

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

INTRODUCTION

Laurent Saint-André

INRA, Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers

Acidification et cycle des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers

Introduction de la session
L. Saint-André et ses collègues de l'unité Biogéochimie des Écosystèmes 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 CO₂ 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).

Cycles des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers

Cycles biogéochimiques : circulation permanente des éléments minéraux de la plante au sol, et du sol à plante; ces cycles sont ouverts (géochimique)

GÉOCHIMIQUE
- Dépôts atmosphériques
- Altération
- Drainage
- Ruissellement

BIOCHIMIQUE
- translocations

BIOLOGIQUE
- Echanges avec la canopée
- Prélèvements
- Immobilisation
- Litières (aériennes et souterraines)
- Minéralisation des matières organiques

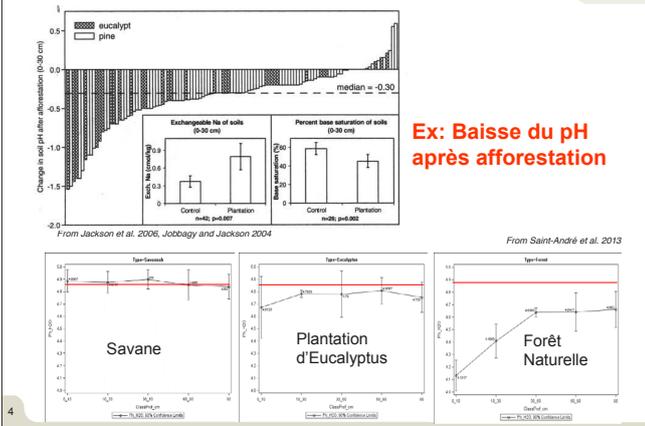
2

Causes de l'acidification des sols forestiers ?

- Accumulation de la matière organique (sites pour les protons)
- Minéralisation de la matière organique (production d'acides organiques, CO₂, nitrates)
- Prélèvements des éléments nutritifs par les arbres (et échange contre des protons)
- Découplage entre la production et le prélèvement des nitrates
- Captation des dépôts atmosphériques (polluants N et S)
- Pratiques sylvicoles qui peuvent accroître l'acidification:
 - éclaircies, coupes à blanc
 - gestion des résidus d'exploitation,
 - changements d'essences
 - fertilisation (quoique limitée en forêt)

3

Les arbres conduisent à une acidification du sol

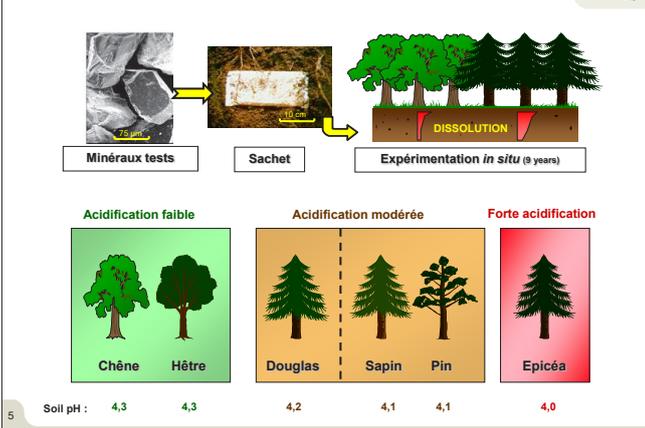


Ex: Baisse du pH après afforestation

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.

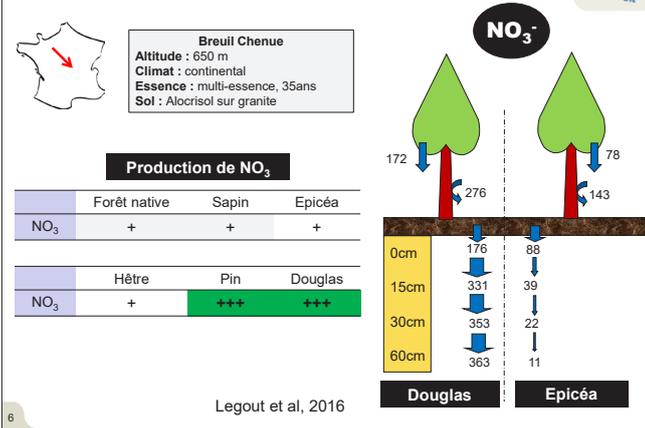
Effet différencié des essences forestières



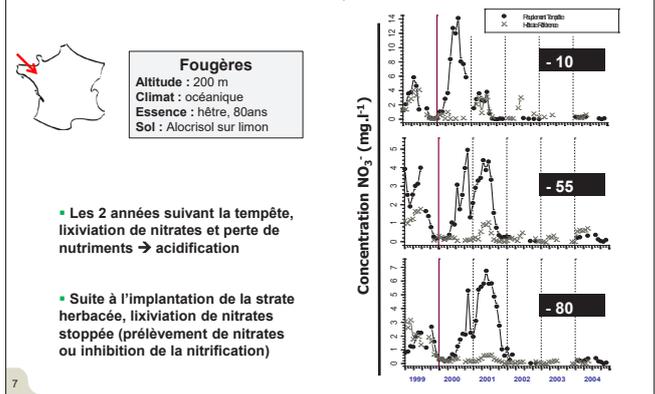
Les essences ont aussi un effet sur la **production et le prélèvement de nitrate (NO₃)** comme le montre le site-atelier de Breuil, dans le Morvan. L'ancien taillis-sous-futaie à base de hêtre a été coupé (en gardant un témoin) pour installer de l'épicéa, du Douglas, des pins, du sapin et du hêtre. La 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.

Effet différencié des essences forestières



Notion de découplage, essentielle dans les processus d'acidification : ex Effet des coupes et éclaircies



Impact des dépôts atmosphériques sur le sol et la durabilité des écosystèmes forestiers

25 ANS RENECOFOR

Forest Ecology and Management
Long-term sustainability of forest ecosystems on sandstone in the Vosges Mountains (France) facing atmospheric deposition and silvicultural change

Global Change Biology
Deterioration of Norway spruce vitality despite a sharp decline in acid deposition: a long-term integrated perspective

Forest Ecology and Management
Assessing Mg and Ca depletion from broadleaf forest soils and potential causes. A case study in the Morvan Mountains

→ Existe-t-il une restauration après la baisse des dépôts acidifiants ?
→ Quels processus en œuvre ?

Impact des dépôts atmosphériques sur le sol et la durabilité des écosystèmes forestiers

25 ANS RENECOFOR

Sites expérimentaux

- Morvan:** Roche: granite; Sols: dystric cambisol; Peuplement: Hêtre, 35 years-old
- Ardennes:** Roche: Schiste Dévonien; Sols: dystric cambisol; Peuplement: Epicéa, 75 ans
- Vosges:** Roche: Grès; Sols: dystric cambisol; Peuplement: Sapin, 60 ans

Approches

- Monitoring des stocks et des flux
- Bilan complets
- Modélisation avec NuCM
- Cohérence des tendances temporelles observées et facteurs explicatifs
- Prédire l'évolution de l'écosystème (sol et plantes) sur le domaine de calibration (Vosges)

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 Dufrière 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.

Impact des dépôts atmosphériques sur le sol et la durabilité des écosystèmes forestiers

25 ANS RENECOFOR

Evolution des dépôts atmosphériques sur les sites

→ Baisse des dépôts S et N
→ Mais également baisse des dépôts de Ca et Mg qui peut induire un délai dans la restauration des écosystèmes

Impact des dépôts atmosphériques sur le sol et la durabilité des écosystèmes forestiers

25 ANS RENECOFOR

Réponses des écosystèmes

Acidification du sol

→ Forte acidification dans le passé (S et N) toujours active (N)
→ Forte acidification toujours en cours due à la désorption du SO_4^{2-}

Tree health and nutrition

Impact des dépôts atmosphériques sur le sol et la durabilité des écosystèmes forestiers

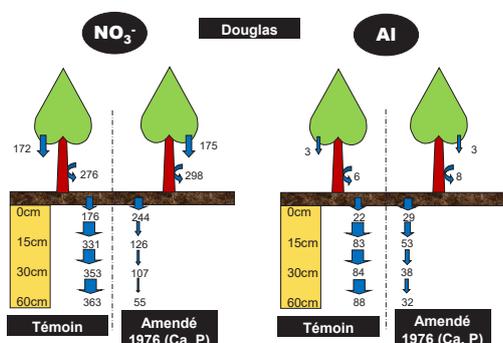


Conclusions

- ✓ Dépôts depuis les années 1970:
 - Forte baisse des dépôts S et dans une moindre mesure N
 - Mais également baisse des dépôts de Ca et Mg qui peut induire un délai dans la restauration des écosystèmes
- ✓ La résilience et la restauration après acidification est faible, voire inexistante sur les écosystèmes étudiés. Différents mécanismes ont pu être mis en évidence mais les conséquences sur la durabilité des écosystèmes est la même 'seuils de carence'.
- ✓ Importance de prendre en compte ce contexte dans les écosystèmes forestiers à faible fertilité chimique lors de l'étude d'autres facteurs impactant le fonctionnement et la durabilité des écosystèmes.

12

Et l'amendement ? (échelle peuplement)



Pas la même fonction qu'en agronomie : en forêt re-dynamisation du cycle biologique

13

Et l'amendement ? (échelle bassin versant)

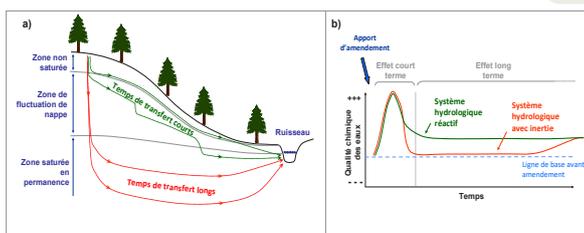


Illustration de quelques chemins possibles empruntés par l'eau et les solutés et incidence sur les temps de transfert au sein du bassin versant.

Evolution de la qualité chimique des eaux de ruissellement en fonction du temps suite à un apport d'amendement ; illustration des effets court et long termes en fonction du système hydrologique en présence.

Le système hydrologique propre à chaque BV conditionne la réponse à l'amendement

14

Place aux présentations de la session



- 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)
- Acidification et eutrophisation : vers un rétablissement de la fertilité des sols forestiers ?
Anaïs Saenger (Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute)
- Recouper les effets de la pollution atmosphérique et du changement climatique sur les écosystèmes forestiers
Anne Probst (CNRS, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement)



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.