

## 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)

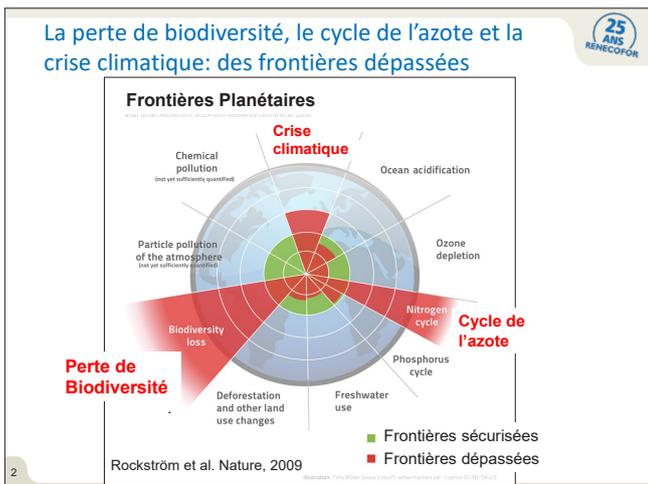
**Simuler les effets combinés de la pollution atmosphérique et du changement climatique sur les écosystèmes forestiers**

*Anne Probst<sup>1</sup>*  
*Simon Rizzetto<sup>1</sup>, Salim Belyazid<sup>2</sup>, Jean-Claude Gégout<sup>3</sup>, Noémie Gaudio<sup>1</sup>, Manuel Nicolas<sup>4</sup>, Harald Sverdrup<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>EcoLab, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France ;  
<sup>2</sup>Institute of Ecology, University of Lund, Lund, Sweden ;  
<sup>3</sup>LERFoB, AgroParisTech – ENGREF – INRA, Nancy ;  
<sup>4</sup>Office National des Forêts, Département R&D, Fontainebleau, France ; <sup>5</sup>University of Iceland, Iceland and University of Lund, Sweden

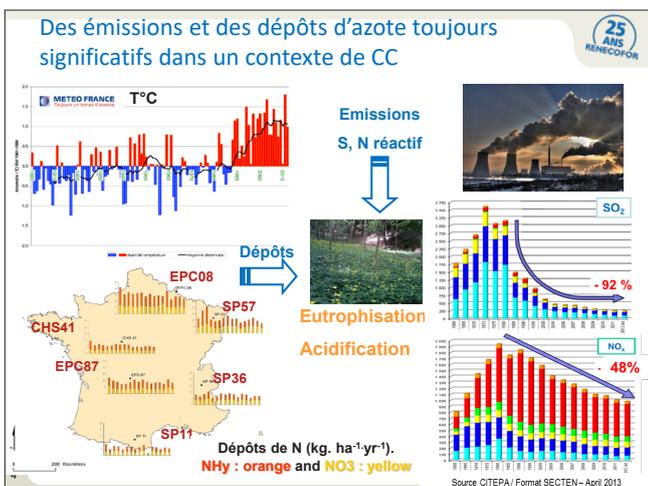
Je vais avoir le plaisir de vous présenter des résultats de recherches collaboratives entre disciplines, qui impliquent des biogéochimistes, des écologues et des modélisateurs. Nous sommes ici à l'aboutissement d'une étape de cette démarche de modélisation, et je n'ai indiqué ici que les auteurs qui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

Je remercie Eric Dufrière 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 montre 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  $\text{SO}_2$  et de  $\text{NO}_x$  dues à notre activité anthropique. Vous savez aussi que nous connaissons un changement avéré de température, comme le montre le graphique 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  $\text{SO}_2$  et  $\text{NO}_x$ , 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  $\text{SO}_2$  ont largement baissé, et celles de  $\text{NO}_x$  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 RENECONFOR). Quoiqu'il en soit, on est toujours dans un contexte de dépôts azotés forts pour nos écosystèmes.

## Des effets de l'azote observés sur la diversité végétale

La biodiversité diminue avec l'augmentation des dépôts d'azote total inorganique

Stevens et al. 2006 Science

- 1 espèce perdue (4m²) pour 2.5 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ déposé en plus
- 23% de perte biodiversité pour 17 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (dépôt d'azote moyen européen)

Présence *Galeopsis tetrahit* (Haut-Rhin)

Les espèces nitrophiles progressent en lien avec une baisse du C/N des sols

5

## Des effets de l'azote observés sur la diversité végétale

La biodiversité diminue avec l'augmentation des dépôts d'azote total inorganique

Stevens et al. 2010

- 1 espèce perdue (4m²) pour 2.5 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ déposé en plus
- 23% de perte biodiversité pour 17 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ (dépôt d'azote moyen européen)

Les espèces nitrophiles semblent progresser en lien avec une baisse du C/N des sols

Dupouey et al., 2008

6

## Les charges critiques : c'est quoi ?

un outil de référence pour raisonner la réduction des émissions de polluants

**Pour éviter ça !**  
« Triangle noir »  
Monts des Géants: République Tchèque (juin 2005)

**20 ans après le pic d'émissions**

@aprost

\*La charge critique est une estimation de l'apport maximal d'azote dans un écosystème n'induisant pas d'effet négatif apparent sur un élément sensible de l'environnement (Nilsson & Grenfelt, 1988)

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

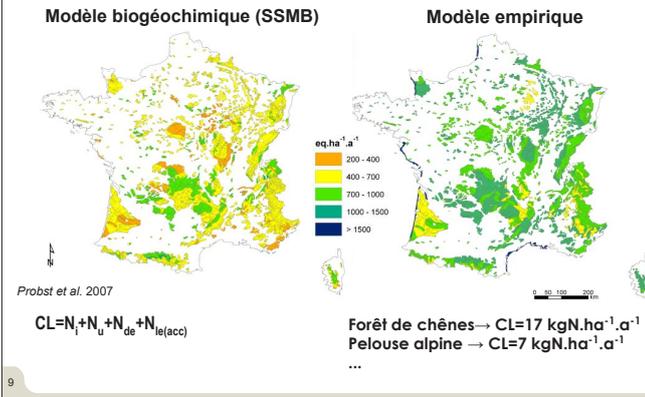
Pour tenter de réduire ces émissions et dépôts azotés, la communauté européenne s'est mobilisée au début des années 1990, suite au dépérissement des forêts et à tous les travaux qu'il a suscités. L'enjeu n'était pas de faire des réductions systématiques un peu « idiotes » mais d'essayer de les faire 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<sub>2</sub> : 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.

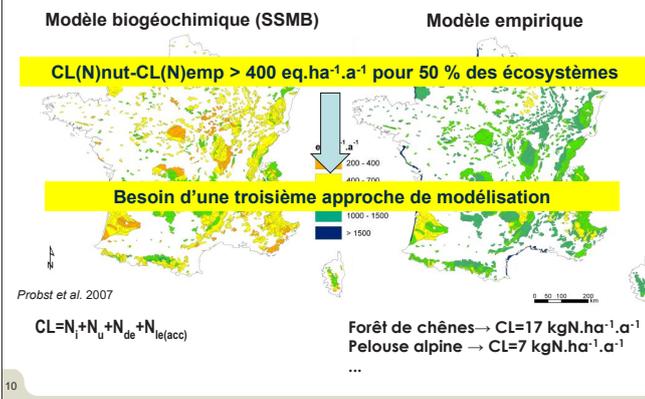


Photo : Luc Croisé, ONF

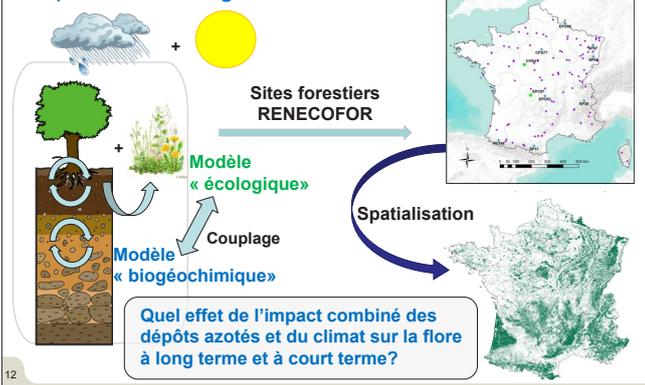
## Une sensibilité à l'azote révélée par les charges critiques des écosystèmes forestiers français



## Une sensibilité à l'azote révélée par les charges critiques des écosystèmes forestiers français



## Hypothèse: les dépôts d'azote modifient la biogéochimie du sol et agissent en cascade sur la réponse de la végétation



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).

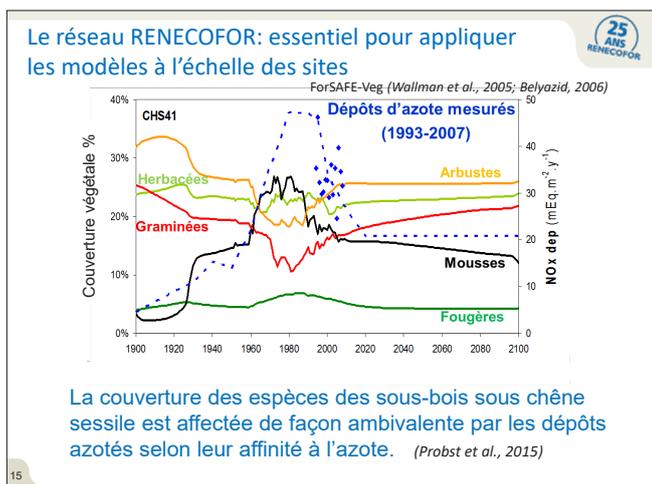
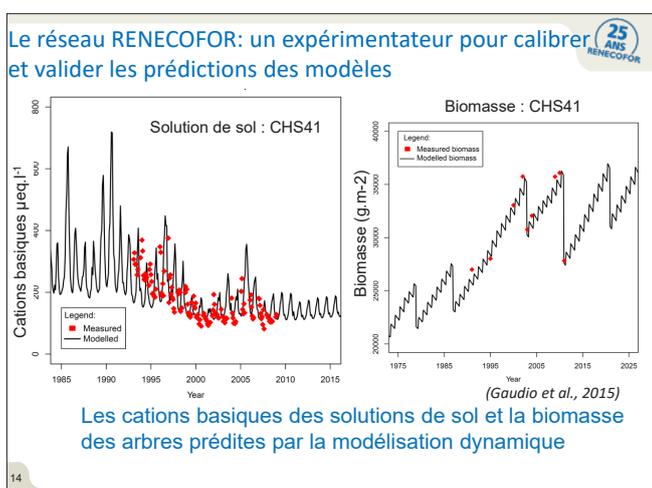
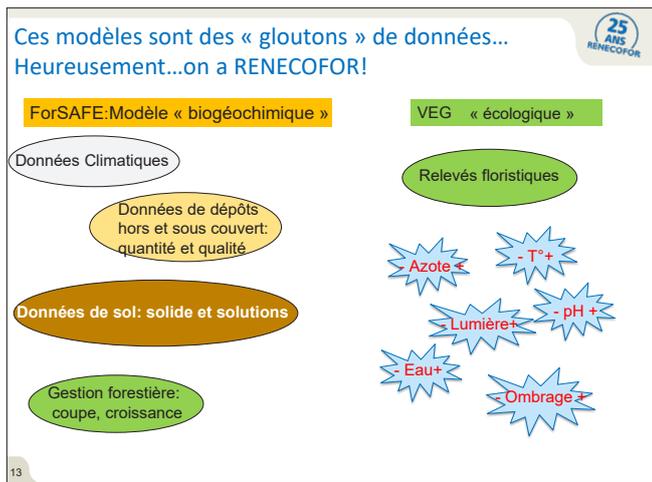
Autant dire que ces deux méthodes (bilan de masse et évaluation empirique) posent la question de leur adaptation pour l'azote et notamment de leur cible de protection. Nous nous sommes donc penchés sur une troisième approche de modélisation, beaucoup plus mécaniste.

## 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 avons 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 « écologique » 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.

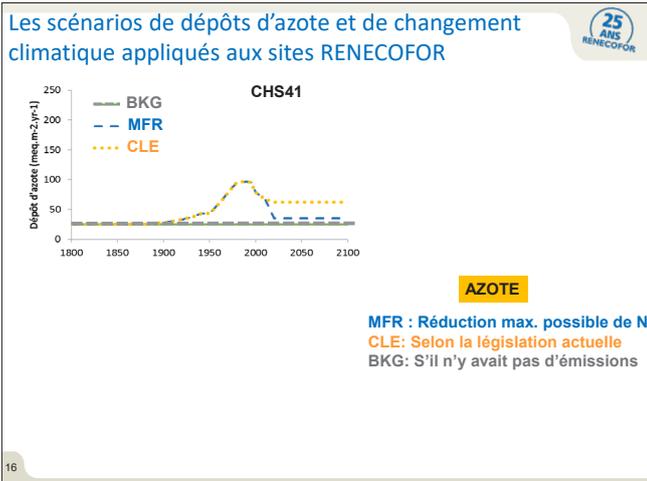
De la même façon nous avons utilisé d'autres indicateurs comme la biomasse (graphe de droite), que vous mesurez aussi dans les sites du réseau et que le modèle est capable de simuler.

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.



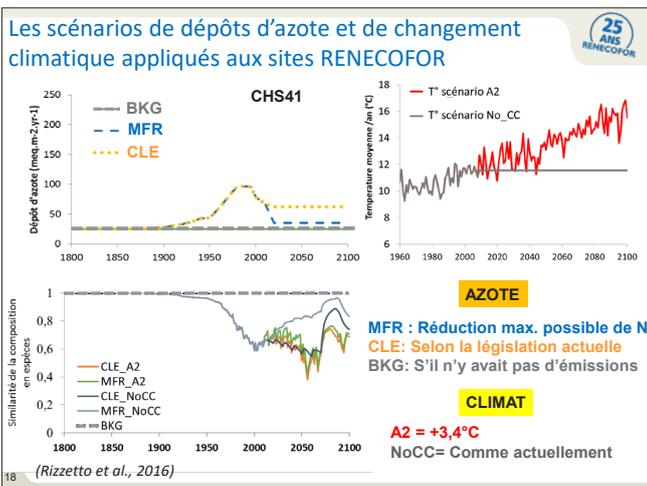
Installation du dispositif de recueil des solutions de sol (bougies poreuses)

Photo : Erwin Ulrich, ONF



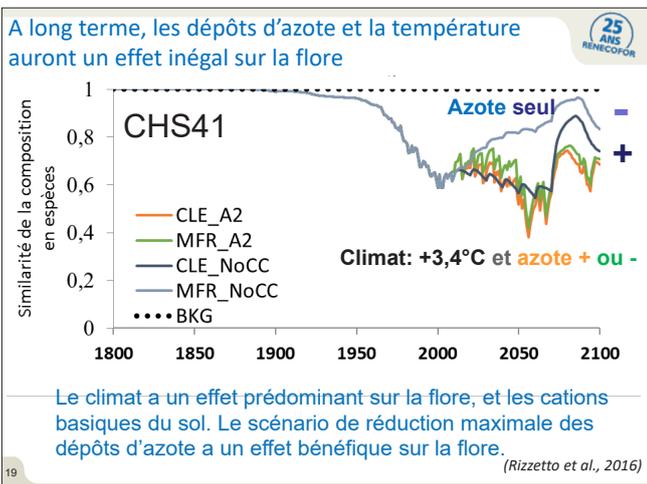
Une étape importante était donc franchie. Nous nous sommes alors penchés de façon plus précise sur certains sites, en cherchant à y appliquer des scénarios de dépôt d'azote avec les modèles. Ici par exemple, on voit le dépôt simulé de 1800 à 2100 sur la placette CHS41, avec trois courbes qui correspondent 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.



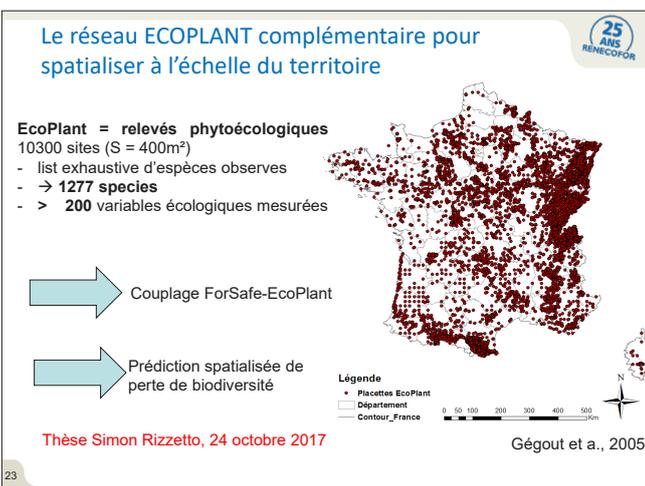
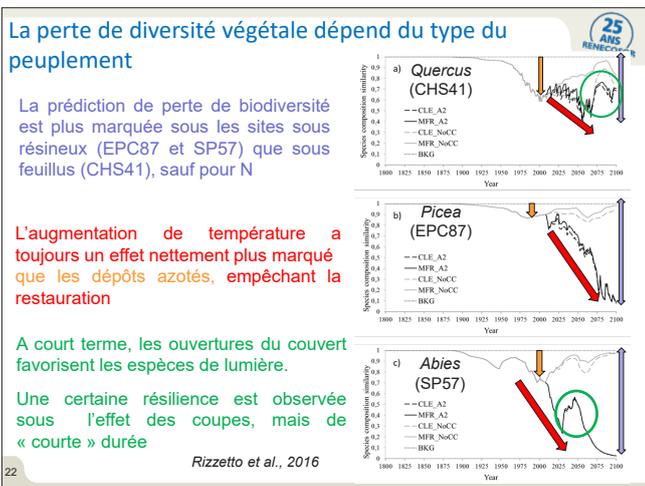
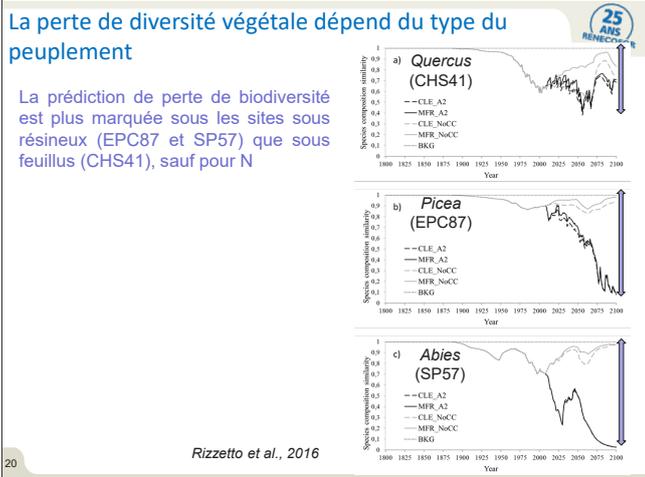
Nous avons testé la réponse de la végétation à ces changements et je vais zoomer sur le graphe (en bas à gauche) qui montre l'évolution simulée de la similarité de la composition en espèces sur la période 1800-2100. Ici une explication s'impose : la similarité de la composition en espèces est un indicateur ; 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.



La placette CHS41

Photo : Luc Croisé, ONF



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 spatialisée à l'échelle du territoire national, en réponse aux dépôts azotés et aux changements de climat.

## « RENECOFOR offre l'accès à des mesures très diverses. C'est une richesse incroyable »

25 ANS  
RENECOFOR

-Calibration et validation de modèles complexes: données environnementales intégrées sur sites aux conditions variées

-Amélioration des modèles par rétroaction

-Lien essentiel entre réseaux européens ICP M&M et Forest:



A renforcer avec IGN, Natura 2000, MERA, EcoPlant

-Continuer les suivis sur un siècle :

- ✓ emmagasiner des connaissances observées : ex. période relevés de végétation trop courte!, tendances divergentes sol/bioindication, effets CC sur carbone, plantes/nutriments sol
- ✓ (in)valider les prédictions des modèles dans un contexte de CC!!

-Applications et enseignements: impact long terme des effets couplés azote et CC sur le cycle de l'azote des écosystèmes, effet des coupes et leur résilience  
**Mais ce n'est qu'un début!**

25

## Merci pour ces 25 ans de collaboration!

25 ANS  
RENECOFOR

-Aux responsables RENECOFOR qui ont permis et facilité la mise à disposition des données et les discussions par la connaissance du terrain

-A tous les acteurs du réseau, pierres essentielles à l'édifice: collecte d'échantillons, gestion des sites, enrichissement et gestion des bases de données etc., ...

« Sans données: pas de connaissances, pas de modélisation possible ! »

**Longue vie aux observations environnementales intégrées!**



© Can Stock Photo - esp/1633913

26

## 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, cela 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 !