

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



Quelle contrainte la pollution à l'ozone fait-elle peser sur les forêts européennes ?

Schaub M¹, Haeni M¹, Ferretti M¹, Gottardini E², Cailleret M¹

¹ Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage WSL (Suisse)
² Fondation Edmund Mach FEM (Italie)



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 que 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.

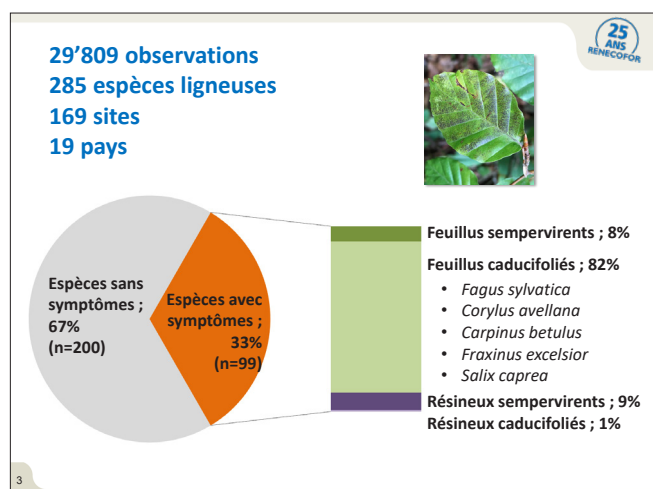
Nous avons examiné 285 espèces sur 169 sites répartis dans 19 pays européens. Vous voyez sur la figure du bas que 33% des espèces examinées présentent des symptômes, et que parmi elles on a une immense majorité de feuillus : environ 8% de feuillus sempervirents et 82% de feuillus caducifoliés (ils sont 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.



L'ozone (O₃) est le seul polluant de l'air à causer des dommages visibles sur les plantes, à chaque saison de végétation.

- L'identification de symptômes typiques sur les feuilles ou aiguilles est la seule manière de détecter ces dommages sur le terrain.

Le PIC Forêts fournit des données harmonisées sur l'ozone depuis 2000



| | Concentration O ₃ | Symptômes O ₃ * |
|---------|------------------------------|----------------------------|
| Période | 2001-2013 | 2001-2013 |
| Pays | 20 | 18 |
| Sites | 232 | 181 |

en base de données

* Espèces ligneuses uniquement, sans *Rubus* sp.

Approche d'analyse statistique

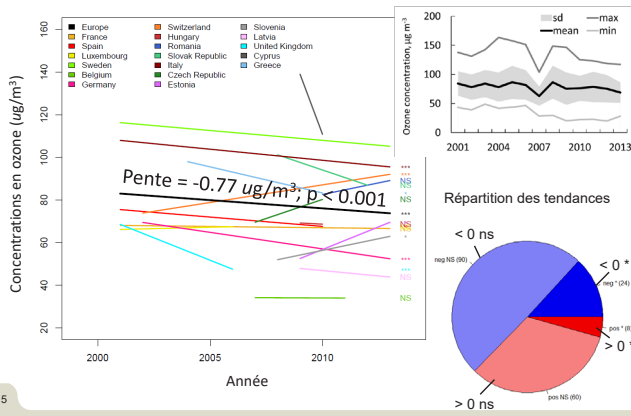
- Modèles de régression logistique sur données brutes de présence (1) et d'absence de symptômes (0). Toutes les observations considérées avec la même pondération.

Analyse de tendance au cours du temps

- Modèle linéaire mixte généralisé, pour prédire la probabilité qu'une plante *i* de présenter des symptômes au temps *t*.

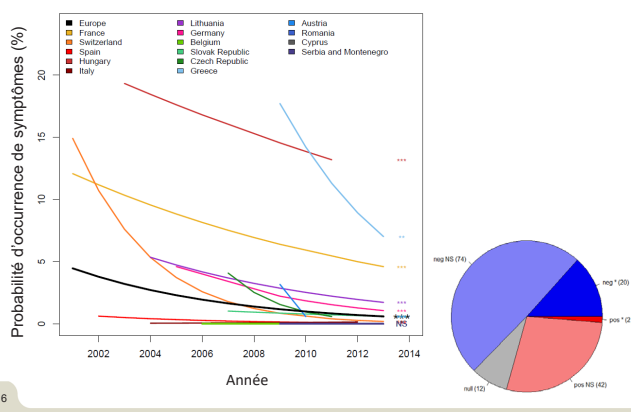
4

Tendance d'évolution des concentrations en O₃



5

Tendance d'évolution des symptômes liés à O₃



6

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 m³ 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.

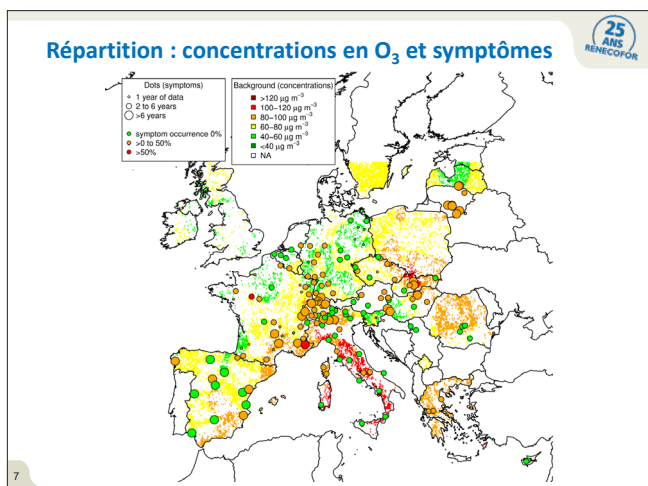
Quoi qu'il en soit, sur ces sites au sein de l'Europe, nous trouvons une tendance à la baisse. C'est d'ailleurs confirmé par le programme EMEP* : l'analyse des mesures de l'EMEP montre une tendance similaire à la baisse. Ça confirme aussi que nos données sont de bonne qualité.

Le camembert en bas à droite récapitule les tendances observées : positives (>0), négatives (<0), significatives (*) ou non (ns).

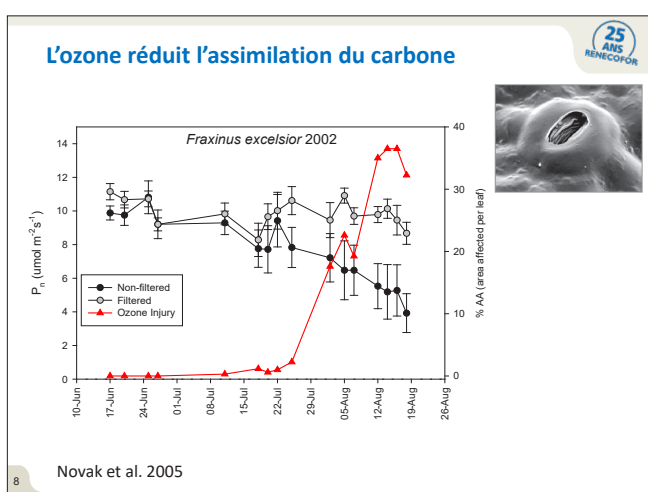
Pour les espèces symptomatiques, la baisse des concentrations d'ozone va de pair avec une baisse de la probabilité d'apparition des symptômes.

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 !



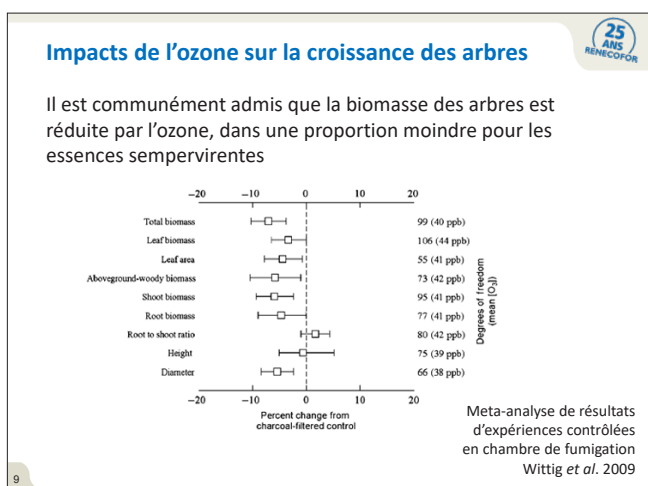
Pour ce qui est de la **distribution spatiale**, nous avons pu produire une première carte pour l'Europe. La couleur de fond indique la concentration d'ozone selon la partie droite de la légende. Et dans la partie gauche de la légende, la taille des points reflète pour chaque site le nombre d'années 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 ?

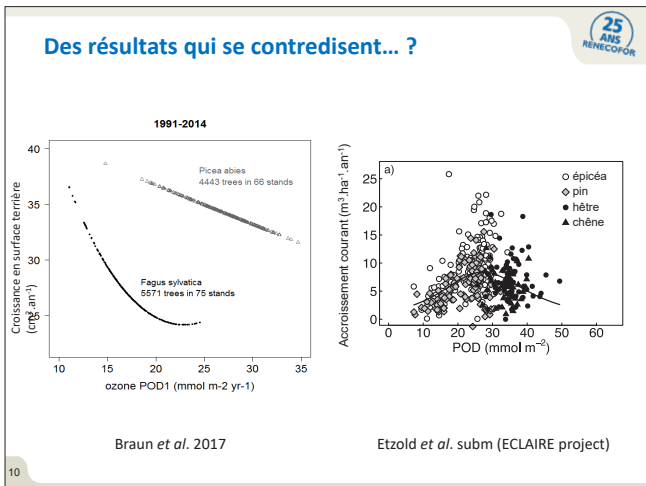
Nous en arrivons maintenant aux mécanismes. Nous savons tous que l'ozone est mauvais pour les plantes, et l'étude de Novak *et al.* (2005) a montré que la concentration d'ozone peut réduire la photosynthèse et l'assimilation de carbone.

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 (P_n, 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 $1 \text{ mmol/m}^2/\text{an}$; 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.

Un impact négligeable de O_3 sur la croissance ?

- Arbres adultes : croissance surtout limitée par les ressources en eau et nutriments (Körner, 2015)
- D'autres facteurs de l'environnement peuvent être plus influents que O_3
- Acclimatation et processus de compensation

Des impacts moins forts sont supposés à de plus grandes échelles de temps et d'espace (de même que l'effet du CO_2)

Etzold *et al.* subm.
Ferretti *et al.* subm.
Leuzinger *et al.* 2011

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.

Modèles de successions forestières

La forêt entière est considérée comme un ensemble de trouées.

Avec des dynamiques spatiales et temporelles indépendantes les unes des autres.

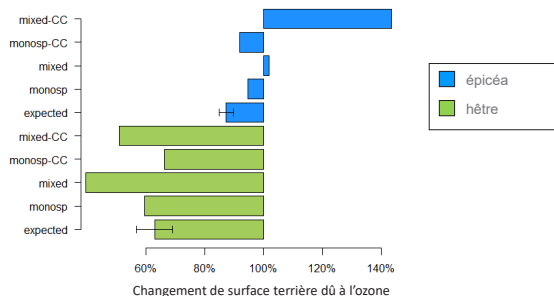
Dans chaque trouée due à la mort d'un arbre dominant, ces modèles prédisent l'évolution de la composition en simulant la régénération, la croissance et la mortalité de chaque essence.

Compétition entre arbres pour la lumière (+ eau, nutriments)

Modéliser pour comprendre

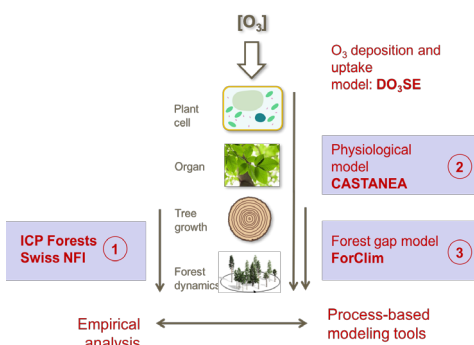
Pour sortir de ce dilemme, ou de cette situation complexe, la solution consiste selon nous à utiliser un modèle de succession forestière. Nous avons la chance d'avoir Maxime Cailleret comme post doctorant dans notre institut. Il travaille depuis plusieurs années avec le modèle ForClim que beaucoup d'entre 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.

Pour l'épicéa, l'effet négatif de l'ozone est plus faible que l'effet positif d'une compétition réduite.



4 simulations (CC) incluant le changement du climat

Projet européen PRO3FILE Quantifier les effets (et interactions) de l'ozone et d'autres facteurs sur la productivité des forêts



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.

Questions sur RENECOFOR

- Quel est l'apport original de RENECOFOR dans les résultats obtenus ?
L'approche de modélisation intègre 23 paramètres collectés de 2000 à 2015 sur des sites répartis en Europe. Sans RENECOFOR, la France ne pourrait pas être considérée dans une telle étude européenne.
- Quels seraient les orientations à prendre pour être en phase avec l'évolution des questionnements et dans l'optique d'un suivi de très long terme (50-100 ans) ?
Aujourd'hui, on dispose de 15 ans de données validées sur l'ozone et la météo, mais des tendances robustes nécessiteraient un minimum de 20 à 30 ans.
RENECOFOR a des données harmonisées et validées : intérêt de les publier dès que possible pour mieux valoriser cet investissement à l'échelle internationale.
- Dans quelle mesure des liens plus intenses avec d'autres réseaux (forestiers ou non) devraient être développés ?
Initiative LTER-Europe -> Orientation du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI).
- Quels enseignements et applications possibles pour la gestion forestière ?
Scénarios et évaluation de risques, sur la base des séries de données longues.

Et merci pour votre attention...