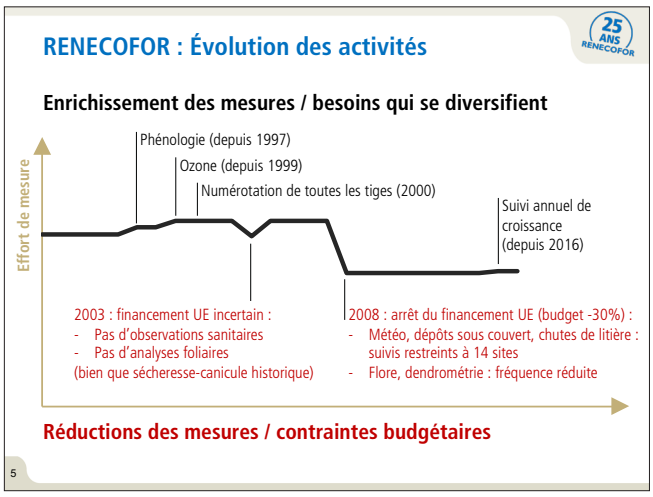
RENECOFOR : objectifs et approche

Pour rappel, l'objectif de RENECOFOR, dans le continuum de dispositifs existants, est de suivre l'évolution des écosystèmes forestiers en s'attachant à l'observation de l'écosystème dans ses différentes composantes (sol, arbre, atmosphère, diversité des espèces) pour apporter des éléments qui permettent d'en comprendre le fonctionnement complexe. La complexité, on la devine au départ et plus on creuse, plus on la voit prendre de l'ampleur. Il s'agissait au départ de pouvoir observer trois phénomènes : la réaction des écosystèmes forestiers aux évolutions du climat ; le cycle des éléments nutritifs en forêt, notamment en relation avec les dépôts atmosphériques ; et l'évolution de la biodiversité.

La conception du dispositif offre l'avantage de relever un maximum de paramètres de l'écosystème en faisant une stratification en différents niveaux. Aude Bourin a déjà parlé (session 4) du sous-réseau CATAENAT, qui concentre les mesures sur l'atmosphère : dépôts atmosphériques hors couvert et sous couvert, météo, ozone et puis aussi, sur une partie de ce sous-réseau, la chimie des solutions du sol. Tous les autres paramètres sont mesurés sur l'ensemble des sites : la santé des arbres en lien avec le DSF* (c'est donc une collaboration « structurelle » dès le départ) ; la croissance ; la phénologie ; la nutrition foliaire ; les chutes de litière ; le sol ; la composition de la flore. Et aussi les champignons sur un certain nombre de placettes, comme on l'a vu (session 6).

Contrairement à l'inventaire forestier et au réseau de suivi de la santé des forêts, le choix des sites ne répond pas à un maillage systématique. Concilier sur les mêmes placettes permanentes l'ensemble des paramètres à mesurer, ça suppose des conditions qu'il n'est guère possible de réunir sur un maillage systématique. Et surtout c'est une question d'effort : dès le départ, le monitoring a été conçu en différentes strates parce qu'on avait le souci d'un dispositif qui soit utile, mais aussi efficace et performant économiquement. Notre réseau de sites est donc installé dans des forêts adultes, gérées, publiques et de façon à représenter des contextes contrastés. C'est grâce à ça qu'il va pouvoir apporter des informations utiles par la suite.





Installation de capteurs d'ozone

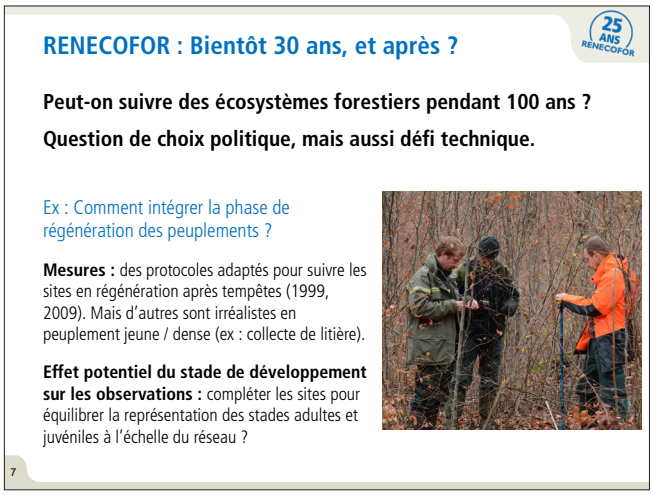
Photo : François Mouchot, ONF

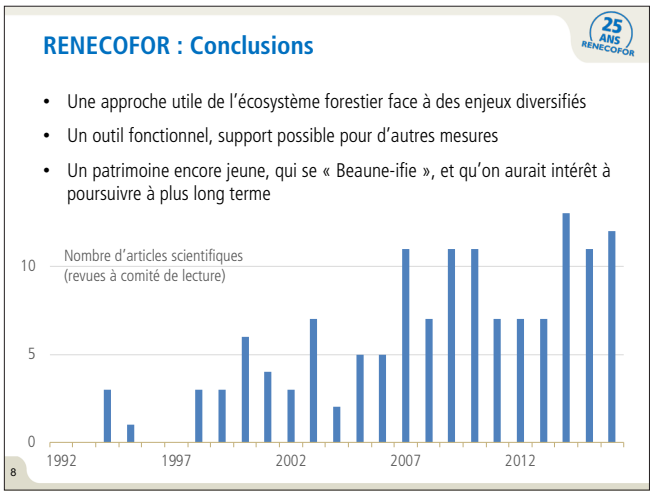
Quels sont les apports originaux du réseau ?

D'une part, RENECOFOR est une source de données nationale précieuse voire unique pour certains paramètres clés du fonctionnement de l'écosystème comme la phénologie, la nutrition foliaire ou les chutes de litière. C'est un dispositif qui permet de détecter des changements ou des tendances : on l'a vu sur les dépôts atmosphériques ou sur l'évolution du carbone des sols. C'est un dispositif qui permet le suivi simultané de nombreux paramètres et on en a vu tout l'intérêt pour permettre aussi bien des approches corrélatives que la validation de modèles mécanistes. Au fil des présentations et de discussions, on a vu l'intérêt d'avoir ces différentes approches face à la complexité, et de tester la capacité de nos connaissances théoriques à reproduire la réalité observée.
Autre apport remarquable, c'est la quantification des incertitudes. Jean-Luc Dupouey a insisté là-dessus pour le suivi de la flore et plus largement de la biodiversité (session 6), Nils König en a parlé pour les analyses en laboratoire (session 7) et je pense que c'est un point qui est très important et utile au-delà du réseau pour l'amélioration des méthodes. Enfin RENECOFOR est un support de recherche qui peut accueillir d'autres mesures. Cet aspect aussi a été largement évoqué dans les différents exposés et notamment à propos des polluants persistants (session 5), une thématique d'intérêt général qui n'était pas dans l'objectif de départ du réseau. Sans oublier le test de nouveaux outils, comme on a pu voir avec la télédétection qui a un intérêt commun pour nous tous.

Évolutions passées et en cours

En 25 ans d'existence, le réseau RENECOFOR a subi quelques évolutions. J'ai voulu représenter ici l'évolution de l'effort de mesure à partir des données de coût des mesures en fonctionnement courant, et voir cette évolution à l'aune de deux *drivers* importants : les besoins d'enrichissement des mesures (en haut) et les contraintes de réduction des mesures (en bas, en rouge). Le besoin d'enrichissement des mesures s'est fait ressentir assez vite : la phénologie n'était pas observée au départ du réseau, elle a été introduite en 1997 et on en voit tout l'apport aujourd'hui. La thématique de l'ozone a été introduite à partir de 1999. En 2000, un changement très utile a été fait à coût marginal : la numérotation de toutes les tiges des placettes. Cela permet d'avoir une information plus fine sur la croissance, à l'échelle arbre alors qu'auparavant on n'avait une information qu'à l'échelle peuplement. Plus récemment (l'an dernier) nous avons mis en place un suivi de croissance annuelle sur les arbres sur lesquels sont également observés la santé et la phénologie. Dans l'intervalle, il y a eu une évolution à la réduction des mesures qui a été contrainte par des réductions budgétaires. L'épisode notablement malheureux, c'est celui de l'année 2003 où le financement incertain de l'Union européenne n'a été confirmé qu'en fin d'année, de sorte que certaines analyses et observations n'ont pas pu être faites. Pour cette année particulièrement intéressante en terme de sécheresse-canicule, on n'a pas d'observations sanitaires ni d'analyses foliaires. Plus tard, en 2008, l'arrêt du financement européen a fait chuter notre budget de 30 %. Le réseau a pu continuer grâce à l'apport des bailleurs de fonds nationaux, et notamment du ministère de l'Écologie, mais au prix d'une perte de mesures en termes de météo, dépôts atmosphériques, chutes de litière (dont on a vu aujourd'hui l'enjeu pour les fructifications, par exemple) ; il a fallu aussi réduire la fréquence de certaines observations importantes comme la flore et la dendrométrie. Ces pertes ont été dommageables de manière générale pour la connaissance et on voit aujourd'hui les limites que ça pose dans notre capacité à analyser ce qu'on peut observer des écosystèmes.





Le réseau, c'est un outil qui demande encore à être étoffé. En 2006, une première évaluation a été réalisée juste au moment où l'Europe arrêtait son financement, puis on en a conduit une autre en 2013 pour avoir un regard critique sur ce dispositif, apporter le regard de chercheurs qui lui sont extérieurs. Ces évaluations ont conduit notamment au constat d'utilité du réseau, de son originalité, de sa qualité, et aussi au constat d'améliorations possibles, mais qui vont plutôt dans le sens de nouveaux développements.

En termes de gouvernance, ça a donné lieu à la constitution d'un comité de pilotage scientifique qui apporte son accompagnement. En termes de mesures, nous avons mis en place le suivi de la croissance annuelle, dont j'ai déjà parlé. Pour ce qui est de la valorisation de nos données, le volume des publications scientifiques a beaucoup augmenté ces dernières années, mais ça reste encore à développer. Dans cette optique, l'important est de faciliter l'accès aux données *via* notamment leur publication dans des *data papers*, ce qui devrait stimuler les analyses en lien, comme on l'a vu, avec les autres dispositifs. Et puis nous avons un problème de pérennité de la base de données, avec une structure qui a été développée dans un logiciel un peu ancien et qu'il conviendrait de moderniser (c'est en cours).

RENECOFOR a bientôt 30 ans… et après ?

Question simple : peut-on suivre des écosystèmes forestiers pendant 100 ans (et même plus, pourquoi pas…) ? La question relève d'une part du choix politique, mais c'est aussi un défi technique. Notamment, le réseau RENECOFOR a été établi au départ dans des peuplements en phase d'amélioration sylvicole, en excluant donc les phases de régénération. Or aujourd'hui on a déjà des peuplements qui ont été touchés par les tempêtes de 1999 et 2009 et pour lesquels il a fallu adapter les mesures, avec des protocoles permettant de les poursuivre dans des sites en régénération ; mais certaines mesures ne sont pas réalistes dans ces situations, comme vous le voyez sur la photo avec une densité d'arbres très forte. Outre la question des mesures, faisables ou pas, il y a la question de l'échantillonnage, de la représentation des forêts par le réseau RENECOFOR et de l'effet potentiel du stade de développement sur les observations. Si on voulait intégrer ce facteur supplémentaire âge / stade de développement, ça demanderait de compléter les sites, et la question est de savoir comment on pourrait compléter cette représentation pour équilibrer la représentation des stades adultes et juvéniles à l'échelle du réseau.

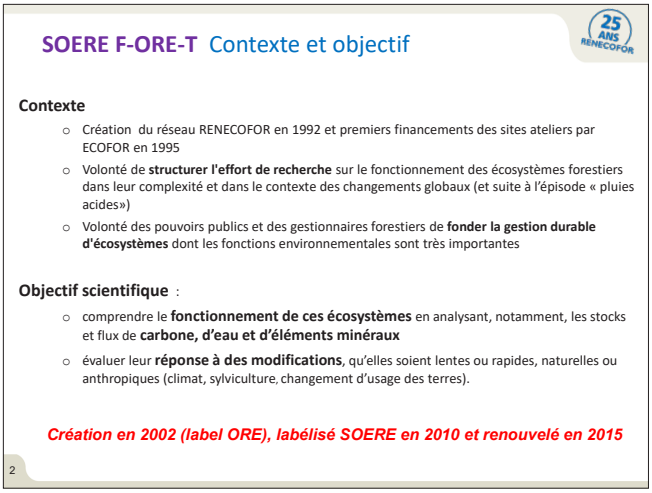
Conclusions

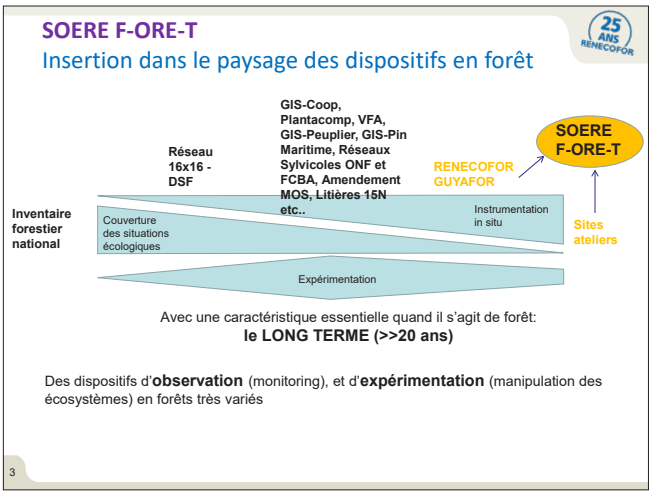
J'en termine avec quelques messages tirés de l'expérience du réseau et qui me semblent importants. D'abord, c'est une approche utile de l'écosystème forestier face à des enjeux qui se diversifient, qui se complexifient. C'est un outil fonctionnel comme on l'a vu, grâce à vous tous, et c'est un support possible pour d'autres mesures. Enfin, on a eu plusieurs fois l'occasion de s'en rendre compte dans ce colloque, c'est un patrimoine qui est encore jeune, qui se bonifie (clin d'œil à la métaphore viticole de circonstance !). Par exemple, depuis 10 ans nous avons eu deux fois plus de publications scientifiques que pendant les 15 premières années. On aurait vraiment intérêt à fortifier ce patrimoine à plus long terme.

Je vous remercie

QUELS BESOINS ET PISTES D'ÉVOLUTION DES DIFFÉRENTS DISPOSITIFS EXISTANTS ? SOERE F-ORE-T

Laurent Saint-André
INRA, Coordonnateur du SOERE F-ORE-T





Je vais parler du SOERE F-ORE-T. L'acronyme SOERE signifie Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement. Tout est dit.

Contrairement au réseau de surveillance de la santé des forêts et à RENECOFOR, le SOERE n'était pas prévu par le PIC Forêts*. Ou plutôt il l'était en tant que « niveau 3 », qui n'a jamais été vraiment constitué.

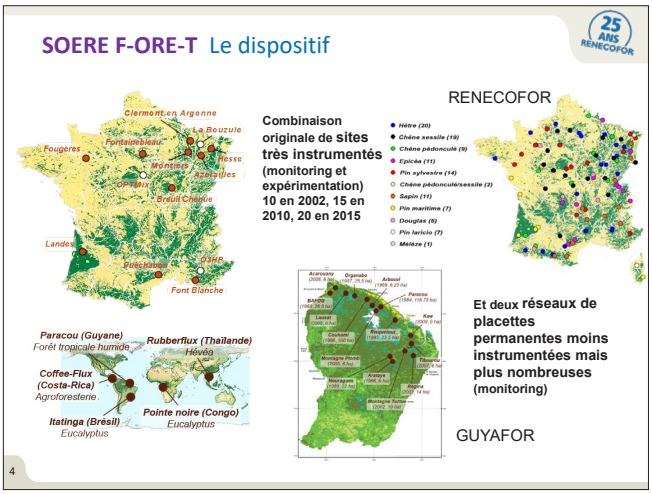
SOERE F-ORE-T : contexte et objectifs

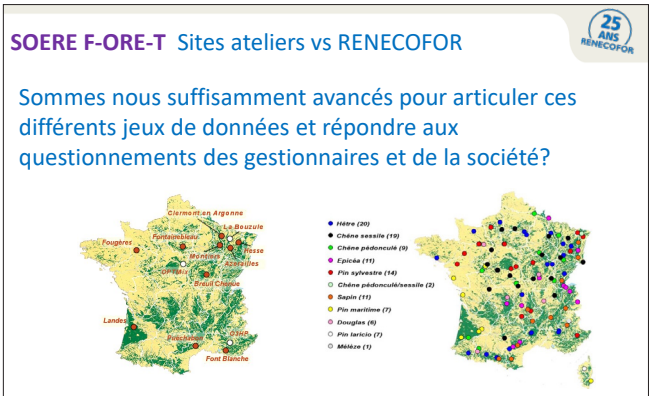
Du point de vue historique, l'apparition des sites-ateliers a suivi la création du réseau RENECOFOR, avec le premier financement de site-atelier en 1995 par ECOFOR*. Puis le SOERE est né de la volonté de structurer l'effort de recherche sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, dans leur complexité et dans le contexte des changements globaux, en particulier suite à l'épisode des pluies acides. Il y avait (il y a toujours) une réelle volonté des pouvoirs publics et des gestionnaires forestiers de fonder la gestion durable des écosystèmes, dont les fonctions environnementales sont très importantes.

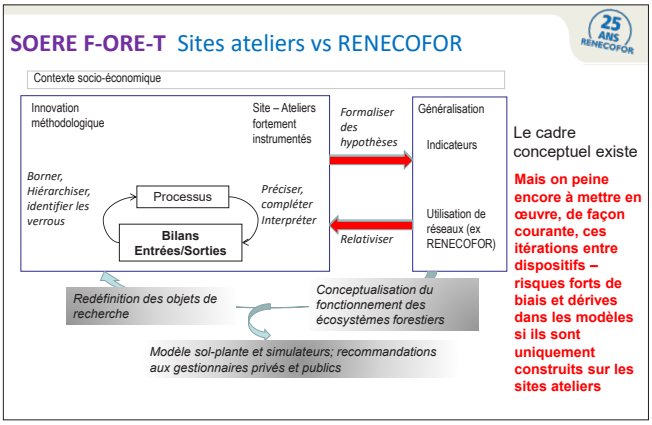
Les objectifs scientifiques du SOERE sont de comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes en analysant notamment les flux de carbone, eau et éléments minéraux, et d'évaluer leur réponse à des modifications, qu'elles soient lentes ou rapides, naturelles ou anthropiques. Le SOERE a d'abord été créé en tant qu'ORE (observatoire de recherche en environnement) en 2002, puis il a été labellisé en SOERE par AllEnvi*, l'alliance nationale de recherche pour l'environnement en 2010 et renouvelé en 2015.

Position dans le paysage des dispositifs forestiers et organisation

Pour la représentation des dispositifs forestiers, j'ai renversé le schéma de la pyramide et je l'ai rendu linéaire. À une extrémité (ici à droite), on a le SOERE, dont les objectifs ressemblent étrangement à ceux qu'a présentés Manuel Nicolas, et ce n'est pas anodin. En fait, dans le SOERE il y a les sites-ateliers mais il y a aussi les réseaux RENECOFOR et Guyafor* ; c'est vraiment important (j'y reviendrai). À l'autre bout de la chaîne, il y a l'Inventaire forestier national, les suivis du réseau 16 x 16 (dont la santé des forêts), et au milieu il y a tout un lot de réseaux expérimentaux où les écosystèmes forestiers font l'objet de manipulations d'un point de vue génétique, biogéochimique ou sylvicole. Bien sûr, tous ces réseaux ont une caractéristique essentielle : le long terme (très supérieur à 20 ans : 100 ans, pourquoi pas, ou encore plus…).







Le SOERE F-ORE-T c'est donc, d'une part (cartes de gauche), un ensemble de sites-ateliers très instrumentés, en France métropolitaine et sous les tropiques (le Cirad* fait partie du dispositif). Le nombre de sites a augmenté au fil du temps : 10 en 2002, 15 en 2010 et 20 en 2015. Mais on arrive au seuil maximum de ce que les organismes français peuvent supporter en termes de coût d'investissement sur des sites-ateliers : dans la dernière campagne de labellisation, il y a 3 sites nouveaux (points blancs) mais ça s'accompagne d'une mise en suspens ou d'arrêt à Fougères, à Pointe Noire au Congo, etc. D'autre part, ça inclut aussi le réseau RENECOFOR et le réseau Guyafor* qui jouent le même rôle de généralisation des résultats respectivement en forêt tempérée et en forêt tropicale.

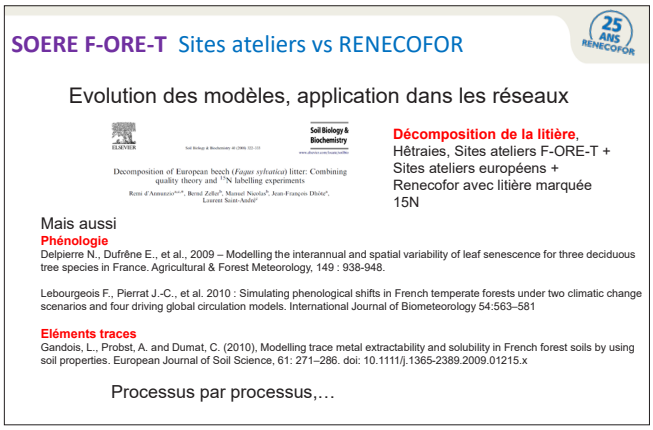
Qu'est-ce que c'est qu'un site-atelier du SOERE F-ORE-T ? C'est un noyau dur avec une tour à flux et/ou un dispositif lysimétrique complet. C'est aussi de la manipulation d'écosystèmes et c'est environ 80 à 300 capteurs par site et même plus, maintenant, avec la normalisation ICOS*, etc. Ça nous permet d'étudier tous les cycles (carbone, eau, éléments minéraux) et leurs interactions, à des pas de temps qui vont de l'infra minute à plusieurs années de suivi.

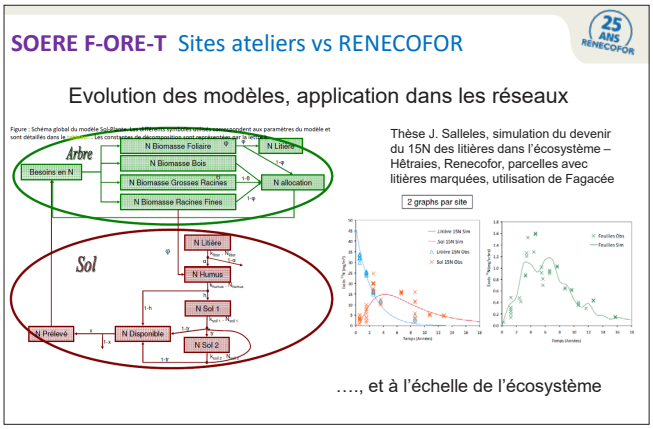
Focus sur l'articulation entre sites-ateliers et RENECOFOR

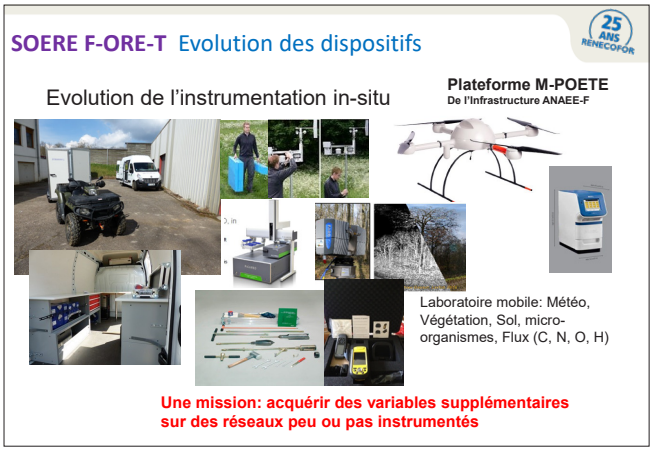
Je vais insister dans la suite sur l'articulation entres réseaux et en particulier sur l'articulation, au sein du SOERE F-ORE-T, entre les sites-ateliers et le réseau RENECOFOR. L'exposé d'Éric Dufrêne (session 3) l'a parfaitement illustrée, mais je vais rajouter quelques éléments.

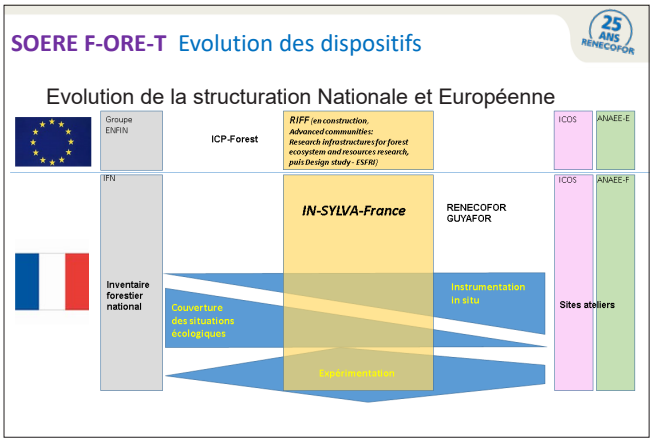
Le cadre conceptuel de cette interaction existe. Sur les sites-ateliers on étudie les processus, on fait des bilans d'entrées/sorties : les processus permettent de préciser, compléter, interpréter les bilans ; réciproquement les bilans permettent de borner, hiérarchiser, identifier les verrous sur les processus. Sur ces sites, on fait de l'innovation méthodologique, il y a une forte instrumentation… Et grâce à tout ça on pense avoir bien compris ce qu'est le fonctionnement de l'écosystème : on formalise donc des hypothèses, on crée des indicateurs, on les teste sur les réseaux et… Patatras, ça ne marche pas. Donc on revient : ça nous permet de relativiser tout ce qu'on avait fait avant. Régulièrement on reconceptualise le fonctionnement des écosystèmes, on redéfinit les objets de recherche, on recrée des sites-ateliers, on en enlève d'autres… et on repart ! Et ainsi de suite. Au passage, on crée aussi des outils pour les gestionnaires.

Ceci dit, au-delà de quelques exemples très éloquents, on peine encore à pratiquer couramment cette boucle itérative. Mais il y a des risques forts de biais et dérives dans les modèles si on les construit uniquement sur les sites-ateliers. Cette articulation est donc vraiment essentielle.









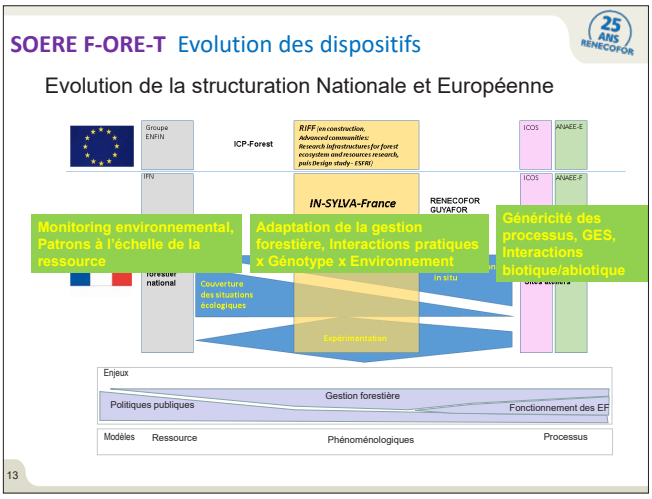
Cette articulation, elle peut se faire sur les processus (processus par processus) : on s'est intéressé à la décomposition de la litière, à la phénologie, aux éléments trace… On peut s'intéresser à certains compartiments.

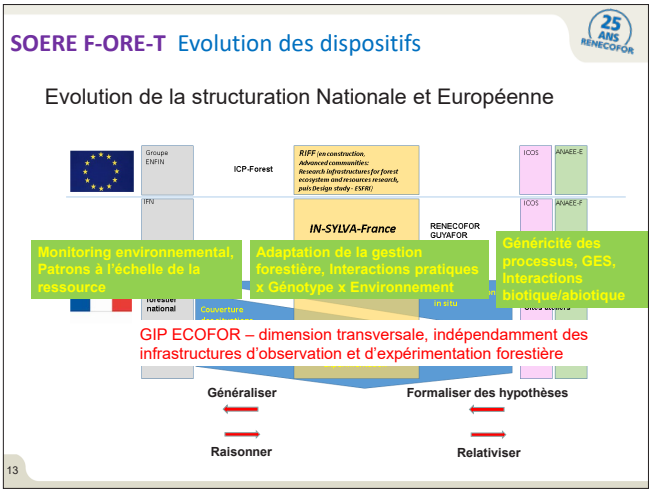
On peut aussi l'envisager pour l'ensemble de l'écosystème. Éric Dufrêne en a présenté des exemples avec le modèle CASTANEA, ici j'en donne un autre exemple, avec la thèse de Jade Salleles (2014) sur l'étude du devenir de l'azote des litières dans le sol. Au début des années 2000, nous nous sommes intéressés au cycle de l'azote et nous avons conduit une expérimentation dans la zone neutre de certaines placettes de hêtre de RENECOFOR (représentant une large gamme de conditions écologiques) : nous y avons déposé des litières marquées à l'azote 15 (^{15}N), que nous avons pu suivre au cours du temps. La thèse de Jade consistait à exploiter les résultats et à les utiliser pour tester un modèle sol-plante basé sur les processus de transfert d'azote, et dont le module « arbre » s'appuie sur le modèle dendrométrique Fagacées pour estimer la croissance et les besoins en azote. En l'occurrence, on arrive assez bien à reconstituer les dynamiques du ^{15}N dans le sol et dans les litières.

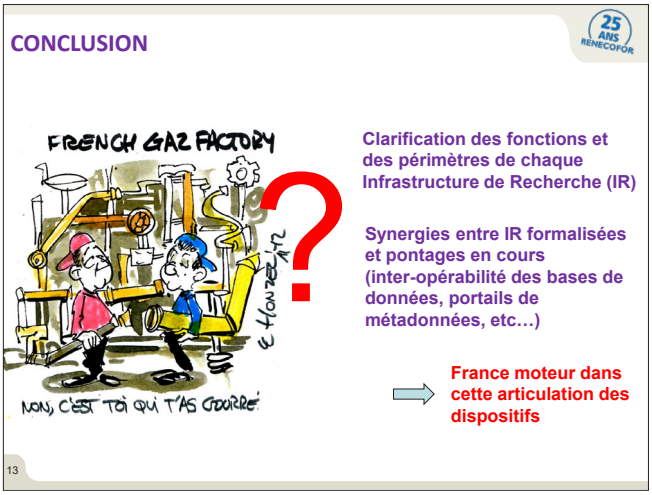
Comment tout ça va-t-il évoluer ?

D'abord, il y a des outils récents qui permettent désormais de faire de l'instrumentation *in situ* à très haut débit (laboratoire mobile). Ça permet en particulier d'acquérir des variables supplémentaires sur des réseaux peu ou pas instrumentés, selon le concept *hot spot hot moment* : être au bon endroit au bon moment et mesurer les flux qui nous intéressent sur des parcelles de RENECOFOR ou d'autres réseaux dont j'ai parlé plus haut, pour mieux comprendre ce qui se passe lors d'une perturbation par exemple.

Pour ce qui est de l'évolution des dispositifs à l'échelle nationale, il se trouve que, sous l'impulsion d'AllEnvi* et des plans d'investissement d'avenir (PIA), les sites-ateliers se sont très bien structurés au sein d'infrastructures bien identifiées : ICOS*, qui est dédiée à tout ce qui est gaz à effet de serre, et AnaEE* pour tout ce qui est interaction entre le biotique et l'abiotique, avec leur pendant à l'échelle européenne. De l'autre côté, il y a l'inventaire forestier national avec le groupe européen correspondant ENFIN*. Et au milieu, tous les réseaux d'expérimentation sont en train de se structurer au sein d'une infrastructure qui s'appelle IN-SYLVA-France avec le pendant européen (projet RIFF*) qui se construit en même temps. Remarque : avec cette structuration, le SOERE devient obsolète et sera dissous.







Dans les sites ateliers, on cherche la généricité des processus, on étudie les gaz à effet de serre, les interactions biotique/abiotique. Sur les réseaux IN-SYLVA on étudie l'adaptation de la gestion forestière, les interactions entre les pratiques, les génotypes et l'environnement. Et du côté de l'inventaire on fait du monitoring environnemental, on regarde les patrons à l'échelle de la ressource. Ici les enjeux relèvent plutôt des politiques publiques, tandis que pour le « paquet » IN-SYLVA c'est plutôt de la gestion forestière et pour les sites-ateliers c'est plutôt l'aspect cognitif sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, avec des modèles adaptés à chacun des enjeux et des réseaux.

La question essentielle va être maintenant d'articuler tout ça. Je ne reviens pas sur l'aspect « on formalise des hypothèses et on relativise » entre les sites-ateliers et les réseaux d'observation ou d'expérimentation. À l'autre bout de la chaîne on peut faire la même chose, c'est-à-dire généraliser les résultats des réseaux grâce à la puissance de l'inventaire et, inversement, raisonner les réseaux en fonction de la ressource. En particulier : comment re-raisonner certains réseaux d'IN-SYLVA-France ou même RENECOFOR compte tenu de l'évolution de la ressource et de ce qu'a dit François Morneau ?

Dans ce schéma, le GIP ECOFOR* a une dimension transversale qui est très importante, qui va permettre de faire l'animation, de gérer ces interactions indépendamment des structures d'observation et d'expérimentation forestières, pour permettre de faire des projets transversaux par exemple, entre ces différentes infrastructures.

Conclusion

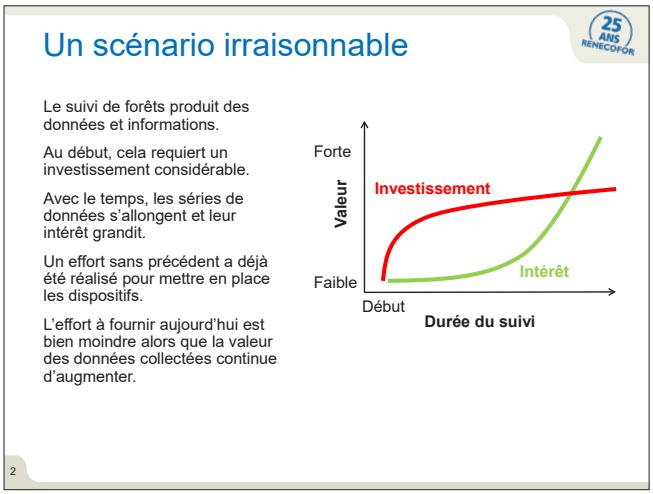
Cette organisation serait-elle une nouvelle usine à gaz française ?

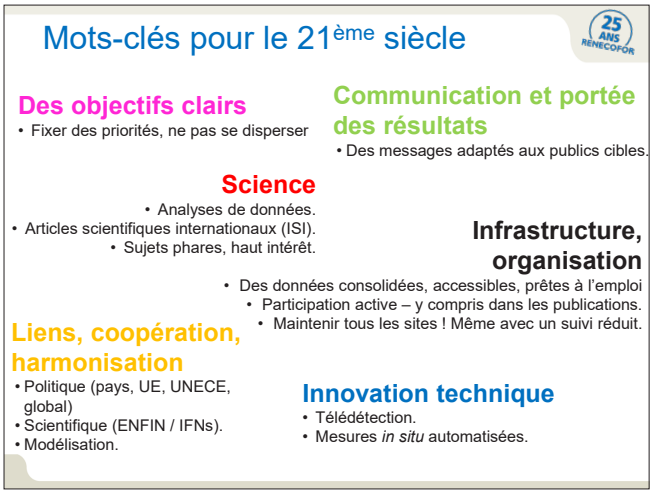
En fait, non : on est en train de clarifier les fonctions et le périmètre de chaque infrastructure de recherche et aussi, c'est très important, de clarifier les synergies entre infrastructures de recherche, de les formaliser. Les pontages sont en cours : interopérabilité des bases de données, les portails de métadonnées ou encore la plateforme mobile, mais aussi les échanges de protocoles. Par exemple, les protocoles du GIS Coop* pourraient venir « fertiliser » ceux de RENECOFOR dès lors que vous allez travailler sur des peuplements jeunes, etc. Autre exemple : ça nous intéresserait, à IN-SYLVA, de profiter des protocoles formalisés dans ICOS.

Enfin, il faut savoir que la France a un rôle moteur dans cette articulation des dispositifs à l'échelle européenne.

QUELLES POURRAIENT ÊTRE LES PERSPECTIVES FUTURES DU MONITORING FORESTIER ? UN POINT DE VUE DU PIC

Marco Ferretti
WSL Zurich, Président du programme international de suivi des forêts ICP Forests





Pas d'inquiétude, je ne vais pas répéter ce que j'ai dit du PIC Forêts en ouverture de la session précédente. Je ne reviendrai pas sur les caractéristiques des niveaux 1 et 2, qui ont été rappelées plusieurs fois. Je vais simplement tenter de proposer une perspective différente : je voudrais évoquer ce que pourraient être les perspectives du suivi des forêts, du point de vue du PIC Forêts.

Commençons par quelques considérations sur le scénario absurde qui se joue actuellement.

Dans les années 80, quand le dispositif de suivi tel qu'on le connaît aujourd'hui s'est construit, nous étions très soucieux de l'énorme investissement qui était nécessaire pour bâtir un système qui, à ce stade, ne pouvait pas produire de résultat significatif. Car on sait d'avance qu'on ne peut pas évaluer la réponse des forêts à quoi que ce soit sur la base de quelques observations : cela demande du temps. Malheureusement, c'est justement ce temps qui a fait retomber l'intérêt, en particulier l'intérêt des acteurs politiques, vis-à-vis de notre travail. Nous sommes donc dans une situation paradoxale : notre système peut aujourd'hui produire des résultats inédits grâce aux données acquises depuis 20-30 ans et grâce à la croissance quasi exponentielle de la valeur qu'apporte chaque nouvelle année d'observation, pour un coût bien moindre qu'au départ ; mais l'intérêt politique, notamment celui des agences environnementales, des partenaires et de l'Union européenne, est sans doute au plus bas depuis 30 ans.

En termes de financement, nous sommes dans cette situation où, alors que de gros investissements ont été faits, c'est au moment d'en récolter les fruits qu'on s'en détourne. C'est très fâcheux, et ça nous empêche de valoriser pleinement le potentiel que nous avons acquis. Mais alors, faut-il attendre une prochaine crise environnementale pour attirer de nouveau l'attention sur la valeur du suivi des forêts ? Je ne sais pas mais, pour ma part, je préfère ne pas rester inactif.

C'est pourquoi je voudrais suggérer **quelques mots-clés pour le PIC Forêts du 21e siècle**, et je suis heureux que les orateurs précédents les aient déjà évoqués pour la plupart.

Le premier, c'est que nous avons besoin **d'objectifs clairs**, de choisir soigneusement des priorités et de nous y tenir. Si nous voulons communiquer des messages clairs, nous devons savoir exactement où nous voulons aller et quelle est notre cible pour l'avenir proche.

Ensuite, nous devons être capables de **mieux communiquer** pour être entendus bien plus largement qu'aujourd'hui. Jusqu'ici, le PIC Forêts s'est concentré sur l'édition de rapports techniques. Ces rapports ont été utiles pour les pays qui participent au programme, mais ils n'ont pas été très efficaces pour mobiliser l'attention de nos financeurs. Nous avons là une marge de progrès. Et, nous y travaillons en ce moment-même, au sein du PIC Forêts pour publier prochainement des communications plus ciblées.

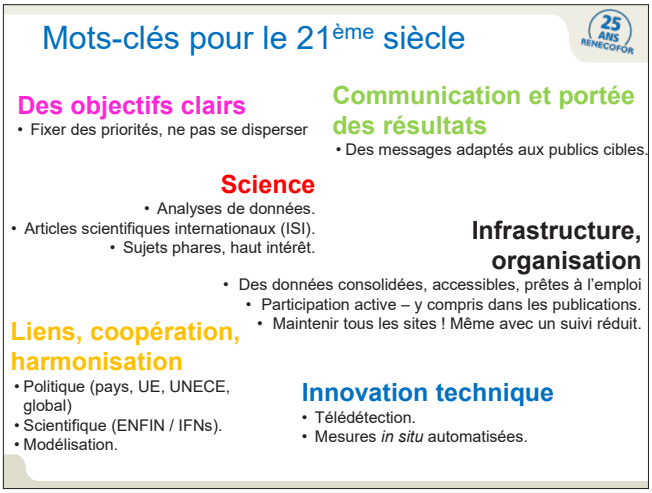


Photo : Sébastien Macé, ONF

Innovation : test du laser terrestre sur placette RENECOFOR

Nous avons **besoin d'infrastructure et d'organisation**. Nos données doivent être prêtes à l'emploi, et je pense que le système qualité pour des données consolidées y contribue beaucoup. La possibilité de connaître la qualité des données est un point très important, mais ça ne suffit pas ; il faut qu'elles soient plus accessibles. La politique du PIC Forêts sur la mise à disposition des données est assez ouverte : il n'est pas très difficile de les obtenir (c'est peut-être même moins difficile que pour d'autres jeux de données supposés libres), mais on peut mieux faire. Nous avons aussi besoin d'une participation active de notre communauté de travail, même si elle peut avoir des hauts et des bas (et elle en a eu depuis 30 ans). Et nous devons être conscients de la valeur intrinsèque de nos sites et de notre infrastructure. Donc même si pour une raison quelconque vous devez réduire ou interrompre vos mesures, maintenez les sites, car ils ont un historique. En Suisse, nous avons des sites de suivi de croissance (et santé) installés depuis la fin du 19e siècle. Sans doute n'ont-ils pas été conçus dans la perspective de crises environnementales à venir. Mais aujourd'hui, nous disposons d'un historique complet de la gestion de ces sites et, avec les progrès de la modélisation, nous pouvons estimer l'évolution passée et future de différentes variables de l'environnement forestier. Et vous pouvez imaginer quelle valeur cela peut avoir : de longues séries comprenant à la fois des données sur la gestion et sur les variables environnementales. C'est un jeu de données très puissant pour faire émerger de nouveaux résultats. Donc j'insiste : qu'ils soient de niveau 1 ou 2, maintenez les sites autant que vous le pouvez même avec un effort de suivi réduit. Tôt ou tard, ils seront utiles pour détecter des tendances ou étudier la réponse des écosystèmes à leur environnement et aux pratiques de gestion.

Par ailleurs nous avons besoin d'**innovation technique**. Je me suis construit avec le PIC forêts ; j'y ai commencé ma carrière, ce fut ma première expérience et la plus décisive pour la suite de mon parcours. Et je dois dire que j'y ai appris… comment on pouvait faire des erreurs. À l'époque, presque tout ce que nous faisions était bancal, et nous étions critiqués de toutes parts. Guy Landmann, par exemple, était l'un des critiques du système. Et moi aussi. Mais pour une raison simple : nous inventions la science du monitoring, de l'observation à long terme. il n'existait rien d'équivalent ailleurs. Nous avons donc fait beaucoup d'erreurs mais nous avons beaucoup appris, et je pense que nous devons continuer à apprendre et à adapter notre dispositif à de nouveaux besoins. C'est bien d'aller chaque année sur le terrain pour estimer le déficit foliaire des arbres, mais pourquoi ne pas essayer des techniques plus modernes ? Le laser terrestre ou aéroporté, la télédétection, beaucoup de nouveaux outils pourraient convenir à notre communauté. Pourquoi pas ?

Un autre point important, c'est la **coopération et les relations** que nous établissons. De mon point de vue, en tant que président du PIC Forêts, nous devons entretenir des liens avec les pays mais aussi avec l'UE, l'UNECE* et même plus largement avec le monde. Je veux dire par là que d'importants programmes ont émergé en Asie du Sud-Est, en Amérique du Nord, en Afrique… et qu'il importe de connecter le système, d'imaginer une sorte de fédération mondiale des programmes de suivi des forêts. Nous devons aussi nous connecter sur le plan scientifique avec d'autres réseaux européens. Je suis sidéré par le fait que les inventaires forestiers nationaux et les réseaux de suivi des forêts n'aient pas trouvé le moyen d'associer leurs données ni leurs résultats. C'est un enjeu de taille que je me sens la responsabilité d'encourager. Et puis il y a les approches de modélisation. Nous sommes dans un monde où il y a d'un côté les observations rétrospectives, le suivi des forêts, et de l'autre l'utilisation de modèles pour se projeter dans le futur. Je pense que nous devons mieux intégrer ces deux types d'approche pour donner aux réseaux de suivi et aux inventaires les bons outils pour aller plus loin.

Et enfin, toujours **sur le plan de la science**, il est intéressant de constater que des réseaux qui couvrent une diversité d'écosystèmes et une durée bien plus faibles publient des résultats plus remarquables à un plus haut niveau. Je pense que c'est aussi parce que nous n'avons pas été assez efficaces pour valoriser nos données sous forme d'articles scientifiques. Et nous devons le devenir. Nous devons susciter la publication d'articles scientifique, et même d'articles phares, qui soulignent la valeur de notre réseau.

En conclusion, je pense que c'est important pour nous de relever la tête, de chercher à regarder plus loin devant nous.

Merci pour votre attention.

Discussion

Questions / Réponses

Christophe Mouy, ONF, UT Auxerrois - A-t-on déjà essayé de déterminer, à l'IGN, s'il y avait un éventuel impact de l'identification des placettes d'inventaire par les gestionnaires, lesquels pourraient influencer les résultats, volontairement ou non ? Les personnes qui travaillent depuis un certain temps sur les mêmes forêts connaissent les placettes, repérables grâce aux petites agrafes et aux petits papiers qui subsistent après le passage des opérateurs. Or je sais d'expérience que, quand on voit un dispositif de mesure, on a tendance à avoir un comportement différent.

François Morneau (FM) - On ne l'a pas mesuré, mais c'est un vrai souci de fond pour l'inventaire : on ne veut pas que les gestionnaires, quand ils passent sur une placette, changent leur façon de faire parce qu'ils ont vu que c'était une placette d'inventaire. Comment s'y prend-t-on ? Globalement les placettes sont très discrètes. D'autre part, l'avantage de l'inventaire français c'est de ne re-mesurer qu'une minorité de placettes au bout de 5 ans, et une seule fois. La plupart du temps, une placette qui serait repérée ne sera jamais remesurée ; il y a toujours de nouvelles placettes, dont l'installation se fait à des endroits où il n'y a aucune marque ancienne. On a donc une information nouvelle et qui est complètement indépendante de ce type de biais, contrairement à ce qui peut se produire, avec un ordre de magnitude assez fort, sur un réseau de placettes permanentes.

Christophe Mouy - On a vu tout au long du colloque la complexité des questions posées par l'évolution des écosystèmes. Dans mon métier au quotidien, j'ai un peu l'impression qu'on reçoit des injonctions opérationnelles telles que : planter des résineux augmenterait le stockage du carbone, couper plus de bois serait positif pour la forêt, etc. Quelle est la légitimité des arguments scientifiques qui accompagnent ces injonctions ?

Manuel Nicolas (MN) - Sur le stockage du carbone (dans les sols) et le lien avec les résineux, l'objet de de l'intervention de Mathieu Jonard (session 3) était de présenter un état d'avancement des résultats avec toutes les incertitudes associées à l'interprétation de ces résultats. C'est une première approche qu'il nous a présentée : on a décelé une évolution du stock de carbone qu'on n'avait pas imaginée au départ et, avec les variables mesurées sur le réseau, on a commencé à explorer les facteurs qui pourraient être corrélés à cette évolution pour essayer d'en identifier les mécanismes. Mais on en est encore bien loin et, comme l'a indiqué Mathieu, certains de ces facteurs sont finalement confondus : l'essence, l'âge et aussi l'ancienneté de l'état boisé. Du coup, cette première approche ne permet pas de dire que les essences résineuses stockent plus de carbone dans le sol que les feuillus, et encore moins d'en faire une injonction. Le stockage plus important sous résineux vient peut-être tout simplement de ce que dans le réseau (et plus généralement en France), les peuplements résineux sont souvent plus jeunes et correspondent à une ancienneté d'état boisé plus récente que la majeure partie des peuplements feuillus. RENECOFOR observe les choses telles qu'elles sont et, comme on n'a pas de modalités expérimentales, ça limite nécessairement le champ des possibles en termes d'interprétation. C'est là que c'est important de faire le lien avec l'expérimentation et la modélisation pour aller plus loin.

Laurent Saint-André (LSA) - Ceci dit, les interactions entre les réseaux d'observation et les sites ateliers s'inscrivent dans un contexte socio-économique, et notre boulot de chercheur, en fait, c'est d'anticiper les demandes de demain ; essayer d'installer les dispositifs qui vont permettre de répondre aux questions de demain. C'est ce qu'on fait par exemple quand on teste des traitements complètement irréalistes du point de vue de la gestion mais qui permettent de pousser les écosystèmes dans leurs retranchements, de voir ce que ça donne et d'être plus à l'aise pour venir discuter avec les gestionnaires. Il arrive un moment où on est à un stade qui permet de dire : à cet endroit-là, telle option de gestion n'est pas une bonne idée, mais à cet endroit-ci elle est possible, ça ne posera pas de problème. C'est tout l'enjeu de cette interaction entre gestionnaires et chercheurs. Dans le cadre du projet INSENSE financé par l'Ademe on est en train, justement, d'examiner des indicateurs « recherche » de sensibilité des sols à la récolte de biomasse, et de tester une dégradation de ces indicateurs… Ici le terme dégradation n'a rien de péjoratif : il s'agit de simplifier ces indicateurs pour pouvoir en faire une application pratique sur le terrain. Il faut bien qu'on arrive à des choses facilement accessibles, qui puissent réellement aider les gestionnaires à décider. L'enjeu n'est pas d'être dogmatique, c'est de dire qu'à tel endroit c'est possible de mettre des résineux, de faire du bois énergie et de stocker du carbone dans le sol en même temps, tandis qu'à d'autres endroits c'est déconseillé. C'est à ça qu'on doit arriver.

Erwin Ulrich, ONF, pôle RDI Fontainebleau - Quand nous avons monté le réseau RENECOFOR, nous étions très motivés et enthousiastes ; nous pensions que nous avions toutes les méthodes en main pour suivre les écosystèmes, et qu'il suffisait de les mettre en œuvre toutes ensemble sur les différents sites et de collecter scrupuleusement les données pour pouvoir les analyser et arriver à un résultat plus ou moins définitif au bout de 25 ou 30 ans. Aujourd'hui, on en est à 25 ans et on réalise qu'en fait on a eu énormément de problèmes méthodologiques, qu'on a surtout affiné ces méthodes, qu'on a appris à travailler avec, à les améliorer : l'exposé de Nils König était très éclairant là-dessus. On commence seulement maintenant à être un peu plus à l'aise, tout au moins avec les approches classiques (pour la modélisation, il me semble qu'on est encore dans une phase de tâtonnements et progrès). Je pense donc, et je voudrais avoir votre sentiment là-dessus, que pendant les 25 à 30 premières années, on était plutôt dans une période pionnière du suivi à long terme des écosystèmes forestiers ; c'est à partir de maintenant, ou peut-être depuis 5-10 ans (d'après les articles scientifiques), que les méthodes standardisées et testées peuvent être bien appliquées. En tout cas il y a un besoin de durée pour fermer la boucle entre les besoins, les objectifs pour lesquels le réseau a été installé, et notre capacité à y répondre.

Guy Landmann (GL) - Je pense que nous sommes nombreux à partager cet avis. On dit souvent que le monitoring est dans son stade d'enfance, que ça va se développer avec une plus grande qualité de résultats, d'interprétations, etc. Mais comme Marco Ferretti l'a signalé, ce discours est difficile à entendre du point de vue des bailleurs de fonds, ceux qui soutiennent le système. Il faut avoir bien ça en tête pour utiliser le discours à bon escient, trouver des arguments pour soutenir l'exigence de long terme, mais pas uniquement sous l'angle qu'on vient de citer.

Manuel Nicolas (MN) - La question est difficile, on progresse en avançant. Aujourd'hui, nous voulons pouvoir faire fructifier tout le patrimoine qui a été acquis, et on voit bien l'enjeu de pouvoir continuer des séries à long terme, car c'est ce qui fait la valeur de nos réseaux. Mais en même temps il faut avoir un regard critique et pouvoir repenser éventuellement la conception de ce qu'on a. Je ne sais pas s'il serait plus facile aujourd'hui de penser un dispositif de suivi à l'aune de tout ce qu'on sait maintenant, en faisant abstraction du dispositif existant : en quoi consisterait cette conception, et serions-nous plus sûrs de nous ? Rien n'est moins sûr, parce qu'il y a toute cette complexité qui se révèle à mesure qu'on observe : tel effet, tel biais, tel problème… Ça veut dire qu'on peut aller très loin dans les craintes et les précautions, au risque de « ne pas faire ».

Patrice Mengin-Lecreulx, ONF, département GDMF - Je voudrais revenir sur les indications de Laurent Saint-André concernant la clarification des infrastructures de recherche et la formalisation des synergies. Tout le monde est convaincu de l'utilité de cette démarche et les orateurs en ont tous exprimé la volonté : est-ce qu'on y est, avec un système qui permet vraiment de construire de manière très opérationnelle les pontages qui vont bien ? Ou est-ce qu'on est en passe d'y arriver ? Sinon, qu'est-ce qui manque ? Il faut qu'on soit rassuré, en quittant ce colloque, sur le fait que la structuration qui nous a été présentée est bien opérationnelle et que ces synergies se construisent bien.

LSA - Cela rejoint la question d'Erwin Ulrich. Parce que l'expérimentation, le suivi des écosystèmes, tout ce qui est suivi environnemental, c'est déjà compliqué sur le terrain et ensuite, pour harmoniser les bases de données, pour rendre les systèmes interopérables, etc., c'est beaucoup plus compliqué que de brancher des machines qui font des mesures physiques. Et c'est quelque chose qui est très difficile à faire comprendre à nos amis des panels d'infrastructure, parce qu'ils voient les infrastructures environnement comme des objets un peu bizarres qui n'arrivent pas à se mettre en relation, etc. Pour revenir à la question : est-ce qu'on y est ? Non. Est-ce qu'on avance ? Oui. Par exemple, tout un travail a été fait dans AnaEE sur les sémantiques, pour qu'on puisse être homogène sur les noms des variables, sur les mesures, etc. Il y a aussi tout un travail sur les métadonnées pour faire en sorte qu'on puisse les partager, les géolocaliser. Ce sont des éléments qui font qu'on avance vraiment bien.*

GL - Laurent a montré que certains éléments du dispositif général d'observation et d'expérimentation sont aussi en train de se structurer au niveau européen : c'est peut-être une réplique de l'histoire d'il y a 30 ans mais sous une forme très différente et qu'il faut regarder très attentivement. Il a aussi mentionné le GIP Ecofor comme pouvant avoir un rôle. Est-ce qu'on y est ? Non, pas encore, c'est un sujet très actuel. C'est sûr qu'il faut une vision commune forte, élaborer quelque chose de bien construit et de très partagé. Et il y a toute l'architecture, tout le système d'organisation européen et français qu'il faut améliorer pour que ça fonctionne bien. Je veux dire par là qu'il ne suffit pas de compter sur la bonne volonté des uns et des autres : on se connaît, on s'apprécie, on fait des choses intéressantes, mais pour faire des pas décisifs au sens où Patrice Mengin-Lecreulx l'entendait, il faut aussi une forme de structuration qui reste à déterminer.*

Andreas Prinzing, université de Rennes - Je trouve que les dispositifs qui ont été présentés seraient des outils spectaculaires pour faire de l'écologie des communautés, comprendre les interactions entre les arbres et leurs ennemis. On a les arbres et leur composition spécifique, on a leurs interactions et on a leur performance physiologique : c'est quelque chose dont rêvent les écologistes des communautés ; c'est quelque chose dont rêvent les chercheurs en écologie évolutive, qui essaient de comprendre comment différentes lignées d'arbres se comportent et interagissent entre elles. Et c'est un aspect qui me semble, de façon naïve, un peu sous-exploité pour l'instant. Peut-être qu'en interagissant avec les gens qui font ce type de recherche on pourrait parfois apporter des petits affinements méthodologiques. S'il y a des études chimiques sur les feuilles, on pourrait scanner ou photographier ces feuilles pour que d'autres puissent ensuite quantifier différentes traces de phytophagie, par exemple. C'est avec ce genre d'affinement qu'on pourrait ouvrir quelques portes pour rendre les dispositifs encore plus puissants, pour faire l'écologie des communautés et de l'écologie évolutive.

MN - C'est effectivement quelque chose qui se développe, mais c'est encore assez jeune. Samuel Venner (session 6) a évoqué un exemple sur le chêne avec les communautés d'insectes qui vivent sur les glands ; c'est un exemple intéressant d'interaction biotique en lien avec le fonctionnement de l'écosystème et qui touche aussi des questions directes pour la gestion forestière. Ça se développe petit à petit mais ça nous conduit dans un peu plus de complexité encore, donc ce n'est pas forcément évident. Concernant la suggestion sur les feuilles, pour qu'elles puissent servir de support à d'autres mesures, c'est déjà un peu dans l'esprit de la pédothèque (ou échantillothèque, je ne sais pas comment il va falloir l'appeler), mais on ne peut pas a priori deviner tous les besoins. S'il y a des idées, pourquoi pas ? Mais il faut aussi voir que c'est en quelque sorte du bonus par rapport à notre objectif premier de suivi des écosystèmes, qui est une grosse machine à faire avancer : on ne pourra peut-être pas répondre à toutes les demandes, dans tous les sens. Par contre, nous sommes ouverts à toutes les mesures qui peuvent se faire sur les prélèvements déjà réalisés des dispositifs en place.

GL - La prise en compte éventuelle de nouvelles approches (je n'aime pas trop la formule) dans le dispositif peut dépendre de beaucoup de choses et notamment de la visibilité du réseau. Si des gens de l'extérieur, les chercheurs en écologie des communautés par exemple, le voient comme un endroit où on ne fait que des mesures de chimie, ils ne vont pas venir vers nous. La façon de parler de la biodiversité, de son fonctionnement, la façon d'exposer ce qu'on fait et ce qui pourrait se faire, le discours qu'on tient et l'image qu'on peut donner auprès d'un public plus large, c'est un point très important qui a été identifié dans les évaluations successives. Ecofor a fait des efforts en ce sens. L'accrochage de diverses communautés de chercheurs se fera de façon plus rapide et positive avec les opérateurs des réseaux si on donne une image qui soit attirante.*

Brigitte Pilard-Landeau, ONF, département GDMF - Question sur l'articulation des réseaux. Il y a d'une part des réseaux à maille systématique avec de très nombreux points, et d'autre part il y a RENECOFOR et les sites-ateliers qui ne sont pas sur des grilles et ont assez peu de points. On a bien, sur les sites-ateliers, des généricités de processus qui nous permettent de comprendre, mais n'y aurait-il pas un renforcement à faire entre des dispositifs non instrumentés à maille systématique et les réseaux de sites fortement instrumentés mais à effectif réduit ? N'y a-t-il pas un manque à ce niveau-là ?

FM - Du point de vue de l'inventaire (dispositif systématique avec énormément de placettes), la contrainte pour intégrer des informations qui feraient le pont avec les réseaux d'observation et de recherche à des niveaux bien plus fins, c'est que l'acquisition de ces données puisse se faire à coût marginal, en temps réduit. À l'extrême inverse, ces réseaux ont des processus et des mesures qui sont d'une lourdeur souvent impressionnante et qu'il est inenvisageable de faire monter d'un degré en nombre de placettes. Le lien à faire réside dans la capacité de ces réseaux à définir, à partir de mesures extrêmement lourdes et complexes, des protocoles très allégés mais cohérents qui permettent de faire le pont entre nos différentes échelles. C'est peut-être cette idée-là qu'il faut creuser, plutôt que celle de réseaux de placettes intermédiaires qui ne peuvent pas voir le jour ne serait-ce qu'en raison du coût et de l'investissement que ça exige en temps de mesure.

Marco Ferretti - Le problème de l'intégration entre les réseaux basés sur un échantillonnage probabiliste, quel que soit le design, et les réseaux de type étude de cas se pose aussi au niveau européen. C'est pourquoi j'ai insisté sur la nécessaire connexion entre les inventaires nationaux et les autres réseaux de suivi. Nous avons déjà la base théorique pour le faire ; je me rappelle un article de W. Scott Overton en 1993[1] qui donnait le cadre conceptuel de la façon d'intégrer ce qu'il appelait des 'found' sites dans un schéma d'échantillonnage probabiliste. Par ailleurs j'ai essayé il y a plusieurs années de voir comment établir des connexions formelles entre les inventaires et d'autres réseaux. Et on peut le faire à plusieurs niveaux : adopter des attributs communs, des placettes de même type, des choses comme ça qui peuvent se faire à un coût relativement bas et qui permettent non pas de remplacer mais d'enrichir l'information et d'établir des liens fonctionnels entre les différents réseaux. Ce sont des choses qu'on peut faire assez facilement et qui seront, à mon sens, une bonne façon de progresser dans l'intégration.

GL - La modélisation permet aussi de faire des ponts entre les étages de la pyramide des dispositifs, du moins en théorie. Car comme je l'ai dit plus tôt, les réseaux sont nés souvent dans des contextes différents mais surtout avec des objectifs initiaux différents, donc c'est sans doute par une confrontation et une cohabitation plus poussées qu'on pourra enclencher les étapes auxquelles Marco a fait référence.

François Lebourgeois, AgroParisTech Nancy - On a bien compris en début de colloque que, pour l'ONF, le réseau RENECOFOR est un atout majeur, mais on a bien senti aussi que du côté des instances politiques les financements n'étaient pas du tout assurés. Cependant toutes les interventions ont très clairement montré l'importance qu'a le réseau pour la recherche, pour que la France soit représentée dans les études et projets au niveau européen, etc. D'où ma question : si je ne me fais pas de souci sur les 5 ans qui viennent (parce qu'on a dit qu'on irait jusqu'à 30 ans), j'ai une grosse inquiétude pour la suite. Est-ce qu'on a des éléments un peu plus factuels ? Quelles pourraient être les voies de maintien du réseau ? Est-ce que ça passe au niveau national ou bien faudra-t-il s'insérer beaucoup plus dans les réseaux européens? Y a-t-il des financements possibles au niveau de l'Europe ? Il faut vraiment se poser la question, ne serait-ce que pour le maintien des sites, comme Marco Ferretti nous en conjure ; même ça, ça a un coût…

GL - Le comité de pilotage RENECOFOR a souhaité démarrer des discussions de fond dès maintenant pour être largement prêt aux échéances, sachant qu'il ne faut pas attendre la dernière année pour se mobiliser. Pour la poursuite de RENECOFOR, on est motivé et il faut y croire, mais il y a un aspect peut-être un peu moins favorable c'est qu'avec l'arrêt du financement européen, la consolidation hexagonale est très forte mais l'intégration à l'Europe est moins évidente, du moins au niveau du PIC Forêts. Je rappelle que, il y a 20 ans, la présence forestière française au sein du PIC était correcte ; elle est actuellement moins forte et ce serait utile que les chercheurs regardent ce dispositif non seulement sous l'angle des données qu'ils peuvent récupérer mais aussi sous l'angle d'une contribution sous une forme ou sous une autre. Ça c'est le lien européen originel. Par ailleurs, comme l'a dit notamment Laurent Saint-André, il y a une structuration en cours au niveau européen mais qui concerne d'abord et en tout premier lieu les dispositifs de recherche ; de ce que je comprends, les dispositifs de niveau 1 et niveau 2 ne sont pas automatiquement ni bien accrochés dans cette évolution parce qu'elle est pilotée plutôt par la recherche.

MN - C'est une question de fond, effectivement, et c'est là que ça devient difficile pour nous (qui avons un rôle essentiellement technique) : mobiliser les politiques. Du point de vue de la demande politique, il y a des attentes. En gros le réseau répond (les observations en général répondent) à des besoins qui sont exprimés et qui, répétons-le, se diversifient : le carbone, on n'en parlait pas autant il y a 25 ans, par exemple. Sur le fond, je pense qu'il y a largement de quoi argumenter, mais paradoxalement, l'engagement politique se ressent de moins en moins. C'est d'ailleurs ce qu'a montré Marco : c'est un phénomène assez global. Ce qui est remarquable c'est que, malgré tout, un réseau comme RENECOFOR a pu tenir (et on n'est pas les seuls, d'autres réseaux du même type ont pu se maintenir avec des fonds nationaux) et maintenir une infrastructure internationale comme le PIC Forêts. Mais c'est fragile et je compte beaucoup sur le comité de pilotage scientifique pour arriver à structurer une réflexion collective sur le plan technique et surtout un relai politique avec nos contacts dans les différents ministères.

Isabelle Feix, Ademe - Je voudrais faire une remarque sur tout ce qui concerne le suivi des sols. Dans le panel des réseaux vous n'avez pas mentionné le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS), qui est maillé 16 x 16 km comme le réseau de surveillance de la santé forêts,

1 Overton, J., Young, T., & Overton, W. S. (1993). Using 'found' data to augment a probability sample: procedure and case study. Environmental Monitoring and Assessment, 26(1), 65–83.

et qui compte plus de 2000 sites dont quelque 500 sites forestiers. La première campagne de prélèvements/analyses a eu lieu sur une dizaine d'années (2000-2009 ; le RMQS est plus jeune que RENECOFOR) et la 2ème campagne a commencé. A priori, l'IFN* ne « fait » pas les sols, mais RENECOFOR « fait » les sols, le réseau santé forêts « fait » les sols (cf. campagnes européennes BioSoil*), RMQS « fait » les sols. Il va donc falloir (1) ne pas oublier le RMQS dans le panorama des réseaux qui s'occupent d'écosystèmes et notamment des écosystèmes forestiers, et (2) que les réseaux qui s'occupent des sols s'articulent entre eux, entre autres pour ne pas financer des choses qui ne se parlent pas.

GL - Rassurez-vous, elles se parlent ! Et en particulier au sujet des deux inventaires sol, français (RMQS) et européen (BioSoil), sur le maillage 16 x 16 forestier ; effectivement nos espoirs se fondent beaucoup sur RMQS parce que le financement d'une 3ème campagne BioSoil est beaucoup plus en pointillé.

LSA - Précision : l'IFN fait du sol aussi. Par ailleurs, dans ma présentation, l'indication réseau 16 x 16 inclut le RMQS, le DSF*, etc. ; c'est le maillage qui m'importait, et aussi le fait que sur tous ces réseaux on étudie à la fois l'aérien et le souterrain : c'est une constante générale.*

MN - J'ajoute que nous avons choisi d'orienter cette session uniquement sur la forêt parce qu'on ne peut pas tout embrasser. Mais il y a des liens avec bien d'autres suivis environnementaux, qui élargissent le champ au-delà de la forêt : vous évoquez le RMQS, mais il y a aussi le réseau MERA dont on a parlé dans la session 4, il y a le réseau BRAMM qui s'intéresse plus à l'atmosphère, etc.

Jean-Paul Party, Sol Conseil - Je vais parler en tant qu'opérateur de saisie sur les bases de données mais aussi de prélèvement d'échantillons sur le terrrain. Ça fait 25 ans que je prélève des échantillons de sol : j'ai visité à peu près les deux tiers des placettes de RENECOFOR et du réseau 16 x 16 (qui recouvre le DSF avec BioSoil, le RMQS, etc.). Je pense qu'il serait temps de faire une interopérabilité entre ces réseaux, au moins entre RENECOFOR et tout ce qui est 16 x 16. Pour une raison simple, c'est que RENECOFOR ne couvre pas tout : il couvre les forêts françaises de production avec les principales essences forestières. Ne sont pas couvertes, par exemple, les forêts de montagne (mélèze, pin cembro, pin à crochets), or c'est là qu'on voit les évolutions les plus rapides en termes de changement climatique. Autre chose qu'on ne voit pas dans RENECOFOR, et qui est très important sur le territoire français, c'est les peuplements de chêne pubescent. Peut-être qu'on pourrait profiter du réseau 16 x 16 pour instrumenter quelques placettes, peut-être de façon plus simple que ce qui se fait sur RENECOFOR et peut être pour un temps un peu plus limité, mais il faudrait qu'on ait des données pour ces peuplements-là. Voilà pour la partie réseaux. Pour la partie bases de données, on ferait bien de se rapprocher aussi du RMQS, parce qu'il y a toute une équipe d'informaticiens à l'INRA d'Orléans qui travaillent à la constitution de ses bases ; il faudrait que les informaticiens aussi se parlent, que le rapprochement ne soit pas juste des intentions de techniciens. Cette idée prolonge les interventions de M. Mengin-Lecreulx et Mme Pilard-Landeau. Enfin la question des financements : j'estime que ça passe aussi par une communication grand public. On a vu lors de la première session cette question épineuse passer de l'un à l'autre comme une patate chaude pour arriver à : « excusez-moi, j'en rendrai compte à mes chefs ». Là, on n'y arrivera pas. Mais si on a le soutien du grand public, ça remontera peut-être au niveau politique ensuite.

LSA - Je veux juste apporter une précision pour les bases de données et rendre hommage à l'Ademe qui a financé le projet INSENSE (évoqué plus haut) dans lequel ces bases de données ont justement été mises en collaboration, avec des informaticiens qui ont vraiment fait un super boulot. Ce qu'ils en retirent, ce n'est pas une énorme base de données façon usine à gaz, c'est des outils pour l'interopérabilité. Donc merci à l'Ademe d'avoir financé ce projet qui a permis de faire ça.

GL - Précision très utile : les choses avancent même si elles ne sont pas toujours devant nos yeux. En tout cas ces remarques sont très pertinentes, et je souligne peut-être la première, que j'avais moi-même soulevée en introduction : est-ce que le changement climatique nous amènera à changer les dispositifs ? On n'a pas entendu beaucoup de choses là-dessus mais le temps manque pour aller plus loin. Je remercie tout le monde en priant d'excuser cette interruption un peu frustrante mais sachez bien que ces questions vont rester plus que vivantes dans les 3-4 années à venir.

Photo : Sébastien Macé, ONF

Photo : Sébastien Macé, ONF

G. Landmann avec, dans l'assistance, J-P Party

SYNTHÈSE ET REMARQUES CONCLUSIVES

Yves Birot
Membre de l'Académie d'Agriculture, Ex-président du département Forêt de l'INRA, du GIP Ecofor…

Nous avons entendu au cours de ces journées des présentations de grande qualité dans des domaines très divers. Je remercie les intervenants venus partager, entre eux et avec nous, la connaissance qu'ils ont produite. Mes remerciements s'adressent aussi aux acteurs de terrain, nombreux dans cet auditorium, qui sont à l'origine de flux de données de haute valeur, bases des recherches qui ont été présentées. J'exprime enfin ma gratitude aux organisateurs, et au premier chef Manuel Nicolas et son équipe pour l'excellente conception et organisation de ce colloque.

Je vais évoquer quelques enseignements tirés de ces journées. Je les ai classés en quatre points :

1) une rétrospective rapide de quelques faits marquants au cours des trois dernières décennies ;
2) quelques accomplissements majeurs de RENECOFOR ou d'autres instruments de suivi des forêts ;
3) l'évolution des questionnements concernant les écosystèmes forestiers et leur suivi :
4) quelques enjeux et opportunités concernant les systèmes de suivi.

RÉTROSPECTIVE

Depuis quelques décennies, on a pris conscience d'évolutions inattendues à l'échelle locale, régionale ou planétaire, de certaines composantes de la biosphère, dont les forêts, en réponse à des changements environnementaux, induits ou non par les activités humaines. Les forestiers, habitués au terme long, ont été dans ce domaine aux avant-postes. La crise du dépérissement forestier en Europe au tournant des années 80, rappelée par Christian Barthod et Guy Landmann au début du colloque, a joué le rôle de catalyseur. En réponse à ces interrogations, des stratégies et instruments de nature scientifique, technique et politique ont été mis en place. J'en citerai quelques-uns.

- 1987 : en France, création du département de la santé des forêts (DSF) sous la houlette de Christian Barthod.

- 1988 : création du GIEC, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Plusieurs rapports du GIEC se sont succédé dont le dernier en 2014 avec en parallèle la montée en puissance des engagements initiés à Kyoto en 1992, et les COP successives, dont la récente et très marquante COP21 à Paris en 2015. Les écosystèmes forestiers y apparaissent de plus en plus explicitement.

- 1990 : première conférence ministérielle pan-européenne à Strasbourg sur la protection des forêts en Europe, dont Georges Touzet et Christian Barthod furent les chevilles ouvrières. Deux des six résolutions adoptées étaient thématiquement liées : la résolution n° 1 à l'origine de RENECOFOR, et la résolution n° 6 sur la création d'un réseau européen de recherche sur les écosystèmes forestiers. Cette dernière procédait du constat que la compréhension des dysfonctionnements des écosystèmes forestiers, comme ceux observés avec le dépérissement, nécessitait le développement d'une approche pluridisciplinaire de l'étude du fonctionnement des écosystèmes forestiers. L'objectif était de mettre l'accent sur quelques thèmes majeur, tels que les cycles de l'eau, des éléments minéraux et de l'énergie, et de renforcer et mieux articuler les recherches dans ce domaine. C'est ainsi que le GIP ECOFOR fut créé en 1993 en application d'une décision interministérielle. RENECOFOR s'inscrit clairement dans cette logique, en lien étroit avec les sites-ateliers de recherche.

Les premières conférences ministérielles MCPFE, fondées sur des préoccupations concrètes, et sur une coopération étroite entre mondes scientifique et politique, ont permis des avancées importantes. Aujourd'hui, MCPFE, devenu ForestEurope a choisi un autre chemin, et je le regrette. Alors que de nouveaux enjeux pour la forêt ont émergé avec les changements globaux et l'économie « verte », il est crucial que politiques et scientifiques se remettent ensemble et reformulent une vision, des perspectives et des stratégies nouvelles. Ceci est vrai au niveau national comme européen.

En 2005, le rapport de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, initié par l'ONU, popularisa l'importance des services écosystémiques, au sein desquels, les « services de soutien aux conditions favorables à la vie » ou encore « services d'entretien de la fonctionnalité » ont une place particulière. Ils conditionnent, en effet, le bon fonctionnement des écosystèmes : habitat pour la flore et la faune, biodiversité, mécanismes de régénération de la forêt, photosynthèse et production primaire, recyclage des nutriments... Ils nécessitent des connaissances approfondies car ils conditionnent tous les autres services (production ligneuse, régulation hydrologique, aménités..). RENECOFOR et les sites-ateliers de recherche sont bien dans cette logique-là.

On sait aujourd'hui que l'invariance n'existe pas en écologie, comme le confirment les évolutions de nombreux paramètres : déplacement d'aires de distribution d'espèces animales, végétales ou de microorganismes, phénologie, physiologie, croissance des forêts. Ces résultats conduisent à un profond changement de paradigme dans la gestion forestière. Mais il faut pour cela connaître plus finement les mécanismes sous-jacents.

Tous ces faits confirment la pertinence des approches engagées depuis 30 ans pour la compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers et leur suivi. Aujourd'hui, elles restent encore totalement d'actualité.

QUELQUES ACCOMPLISSEMENTS MAJEURS DE RENECOFOR ET D'AUTRES INSTRUMENTS

Je voudrais souligner le caractère à la fois remarquable et unique en France du réseau RENECOFOR grâce à : sa bonne conception et sa pertinence toujours actuelles, l'expérience accumulée depuis 25 ans, son intégration dans le réseau européen (ICP-Forests niveau 2), l'appui sur une structure territorialisée et pérenne (l'ONF), la qualité des données produites sur de longues séries chronologiques et pour des critères variés, la compétence et la motivation de l'équipe de

coordination, la forte adhésion des agents de terrain impliqués. La production scientifique générée à partir des données de RENECOFOR est considérable, comme en témoignent les communications faites à ce colloque, et comme l'a montré Manuel Nicolas à propos des publications scientifiques issues des données du réseau.

Les avancées scientifiques permises par RENECOFOR ont été très nombreuses et parfois inattendues. Je mentionnerai ici seulement quelques-unes d'entre elles, présentées ces derniers jours, en demandant l'indulgence des intervenants que je ne citerai pas.

François Lebourgeois et Nicolas Delpierre ont fait état d'une meilleure compréhension du déterminisme climatique, de la croissance radiale de la phénologie foliaire et de la fructification des principales essences des forêts tempérées, grâce aux données de RENECOFOR. Xavier Morin et Isabelle Chuine ont souligné la nécessité des observations de long terme de ce réseau pour bien rendre compte des effets du climat sur les processus écologiques, comme la réponse phénologique des espèces ou la croissance des individus, ce qui permet de les intégrer ensuite dans des modèles prédictifs plus robustes.

On s'attendait à une diminution du carbone présent dans les sols forestiers du fait de l'augmentation de la température. Or, c'est le contraire qui se produit comme l'a expliqué Mathieu Jonard. Ceci soulève plusieurs questions : la séquestration de carbone dans le sol va-t-elle se poursuivre à long terme ? Quelle sera la stabilité du carbone nouvellement accumulé, et enfin quels sont les processus sous-jacents ? Au sujet de la nutrition minérale, l'hypothèse la plus courante, était une probable baisse de la teneur en calcium et en magnésium des sols acides, mais personne n'avait envisagé jusque-là une forte détérioration de la nutrition en phosphore, telle que l'a rapportée Mathieu Jonard. Ces deux derniers exemples, montrent que RENECOFOR a permis une remise en cause de certaines idées préconçues, ainsi que l'émission d'alerte en détectant des évolutions imprévues.

L'étude sur les polluants organiques HAP présentée par Jérôme Poulnard, au-delà des résultats acquis, confirme l'intérêt de RENECOFOR comme réseau de placettes permanentes et comme bibliothèque d'échantillons (sols, feuilles) pour des approches rétrospectives en chimie de l'environnement.

L'étude des variations des communautés d'espèces de champignons présentée par Benoît Richard a débouché sur des résultats originaux sur les patrons de variation de ces communautés à travers une large gamme de conditions écologiques.

Les résultats présentés montrent aussi que RENECOFOR, malgré ses 25 ans d'âge, est encore en situation d'exploration. Toute recherche génère de nouvelles questions et parfois des résultats contradictoires, et fait surgir des incertitudes. Ceci fait ressortir le besoin d'acquisition de données sur des pas de temps plus longs.

Depuis une trentaine d'années, la France a connu une montée en puissance des réseaux d'observation, d'expérimentation, de recherche et de sites-ateliers, installés dans une perspective de long terme. Je rappellerai :

- l'implication croissante de l'inventaire forestier dans le domaine de l'écologie avec un nouveau protocole d'inventaire et le développement d'une communauté de recherche valorisant les données ;

- le réseau systématique 16 x 16 km de suivi des dommages forestiers ;

- l'Observatoire de recherche F-ORE-T, labellisé SOERE depuis 2010, qui comprend les sites ateliers forestiers, aujourd'hui au nombre de 18, et dont RENECOFOR est une composante ;

- l'existence de nombreux réseaux de recherche et d'expérimentation installés pour des objectifs spécifiques : coopérative de données sur la croissance, plantations comparatives d'entités génétiques, réseaux amendement et matière organique des sols, etc. Un ambitieux projet d'infrastructure concernant ce domaine (In-SYLVA) est porté par l'INRA.

La question de la complémentarité entre les différents réseaux a été parfaitement illustrée par Éric Dufrêne à propos du cycle du carbone. Cependant, la diversité de leur finalité, et donc des paramètres observés ou mesurés, les différentes échelles spatiotemporelles auxquelles ils se placent, impliquent une réflexion de fond, si l'on veut améliorer les synergies entre eux. C'est par une intégration plus grande que l'on pourra apporter une réponse plus efficace aux problématiques transversales, telles que les changements climatiques. Nous avons pour cela besoin d'élaborer un plan stratégique concerté.

L'ÉVOLUTION DES QUESTIONNEMENTS CONCERNANT LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS ET LEUR SUIVI

Les placettes de RENECOFOR installées pour 30 ans ont été choisies au départ pour éviter la phase de renouvellement des peuplements. De ce fait, on n'y trouve ni peuplements très jeunes, ni peuplements à l'âge d'exploitabilité, quoique certains peuplements s'en approchent à présent. Les informations concernant la phase de régénération font donc défaut, ou plus exactement, ne sont liées qu'aux conséquences de tempêtes. Dans une perspective de prolongation du suivi à long terme, cette impasse devra être levée, ce qui implique une modification des protocoles. La réflexion initiée par Manuel Nicolas au sein du Comité de pilotage scientifique et au niveau européen, dans le cadre du PIC Forêts, est excellente

Les placettes RENECOFOR ont été installées dans des forêts domaniales gérées pour la production ligneuse. Des interrogations se font jour au sujet du suivi éventuel de forêts en libre évolution, donc non gérées, ou encore de l'extension du suivi à d'autres types de forêts, par exemple des forêts privées établies sur des terres agricoles ou résultant d'accrus naturels.

RENECOFOR a été établi à une époque où la question du changement climatique était encore balbutiante. Aujourd'hui, cette thématique se trouve au cœur de fortes interrogations sur :
- la capacité naturelle ou assistée des écosystèmes forestiers à s'adapter à des contextes environnementaux en évolution ;
- leur aptitude à continuer à fournir l'ensemble des services écosystémiques attendus ;
- le rôle qu'ils peuvent jouer à travers leurs interactions avec le climat, les flux d'eau et d'énergie.

La question de la mise en place de sites de surveillance dans des zones potentiellement exposées à des risques élevés de sécheresse édaphique, et pour certaines espèces, dans des zones en limite d'aire de distribution, mérite d'être posée.

En résumé : les questionnements ont évolué en 25 ans. Comment peut-on répondre à ces nouvelles attentes tout en maintenant la continuité des observations sur le long terme ?

ENJEUX ET OPPORTUNITÉS POUR LES SYSTÈMES DE SUIVI

Face à l'importance croissante du rôle de la forêt dans les questions climatiques, et plus généralement dans une économie fondée sur le vivant, face aux incertitudes des évolutions futures, le besoin de données provenant du suivi dans des domaines multiples des écosystèmes forestiers est toujours actuel. La nouvelle stratégie forestière de l'Union Européenne publiée en 2013, le Plan National Forêt-Bois en France de 2014, ciblent quelques grandes questions qui justifient ce besoin réitéré de données : effet des changements globaux sur les écosystèmes, érosion de la biodiversité, prise en compte plus large des services écosystémiques, durabilité et résilience des forêts, etc.

Les nouvelles technologies offrent un gros potentiel pour le suivi des écosystèmes forestiers. Un exemple concernant les outils d'observation à distance en a été donné par Kamel Soudani dans son exposé relatif à la phénologie. Le LIDAR et la spectroscopie moyen et proche infra-rouge permettent une caractérisation rapide des dispositifs. Un autre exemple concerne la disponibilité récente d'une plateforme mobile dédiée à l'observation et l'expérimentation des écosystèmes terrestres, qui ouvre de nouvelles possibilités.

Des outils se mettent progressivement en place pour mieux articuler les grands dispositifs d'observation et d'expérimentation. Avec ANAEE-F (analyse et expérimentation sur les écosystèmes), des stratégies nationales sont en route concernant les infrastructures – incluant des volets sur l'interopérabilité des bases de données- et les plateformes de modélisation. Avec le GIP ECOFOR, la France dispose d'un instrument original d'animation et de coordination sur les écosystèmes forestiers, leur fonctionnement et leurs évolutions. Ne devrait-il pas jouer un rôle plus marqué pour améliorer l'articulation des réseaux de nature différente, sujet abordé par la table ronde ?

CONCLUSIONS

Vingt-cinquième anniversaire oblige, je terminerai par quelques mots sur RENECOFOR. Il faut redire son caractère unique et non substituable pour le suivi général à long terme du fonctionnement des écosystèmes forestiers en France. Certains de ses objectifs devront être revisités, des critères nouveaux pris en compte, des améliorations apportées à son fonctionnement et à la valorisation de ses données. Mais la poursuite du suivi au-delà des 30 ans initialement prévus, me paraît imposée par la longévité des cycles forestiers, et le contexte des changements environnementaux en cours. Pour y parvenir, la voilure du réseau actuel ne devrait pas être réduite davantage, ni dans sa taille, ni dans les effectifs de son équipe de coordination, ni dans l'ambition de la collecte de données multi-domaines de qualité.

Bon vent à RENECOFOR !

CLÔTURE ET REMERCIEMENTS

Myriam Legay
Cheffe du département Recherche-développement-Innovation de l'ONF

Après la brillante synthèse d'Yves Birot, c'est en toute modestie que j'ai l'honneur de clôturer ce colloque, au nom de Christian Dubreuil, directeur général de l'ONF.

Si je demande à ceux qui assistaient déjà au colloque anniversaire des 15 ans de se manifester… c'est la majorité de l'assistance qui lève la main ! C'est dire qu'il y a dans l'histoire de RENECOFOR une continuité technique et scientifique, qui s'est bien illustrée dans les présentations, mais aussi une continuité humaine forte. En tant qu'« ancienne » moi aussi, je mesure toute l'évolution qui s'est produite entre ces deux événements. Je la mesure à la richesse des résultats, obtenus avec des approches différentes qui commencent à dialoguer. Ceux d'entre vous qui n'ont pas l'habitude de ces échanges scientifiques ont pu être troublés par certains écarts entre les résultats, mais c'est en fait très intéressant ; c'est là que s'affinent et se construisent les hypothèses, les interprétations. Ces résultats mettent aussi en valeur l'apport spécifique du réseau RENECOFOR, notamment son caractère de suivi multi-domaines de long terme sur un panel de situations contrastées.

Photo : Sébastien Macé, ONF

Je veux souligner la qualité de ce colloque, qui m'a impressionnée alors même que j'ai participé aux prémices de son organisation. Et cette qualité est à la hauteur du travail de fond qu'assurent tous ceux qui font les mesures au quotidien, certains depuis très longtemps comme en témoigne la petite « remise des prix » qu'a organisée Erwin Ulrich. Je remarque au passage qu'un colloque scientifique réunissant un si grand nombre de participants dont beaucoup viennent de la gestion, c'est tout-à-fait exceptionnel. Au nom de l'ONF, je félicite donc chaleureusement l'équipe d'organisation et je m'associe aux remerciements exprimés [ci-contre] par Manuel Nicolas.

Quel sera le prochain rendez-vous ? La question reste en suspens, mais je veux souligner quelques points. L'échéance des 30 ans est bien sûr une échéance politique : comment poursuivre, dans quelles conditions de financement ? C'est aussi une échéance technique et scientifique, avec notamment la question de l'évolution de RENECOFOR face à la maturation des peuplements. Mais surtout cette échéance se pose dans un contexte de légitimité scientifique renouvelé, et avec un socle de connaissances et de maîtrise méthodologique extrêmement intéressant pour apporter des réponses à toutes les questions adressées aujourd'hui à la forêt et qui dépassent largement le cadre de la forêt. L'importance de ces questions a été rappelé par de nombreux intervenants : carbone, changement climatique, sol, biodiversité… le tout dans un souci de vision écosystémique.

Je suis en tout cas persuadée, et ce sera ma conclusion, que pour passer avec succès le cap des 30 ans, on ne fera pas l'économie d'un effort de mise en cohérence, voire d'intégration de nos dispositifs expérimentaux et de monitoring ; Laurent Saint-André a d'ailleurs dressé le cadre conceptuel de cette démarche. Il y a donc effort conceptuel à faire ou à poursuivre, un effort technique et scientifique concernant les données, mais aussi – on ne l'a pas encore assez dit – un effort de mise en place d'une gouvernance à l'échelle de cet ensemble. Et bien sûr un effort de communication et de lisibilité pour les décideurs, mais aussi pour d'autres communautés scientifiques ou de conservation de la nature.

Pour terminer, un grand Merci !

Nous remercions ceux qui ont contribué à la réussite de ce colloque :

- les bailleurs de fonds (ONF, MAA*, MTES*, Ademe*) qui financent le réseau depuis le début (1992) et le Labex Arbre qui nous a aidés spécifiquement pour cette occasion ;
- le comité de pilotage scientifique (COPILS) du réseau RENECOFOR, qui a discuté et validé le programme ;
- tous les intervenants, qui se sont prêtés au jeu de présentations vulgarisées, ce qui n'est pas leur habitude ;
- les auteurs de l'exposition sur le livre « Les plantes au rythme des saisons – Guide d'observation phénologique » , et en particulier Fabrice Bonne, auteur des aquarelles ;
- le WSL, institut suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, qui a prêté son film sur le réseau suisse de suivi des écosystèmes forestiers ;
- tous ceux qui ont présenté un poster ;
- ceux qui ont accepté de livrer leur témoignage, relayé dans l'espace d'exposition ;
- le Palais des Congrès de Beaune qui nous accueille et qui apporte une aide très précieuse dans l'organisation technique de cet évènement ;
- et bien sûr les collègues de l'équipe RENECOFOR, ceux de l'équipe actuelle mais aussi ceux d'avant qui nous ont donné un coup de main, Erwin Ulrich (fondadeur du réseau) et Valérie Trevedy, ainsi que Jean-Michel Gémon, de la direction de la communication.

Sans oublier les « petites mains », ceux qui ne sont pas là mais qui ont assuré l'intendance :

- la direction de la communication et l'imprimerie de l'ONF qui ont préparé les documents qui vous ont été remis, en particulier la brochure de présentation du réseau, le journal des témoignages, les portraits du hall d'accueil…
- le support administratif (Direction générale) - je dis bien « support », parce qu'une organisation pareille est bien une compétence technique en soi plutôt qu'un simple soutien…
- les collègues du département RDI que nous avons mis à contribution pour la documentation, les relectures, la manutention… et l'appui moral !

Photo : Luc Croisé, ONF

ACRONYMES ET DÉSIGNATIONS PARTICULIÈRES

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AEE : Agence européenne pour l'environnement ; agence de l'Union européenne dont la mission consiste à fournir des informations fiables et indépendantes sur l'environnement.

Agenda 21 : L'Agenda 21 est un plan d'action pour le XXIe siècle adopté par 173 chefs d'État lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en juin 1992. Il concerne les collectivités territoriales : régions, départements, communautés de communes et communes.

AllEnvi : Alliance nationale de recherche pour l'environnement, créée en 2010. AllEnvi est une des cinq alliances qui fédèrent la recherche publique française autour de thèmes transverses, travaillés par plusieurs organismes. AllEnvi fédère, programme et coordonne la recherche environnementale française pour relever les grands défis sociétaux de l'alimentation, de l'eau, du climat et des territoires.

AnaEE : Analyses et Expérimentations sur les Ecosystèmes. AnaEE France est une infrastructure nationale de recherche dédiée à l'étude des écosystèmes continentaux et de leur biodiversité. Elle met à la disposition de la communauté scientifique internationale des services composés de plateformes expérimentales (en milieu contrôlé, semi-naturel ou naturel), de plateformes d'analyses et d'instrumentation partagée. Elle permet aussi un accès aux données et à des plateformes de modélisation. AnaEE France s'intègre naturellement dans le projet AnaEE Europe, inscrit sur la feuille de route de l'ESFRI*.

ANDRA : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

BioSoil : Le programme BioSoil est un programme initié par la Commission européenne sur la surveillance des sols forestiers d'Europe. Il se fonde sur le maillage systématique de 16 km x16 km du réseau de niveau I du PIC Forêts*. En France, les prélèvements réalisés pour ce programme ont été doublés par ceux menés sur le même maillage, mais avec une méthodologie différente, par le Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS*). Les analyses physico-chimiques ont été réalisées au laboratoire d'analyse de sols de l'INRA d'Arras. Les échantillons français du programme Biosoil sont stockés au Conservatoire des Sols.

CBD : Convention sur la diversité biologique (CDB) ; c'est un traité international adopté lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, avec trois buts principaux : la conservation de la biodiversité, l'utilisation durable de ses éléments, le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques.

CEE-NU : voir UNECE

Cirad : Organisme français de recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CLRTAP : *(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution,* ou *"Air Convention")* Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD), dite Convention de Genève ; c'est une convention internationale signée en 1979 sous l'égide des Nations Unies, et plus précisément de la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-NU, *UNECE* en anglais). Elle s'appuie sur des programmes d'évaluation scientifique des pollutions atmosphériques majeurs et de leurs effets sur la santé humaine et l'environnement, pour définir des objectifs de réduction des émissions de polluants à respecter par les Etats signataires.

COPERNICUS : « Programme européen de surveillance de la Terre ». Ce programme était auparavant nommé Global Monitoring for Environment and Security ou GMES. Il s'agit d'une initiative conjointe de l'Agence spatiale européenne (ESA) et, au travers de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE*), de l'Union européenne, qui vise à doter l'Europe d'une capacité opérationnelle et autonome d'observation de la Terre en tant que services d'intérêt général européen.

CPATLD : voir CLRTAP

DEFORPA : Programme de recherche sur le dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique (1984-1990) ; programme multipartenaires d'initiative interministérielle (Environnement, Recherche, Agriculture) et cofinancé par la Commission des Communautés Européennes

DSF : Département de la Santé des Forêts. Créé en 1989 au sein du ministère de l'Agriculture, le Département de la santé des forêts est en charge de la surveillance sanitaire des forêts françaises de métropole.

ECOFOR : voir GIP ECOFOR

EcoPlant : Base de données phytoécologiques créée en 2002 par le LERFoB (UMR INRA/AgroParisTech). Elle est destinée à structurer et gérer des données floristiques et écologiques pour permettre l'analyse de la distribution des espèces végétales, par rapport aux principales conditions et ressources du milieu, dans une vaste gamme de conditions naturelles.

EFFIS : *(European Forest Fire Information System)* système européen d'information sur les incendies de forêt

EIONET : *(European Environment Information and Observation Network)* réseau partenarial de l'Agence européenne de l'environnement, pour la collecte, l'organisation de données et la diffusion d'information sur l'environnement en Europe, notamment pour aider les décideurs à prendre des mesures appropriées pour la protection de l'environnement au niveau national et européen, et suivre l'effet des politiques et mesures en vigueur.

EMEP : *European Monitoring and Evaluation Programme,* ou Programme concerté de surveillance et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (au sens large : 50 pays). C'est un des programmes de la Convention de Genève sur la pollution transfrontalière à longue distance (CLRTAP*). Il coordonne des inventaires d'émissions et des mesures de retombées, à partir desquels il modélise et cartographie les dépôts de polluants atmosphériques à l'échelle paneuropéenne.

ENFIN : (European National Forest Inventory Network) Réseau européen des inventaires forestiers nationaux. Il a été créé en 2003 comme forum d'échanges sur les définitions, les méthodes et les technique d'inventaire.

ESFRI : *(European Strategy Forum on Research Infrastructure)* Forum Stratégique Européen des Infrastructures de Recherche. C'est une démarche stratégique dont l'objectif est de soutenir une approche cohérente dans l'élaboration d'une politique

d'équipement en infrastructures de recherche de classe mondiale qu'aucun pays-membre ne serait en mesure de financer tout seul.

Eurostat (= DG ESTAT) : Direction générale de la Commission européenne chargée de l'information statistique à l'échelle communautaire ; statistiques permettant des comparaisons entre les pays et les régions.

FAO : *(Food and Agriculture Organization of the United Nations)* Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FluxNet : FluxNet est un réseau mondial de sites équipés de tours à flux qui mesurent en continu les variables météo et les échanges de CO_2, vapeur d'eau, et énergie entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère. Il offre une infrastructure qui collecte, archive et fournit ces données (+ les données de sol, végétation, hydrologie, etc.) pour la communauté scientifique, en s'assurant de la comparabilité entre sites.

Forest Europe : Nom de la Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe (*MCPFE* en anglais) ; c'est une instance volontaire politique pour le dialogue et la coopération en matière de politiques forestières en Europe.

F-ORE-T : voir SOERE F-ORE-T

FRA (2020) : (FAO Global Forest Resource Assessment) Evaluations des ressources mondiales forestières mondiales de la FAO* produites tous les cinq ans [la prochaine en 2020] dans un effort visant à fournir une approche cohérente pour décrire les forêts du monde et leur mode d'évolution. L'évaluation repose sur deux sources de données principales: les rapports nationaux préparés par les correspondants nationaux et des données de télédétection analysées par la FAO en collaboration avec les points focaux nationaux et des partenaires régionaux.

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GIP ECOFOR : Groupement d'intérêt public (GIP), structure de coopération comptant actuellement 12 membres : l'Etat (représenté par les ministères chargés de l'Agriculture et de l'Environnement) et 11 organismes forestiers publics (AgroParisTech, Irstea, Cirad, CNPF, CNRS, FCBA, IFN, INRA, IRD, ONF, MNHN) . Ses activités portent notamment sur le fonctionnement et la gestion des écosystèmes forestiers tempérés et tropicaux.

GIS Coop : Groupement d'intérêt scientifique (GIS) " Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers " créé en 1994, sous l'égide du ministère chargé de l'Agriculture, par 7 organismes : AgroParisTech, CFPA, FCBA, IDF, INRA, Irstea, ONF. Le GIS Coop a pour objet le recueil et la mise en commun de données scientifiques sur la croissance des peuplements forestiers, destinées à l'établissement de modèles de croissance et d'outils d'aide à la gestion. Ce qui nécessite l'installation, le suivi et la mesure de réseaux (multi sites et multi organismes) de placettes permanentes à long terme selon des protocoles standardisés couvrant au mieux toute la gamme de variabilité des conditions de croissance.

Guyafor : Guyafor est un réseau de dispositifs forestiers permanents installés en Guyane Française. Il est dédié à l'étude à long terme de la dynamique forestière et de la biodiversité. Ce réseau est co-géré par des organismes de recherche, Cirad* et CNRS, et par l'ONF.

H2020 : (Horizon 2020) programme européen de financement de la recherche et de l'innovation (DG RTD*) ; programme-cadre de recherche pour la période 2014-2020.

ICOS : *Integrated Carbon Observation System*. ICOS est une infrastructure de recherche européenne dédiée à l'observation et au suivi, sur le long terme (plus de 20 ans), des flux de gaz à effet de serre. ICOS observe les flux européens de CO_2, de CH_4 et de N_2O dans les écosystèmes, l'atmosphère et les océans au travers d'un réseau de mesures intégrées. La composante 'Ecosystèmes' consiste en un réseau de sites instrumentés représentant les grands types de végétation.

ICP IM : *(ICP Integrated Monitoring) International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems* = Programme international concerté de surveillance intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes (PIC-Surveillance intégrée), dans le cadre de la CPATLD*. Il s'agit de monitoring à l'échelle de bassins hydrologiques.

ICP M&M : *International Cooperative Programme on Modelling and Mapping of Critical Levels and Loads and Air Pollution Effects, Risks and Trends.* PIC-Modélisation et cartographie = Programme international concerté de modélisation et de cartographie des niveaux et des charges critiques ainsi que des effets, des risques et des tendances de la pollution atmosphérique, dans le cadre de la CPATLD*.

ICP-Forests : (International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests) Programme international concerté sur l'évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (PIC Forêts), dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD/*CLRTAP**)

IFN : Inventaire forestier national. L'IFN, créé en 1958, était l'établissement public français chargé de l'inventaire permanent des ressources forestières nationales. Il a été intégré en 2012 à l'IGN, l'Institut géographique national désormais devenu Institut national de l'information géographique et forestière.

IMT : Institut Mines-Télécom ; établissement dédié à l'enseignement supérieur et la recherche pour l'innovation au service de l'industrie

INRA : Institut national de recherche agronomique

Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

ITTO : *(International tropical timber organization)* Organisation internationale des bois tropicaux (OIBT). Organisation intergouvernementale qui favorise la gestion durable et la conservation des forêts tropicales ainsi que l'expansion et la diversification du commerce international des bois tropicaux provenant de forêts gérées en mode durable et obtenus dans le respect de la légalité.

JRC : (= DG JRC ; *Joint Research Centre*) Service scientifique interne de la Commission européenne, qui a pour mission d'offrir un soutien indépendant et technique servant à l'élaboration des politiques européennes.

LUCAS : *(Land Use and Coverage Area frame Survey)* Enquête réalisée par Eurostat* tous les 3 ans depuis 2006, afin de déterminer les changements dans l'occupation et l'utilisation des sols au sein de l'Union européenne.

LULUCF : *(Land Use, Land-Use Change and Forestry)* Utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) ; c'est une catégorie utilisée dans les inventaires d'émissions de gaz à effet de serre qui couvre les émissions et les absorptions de ces gaz liées à l'utilisation des terres, à leurs changements et à la forêt

MAA : Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation

MCPFE : voir *Forest Europe*

MERA : Mesure et Evaluation en zone Rurale de la pollution Atmosphérique à longue distance. L'observatoire MERA est la composante française du dispositif de mesure du programme européen EMEP*.

MTES : Ministère de la Transition écologique et solidaire

OFAC : Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale

PIC Forêts : Voir *ICP Forests*

PRIMEQUAL : Programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale (programme de l'ADEME*)

Principes forestiers : « Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement - Principes de gestion des forêts », publiée à l'issue du Sommet de la Terre à Rio en 1992

Processus de Montréal : Groupe de travail sur les critères et indicateurs de la préservation et de la gestion durable des forêts tempérées et boréales ; c'est une organisation volontaire formée en 1994 pour l'application des Principes forestiers du sommet de Rio et qui regroupe actuellement 12 pays (Argentine, Canada, Chili, Chine, Japon, Corée, Mexique, Nouvelle Zélande, Russie, USA et Uruguay).

Protocole de Kyoto : Le protocole de Kyoto est un accord international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et qui vient s'ajouter à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques dont les pays participants se rencontrent une fois par an depuis 1995.

REDD : (Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation forestière) c'est un mécanisme créé par la Conférence des Parties de l'UNFCCC*, pour inciter économiquement les grands pays forestiers tropicaux à éviter la déforestation et la dégradation des forêts. Le programme REDD+ va au-delà […] et inclut la gestion durable et la conservation des forêts ainsi que le renforcement des stocks de carbone liés à la forêt.

RIFF : *(Research infrastructures for forest ecosystem and resources research)* Action du programme H2020* visant à faciliter l'accès aux ressources et méthodologies de recherche forestière pour développer, coordonner et harmoniser la recherche et le monitoring, y compris ce qui concerne les effets de la pollution atmosphérique et le changement climatique (atténuation, adaptation).

RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des sols. C'est le réseau français pour l'observation de l'évolution de la qualité (physicochimque et biologique) des sols. Il compte 2200 sites répartis en métropole selon un maillage de 16 km x 16 km (même maillage que le niveau I du PIC Forêts* étendu à l'ensemble des usages des sols) et échantillonnés tous les 10 ans. Il est piloté par le « Groupement d'intérêt scientifique Sol » (Gis Sol), qui comprend les ministères chargés de l'Agriculture et de l'Environnement et quatre établissements publics : l'ADEME (agence de financement) l'INRA, l'IRD et l'IGN.

RSSDF : Réseau systématique de suivi des dommages forestiers, dit réseau 16 x 16, géré par le DSF*. Réseau d'environ 550 placettes permanentes réparties dans les forêts métropolitaines selon un maillage systématique de 16 km x 16 km et servant à suivre annuellement l'évolution de l'état sanitaire des arbresforestiers. Partie française du monitoring de niveau I du PIC Forêts*.

RTD : (= DG RTD) Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation de la Commission européenne ; la DG RTD définit et met en œuvre la politique européenne de Recherche et Innovation en analysant les politiques nationales et en formulant des recommandations spécifiques aux Etats.

SOERE F-ORE-T : SOERE = Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement, labellisé par l'Alliance nationale de recherches pour l'environnement (Allenvi) ; F-ORE-T = réseau de sites forestiers du SOERE, qui rassemble désormais 15 sites ateliers fortement instrumentés (10 en France métropolitaine et 5 en zone intertropicale humide), ainsi que les réseaux d'observation RENECOFOR en France métropolitaine et Guyafor dans la bande côtière de Guyane.

STOC : Suivi Temporel des Oiseaux Communs ; programme coordonné par le Muséum national d'histoire naturelle.

UE : Union européenne

UNCDD : *(United Nations Convention to Combat Desertification)* Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (CLD ou CNULCD) ; c'est la dernière des trois conventions de Rio à avoir été adoptée. (Les trois conventions de Rio sont issues de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement, autre nom du Sommet de la Terre tenu à Rio de Janeiro en 1992. Ces trois conventions sont : Convention sur la diversité biologique (CBD*) ; Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (UNFCCC*) ; Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD)).

UNECE : *(United Nations Economic Commission for Europe)* Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-NU)

UNECE/ToS : *(Teams of Specialists – UNECE)* équipes de spécialistes de la CEE-NU* dans divers domaines. En matière forestière, elles contribuent au programme de travail intégré du « Comité des forêts et de l'industrie forestière » de la CEE-NU et de la « Commission européenne des forêts » de la FAO*. Le programme porte sur la gestion durable des forêts ainsi que l'utilisation rationnelle et légale des produits de la forêt, comme matière première et comme source d'énergie, et des services forestiers, sur la base des politiques et des institutions appropriées.

UNECE/WG/ICP : (*UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution / Working Group on Effects)* Instance opérationnelle de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CPATLD*), qui se décline en plusieurs programmes internationaux concertés pour l'évaluation des effets des retombées de polluants atmosphériques, dont le PIC Forêts* (ICP Forests)

UNEP : *(United Nations Environment Program)* programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). C'est une organisation dépendante de l'Organisation des Nations Unies, créée en 1972, et ayant pour but de : coordonner les activités des Nations unies dans le domaine de l'environnement ; assister les pays dans la mise en œuvre de politiques environnementales.

UNFCCC : *(United Nations Framework Convention on Climate Change)* Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ; elle a été adoptée au cours du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992 et 196 pays + l'Union européenne en sont aujourd'hui membres.

RENECOFOR

25 ans de suivi des écosystèmes forestiers
Bilan et perspectives

Le programme du colloque a été conçu et validé sous l'égide du **Comité de pilotage scientifique** du réseau :

Membres scientifiques :

Michaël AUBERT (Université de Rouen),

Catherine BASTIEN (INRA),

Eric DUFRÊNE (CNRS),

Jean-Luc DUPOUEY (INRA),

Hans-Peter EHRHART (FAWF - Institut de recherche forestière de Rhénanie-Palatinat),

Jean-Christophe HERVÉ † (IGN),

Hervé JACTEL (INRA),

Mathieu JONARD (Université catholique de Louvain la neuve),

Guy LANDMANN (GIP ECOFOR),

Quentin PONETTE (Université catholique de Louvain la neuve),

Anne PROBST (CNRS),

Laurent SAINT-ANDRÉ (INRA)

Membres institutionnels :

ADEME :
Laurence GALSOMIÈS

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation :
Eric BATAILLE,
Elisabeth VAN DE MAELE

Ministère de la Transition écologique et solidaire :
Olivier GIRAUD

Office national des forêts :
Myriam LEGAY,
Albert MAILLET,
Manuel NICOLAS,
Luc CROISÉ

Ce numéro « spécial RENECOFOR » a été réalisé, d'après les enregistrements du colloque et avec l'accord des intervenants, par Christine Micheneau (ONF, responsable des RenDez-Vous techniques) en collaboration avec Manuel Nicolas (ONF, responsable du réseau RENECOFOR).

Plus d'informations sur le réseau RENECOFOR : **www.onf.fr/renecofor**

Office National des Forêts

onf.fr