

Convention 12C88028.

**(Suivi du phénomène d'acidification et de l'impact des opérations
de remédiation dans le massif vosgien)**

Rapport scientifique

Contrat INRA N° 12000402B

INRA Centre de Nancy Lorraine
54280 Champenoux
tel : 03 83 39 40 41

Arnaud Legout, Benoit Pollier, Philippe Wagner, Serge Didier, François Guerold, Anne Poswa,
Emile Bolou Bi, Gregory Van der Heijden, Nicolas Angeli, Claude Nys, Etienne Dambrine

Rédacteur : Arnaud Legout
Contact : legout@nancy.inra.fr

Partenaires

1. **L'agence de l'Eau Rhin-Meuse**, Route de Lessey, Rozérieulles, BP 30019, 57161 Moulins-les-Metz
2. **L'Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers**, 54280 Champenoux. (*Chercheur* : Legout Arnaud ; *Assistant Ingénieur* : Benoit Pollier ; *Technicien* : Didier Serge)



Décembre 2013

Contexte

Le suivi des effets de la pollution dite des pluies acides dans le massif vosgien s'inscrit en application de la Convention internationale sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance¹ (CLRTAP, CEE – ONU, 1979), ratifiée par la France le 3 novembre 1981. Cette Convention et ses protocoles ultérieurs engagent les signataires à réduire les sources de pollutions atmosphériques et à assurer la surveillance et l'évaluation des impacts de ces émissions.

L'acidification des têtes de bassin des cours d'eau du massif vosgien a été mise en évidence il y a de nombreuses années par la communauté scientifique, conduisant au constat d'une altération marquée de l'état écologique de des milieux aquatiques et forestiers : (i) toxicité de l'aluminium et des protons aggravée par des carences en Ca et Mg; (ii) altération de la ressource par augmentation de l'agressivité des eaux (dégradation des installation d'adduction) ; (iii) dépérissement forestier.

L'université Paul Verlaine-Metz (laboratoire LIEC) assure le suivi scientifique de l'évolution de la qualité des eaux depuis une quinzaine d'années.

L'INRA Centre de Nancy (Unité BEF,UR1138) assure le suivi scientifique de bassins versants (Cornimont et Senones) traités par amendement des sols en 2003 (épandage de dolomie par hélicoptère sous maîtrise d'ouvrage de l'ONF), ainsi que de bassins versants témoins.

Ces deux actions complémentaires qui relèvent d'une approche écosystémique constituent un observatoire unique qui s'inscrit dans la thématique « eaux forestières » de la zone atelier Moselle (ZAM) labellisée par le CNRS et soutenue par la Région Lorraine (PRST Sciences et Génie de l'Environnement). Cet observatoire a fait l'objet de cofinancement par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, et le département des Vosges d'abord en 1995-96, puis de 2002 à 2005 et de 2008 à 2010.

Les résultats acquis par le passé donnent peuvent se résumer ainsi.

- Les dépôts atmosphériques acides ont significativement diminué ces quinze dernières années, mais ils ont, durant cette longue exposition, "consommé" les réserves alcalines des sols, dont l'acidification et la déminéralisation se poursuit du fait notamment de la désorption des sulfates entraînant le drainage des faibles réserves de calcium et magnésium.
- Aucun cours d'eau ne récupère actuellement de l'acidification. Une augmentation de la déminéralisation de certains d'entre eux est très préoccupante et les eaux demeurent toxiques pour les animaux (vertébrés/invertébrés) aquatiques. Des stress acides se manifestent dans quasiment tous les ruisseaux, hypothéquant les possibilités de restauration spontanée

¹ Convention de Genève (CLRTAP), et protocoles d'Helsinki (dioxyde de soufre), de Sofia (oxydes d'azote), d'Oslo (dioxyde de soufre), de Göteborg (acidification, eutrophisation, ozone) ou encore de Kyoto (GES).

- Les amendements des parcelles forestières donnent des résultats positifs dès la première année : le dépérissement des arbres est stoppé, leur statut nutritif évalué par analyses foliaires s'améliore et les sols se reconstituent progressivement.
- Les cours d'eau drainant les parcelles amendées présentent des réponses contrastées : sur granite (BVs de Cornimont), l'amendement bénéficie rapidement au cours d'eau qui voit ses réserves alcalines remonter ; sur grès (BVs de Senones), passé le pic où l'amendement profite au cours d'eau au moment de l'application, cet effet disparaît ensuite. L'hypothèse la plus probable est une infiltration verticale lente au travers de plusieurs mètres d'arène gréseuse vers un aquifère puissant, ce qui augmente les délais d'apport vers les cours d'eau.

La poursuite de l'observatoire

Plusieurs raisons majeures militent en faveur de la poursuite des travaux et de l'appui financier des acteurs concernés, à savoir le département des Vosges et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

- Une carte de France de la sensibilité des sols (est des eaux drainantes) à l'acidification identifie la forte sensibilité du massif vosgien, ce que vérifie la tendance négative confirmée à ce jour. Un suivi précis de cette tendance doit permettre d'affiner des politiques de remédiation (optimisation des méthodes, priorisation zonales, pratiques sylvicoles adaptées,...).
- L'intensification de l'exploitation des produits de la forêt (bois, "produit naturel", exploitation de la biomasse – énergie,...) promue par les plus hautes autorités comme le CESE de Lorraine (filière bois Lorraine, février 2011) risque de conduire à une exportation massive de minéraux normalement recyclés grâce à l'abandon sur place des rémanents. Cette pratique ira donc à l'encontre de l'objectif i) de conservation / restauration durable des sols et des eaux et ii) d'atteinte du bon état écologique des masses d'eau (DCE)
- La poursuite des observatoires doit permettre de documenter l'impact de cette politique et d'en régler l'intensité voire de réorienter les pratiques pour éviter d'ajouter une dégradation anthropique génératrice d'acidification/déminéralisation
- Les fortes charges acides (N et S) du passé ont aujourd'hui laissé place à des dépôts azotés légèrement réduits et à des dépôts atmosphériques de cations diminués (Ca et Mg notamment), qui représentent une source importante de nutriments pour les écosystèmes à faible fertilité minérale (cas du massif Vosgien). Cette tendance est observée à l'échelle de la France et de l'Europe. Les causes de l'acidification ont donc été modifiées mais la résultante est similaire : la fertilité chimique des sols, et donc la durabilité de ces écosystèmes forestiers, sont fortement impactées. La poursuite de la dégradation des écosystèmes forestiers et de fait des eaux qui les drainent est d'ailleurs attestée par l'augmentation des opérations d'amendements dans les Vosges (800 ha en 2008, 2000 ha en 2011) et par l'existence de nouveaux projets.

- Le massif vosgien constitue un site laboratoire qui permet tout à la fois des recherches sur le fonctionnement des écosystèmes et la mise au point de méthodes de diagnostic et de remédiation. Ces pratiques expérimentales de remédiation ont des effets dans le temps long. Le suivi des effets (évolution vers un nouvel équilibre écologique) paraît nécessaire en terme de retour d'expérience pour mettre au point des méthodologies génériques.

Objectifs de l'étude et actions menés

Afin de mieux comprendre l'évolution spontanée de la qualité du réseau hydrographique mais également les effets d'amendements calco-magnésiens, le présent projet vise à :

- poursuivre le suivi de la restauration par amendement des cours d'eau sur les bassins versants de Cornimont et Senones
- définir les tendances d'évolution de la fertilité minérale des sols liées à l'amendement et évaluer la relation existante entre ces tendances et la qualité physico chimique des cours d'eau
- définir/évaluer dans quelle mesure les pratiques sylvicoles, notamment l'accroissement de l'exportation de biomasse, peuvent impacter la fertilité minérale sur ces bassins versants, et par conséquent les cours d'eau

Pour atteindre ces objectifs, le projet se décline en 3 actions étroitement complémentaires :

- ◆ **Action 1** - Acquérir des données relatives à la qualité physico-chimique des ruisseaux des bassins versants sur grès et sur granite (amendés et témoins), afin de préciser l'évolution des cours d'eau et leur restauration possible par amendement calco-magnésiens.
- ◆ **Action 2** - Evaluer l'effet de l'amendement sur la qualité physico-chimique des sols, des humus, et des peuplements (statut nutritif via analyses foliaires) près de 9 ans après l'amendement, afin i) de préciser sur l'écosystème les tendances en termes d'acidification et de remédiation par l'amendement et ii) de comparer ces tendances avec l'évolution de la qualité chimique des cours d'eau.
- ◆ **Action 3** - Etablir des bilans entrées-sorties sur les bassins versants amendés et témoins puis évaluer l'impact de quelques scénarii sylvicoles (rémanents laissés au sol, rémanents exportés....) sur la fertilité minérale.

Résultats

Suivi de la qualité physico-chimique des ruisseaux des bassins versants sur grès et sur granite (amendés et témoins)

❖ Personnes impliquées :

Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*), Benoit Pollier (*AI, INRA BEF*), Serge Didier (*TR, INRA BEF*)
Anne Poswa (*MC, LIMOS*), François Guerold (*Professeur, LIEC*), Philippe Wagner (*LIEC*),
Etienne Dambrine (*UMR Carrtel*)

❖ Rappel des objectifs :

L'acquisition de données sur le long-terme est indispensable pour dégager des tendances significatives et ainsi préciser l'évolution des cours d'eau et leur restauration possible par amendement calco-magnésiens. Ces BV sont par ailleurs les seuls dispositifs de ce genre en France ; beaucoup d'autres dispositifs existent à l'échelle de la parcelle/placette forestière mais le passage à l'échelle du BV est très riche d'information.

Les suivis des ruisseaux à l'exutoire des bassins versants vosgiens du Val de Senones et de Cornimont, commencés en 2003, ont donc été prolongés dans le cadre de cette convention (prélèvements mensuels). Les concentrations en éléments majeurs (Al, Ca, Mg, K, Fe, Si, Mn, S, P par ICP-AES ; NH₄, NO₃, Cl par Colorimétrie ; Ctotal) ont été déterminées sur les échantillons prélevés lors des campagnes de terrain. Une mesure du pH et a également été réalisée.

❖ Présentation des résultats :

Sur **roche mère granitique** (Cornimont, Figure 1,2 et 3), les concentrations en Ca et Mg restent supérieures dans le ruisseau du bassin versant amendé en comparaison du témoin, 9 ans après l'apport d'amendement. Les concentrations en Al sont quand à elle supérieures dans le bassin versant témoin qui conserve un pH plus faible que l'amendé (environ 0.4 unité pH). Les effets de l'amendement sur la qualité chimique des eaux de ruisseaux sont donc encore présents et positifs 9 ans après l'apport. Une prolongation du suivi sur le long terme est nécessaire pour évaluer la durée de ces effets.

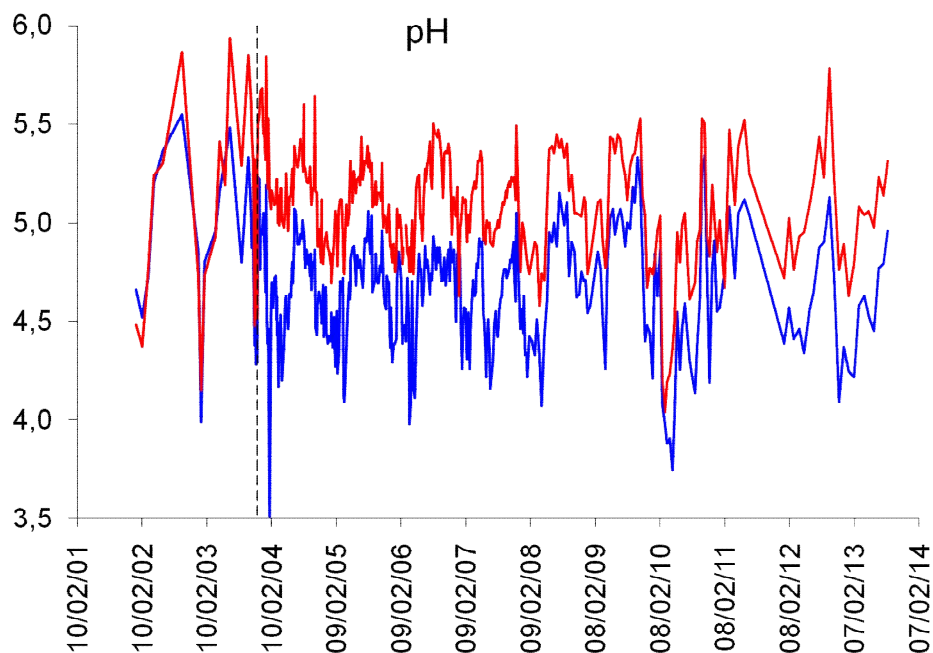


Figure 1 : pH des ruisseaux des bassins versants témoin (bleu) et amendé (rouge) de Cornimont sur la période 2002-2013

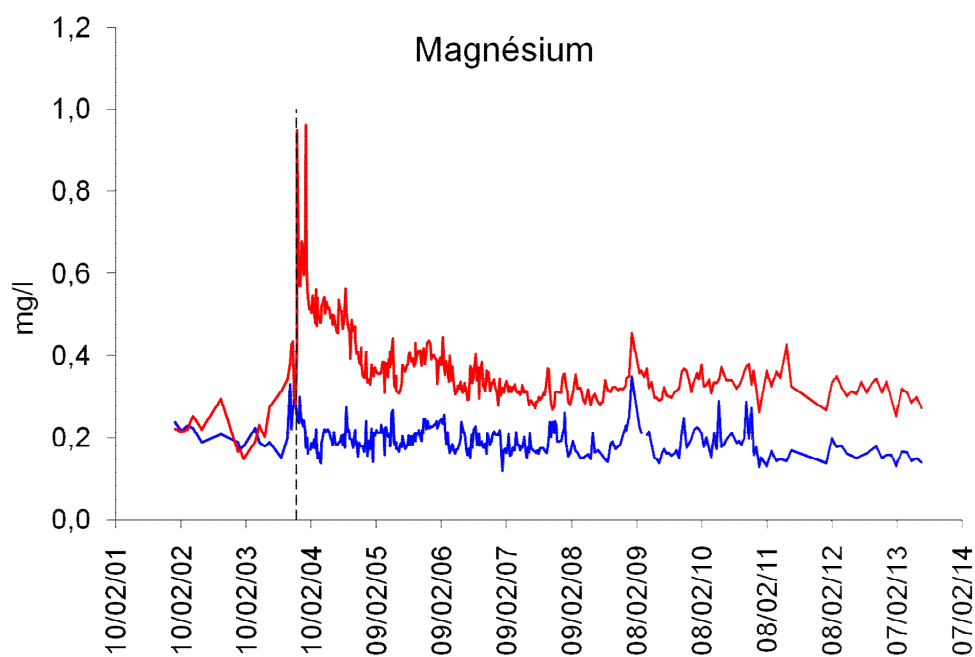


Figure 2 : Concentrations en magnésium des ruisseaux des bassins versants témoin (bleu) et amendé (rouge) de Cornimont sur la période 2002-2013

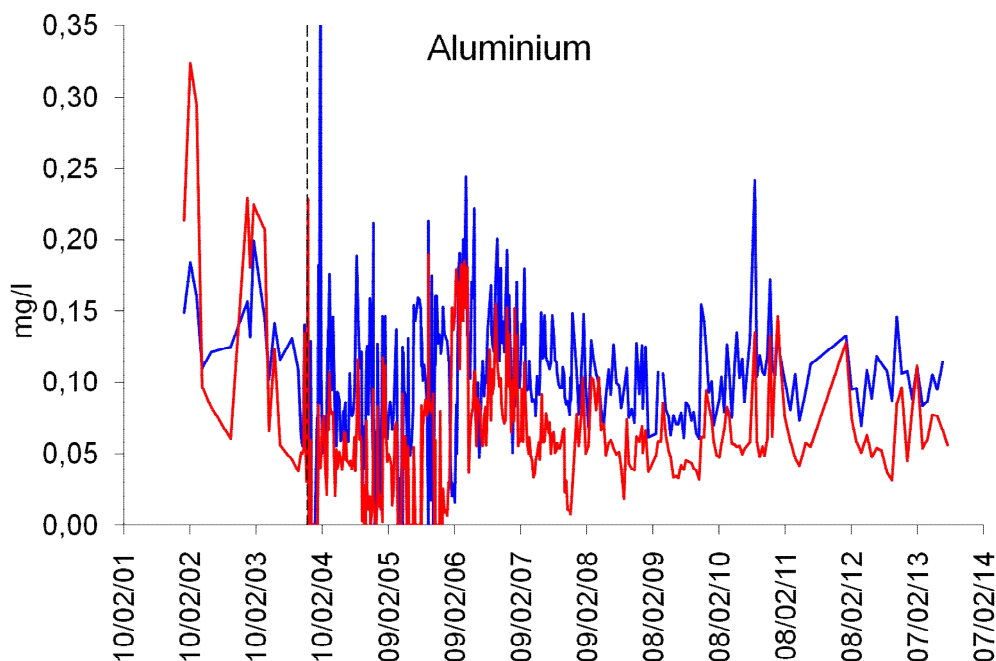


Figure 3 : Concentrations en aluminium des ruisseaux des bassins versants témoin (bleu) et amendé (rouge) de Comimont sur la période 2002-2013

Sur grès (Val de Senones, Figure 4 et 5), le suivi réalisé depuis 2002 n'a toujours pas permis d'observer les effets potentiels de l'amendement sur la qualité des eaux des ruisseaux. L'effet est actuellement inexistant et le traceur Cl n'a toujours pas fait son apparition dans le ruisseau du bassin versant amendé. L'hypothèse d'un temps de transfert de l'eau et des éléments minéraux aux ruisseaux de plusieurs décennies pour ce type de substrat géologique reste la plus probable. Une prolongation du suivi permettrait de voir si un effet est constaté à plus long terme.

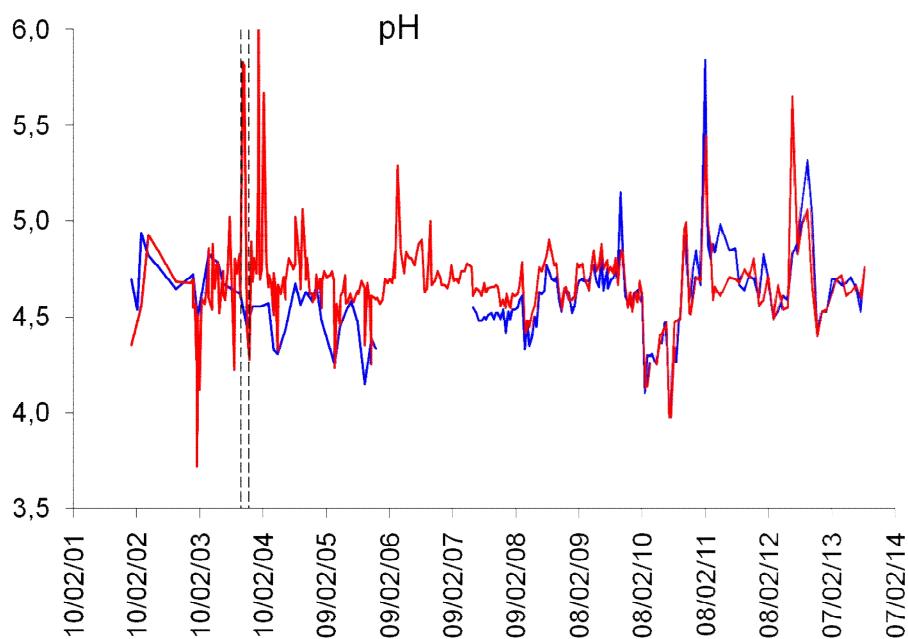


Figure 4 : pH des ruisseaux des bassins versants témoin (bleu) et amendé (rouge) de Senones sur la période 2002-2013.

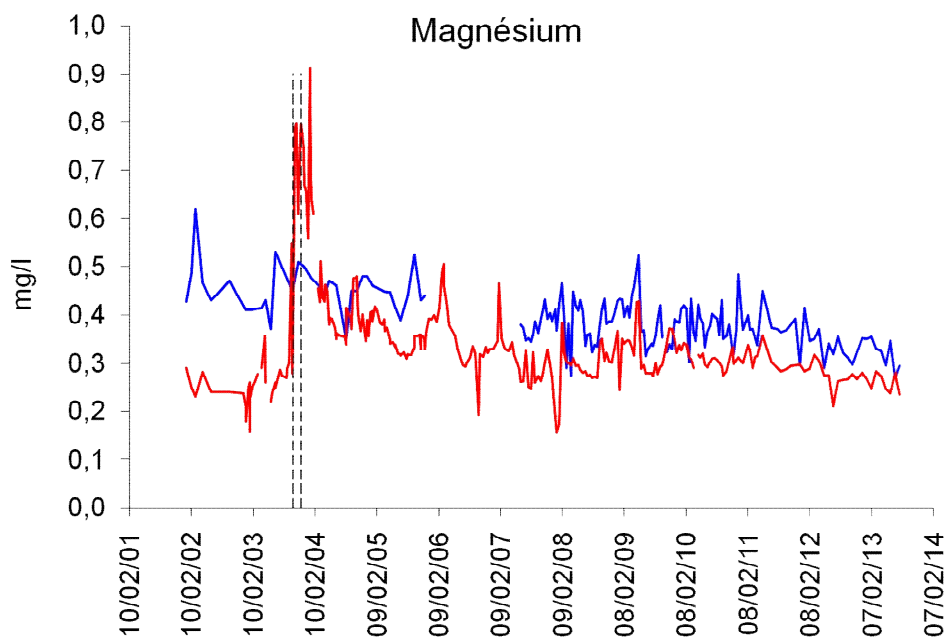


Figure 5 : Concentrations en magnésium des ruisseaux des bassins versants témoin (bleu) et amendé (rouge) de Senones sur la période 2002-2013.

Effet de l'amendement sur les sols, les humus et les peuplements

❖ Personnes impliquées :

Arnaud Legout (CR, INRA BEF), Benoit Pollier (AI, INRA BEF), Serge Didier (TR, INRA BEF)
Anne Poswa (MC, LIMOS), François Guerold (Professeur, LIEC), Philippe Wagner (LIEC),
Etienne Dambrine (UMR Carrtel)

❖ Rappel des objectifs :

Par sa position clé d'interface entre le substrat géologique et la surface, le sol est une des composantes essentielles des écosystèmes forestiers. Ses fonctions de support pour la production (alimentation en eau et en éléments minéraux), environnementales (quantité et qualité des eaux, séquestration de carbone, etc..) et écologiques (maintien de la biodiversité, etc..) et en font un objet dont les services rendus à l'homme sont particulièrement importants dans un contexte d'intensification de l'activité humaine et de changements globaux. Le sol est par contre une ressource peu renouvelable à l'échelle humaine, qu'il faut éviter de dégrader, faute de pouvoir le restaurer aisément.

Les sols du massif Vosgien ont été fortement dégradés par des décennies de dépôts acides. Leur résilience est très faible et une dégradation concomitante de la qualité physico chimique du réseau hydrographique du massif vosgien est enregistrée. Les épandages d'amendement sur les sols ont pour objectif une amélioration globale du fonctionnement de l'écosystème (sol, peuplements, cours d'eau...). L'étude conjointe de l'ensemble de ces compartiments est donc nécessaire pour mieux comprendre la restauration 'en cascade' des écosystèmes traités. L'amélioration progressive du sol (remontée des pH, reconstitution des réserves en éléments nutritifs...) est un processus lent mais il profite à l'ensemble de l'écosystème et il devrait à terme pouvoir corriger l'acidité des cours d'eau.

Dans ce contexte, l'action décrite ici et qui s'inscrit dans une démarche fondamentale, vise à caractériser les tendances d'évolution de la fertilité minérale liées à l'amendement et évaluer la relation existante entre ces tendances et la qualité physico chimique des cours d'eau des bassins versants. Des analyses de sols et d'humus permettront de réaliser un état du pH et des stocks d'éléments (Ca, Mg, K...), 9 ans après amendement. La comparaison aux analyses réalisées avant amendement (2003), puis en 2006, ainsi que les comparaisons des BV témoins et amendés, permettront de préciser l'évolution de la fertilité minérale du sol sur ces écosystèmes vulnérables. Des analyses foliaires permettront quant à elles de déterminer l'état nutritionnel des peuplements, 9 ans après amendement. Ces tendances seront ensuite comparées à l'évolution de la qualité chimique des cours d'eau. Cette démarche est nécessaire pour comprendre sur le long terme l'effet de la pratique de l'amendement à l'échelle du le BV et les processus en jeu.

❖ Présentation des résultats :

Les concentrations foliaires (Figure 6) en Ca et Mg sur le bassin versant témoin de Cornimont sont stables au cours du temps et inférieures aux seuils de carence. Sur le bassin versant amendé de Cornimont, les analyses foliaires montrent une nette amélioration de l'état nutritionnel des peuplements (sapin et hêtre) depuis l'apport d'amendement. Le bassin versant amendé présentait pourtant avant l'apport des concentrations en Ca et Mg plus faibles que le bassin versant témoin. L'amendement a donc permis aux peuplements de retrouver un état nutritionnel correct (concentrations foliaires Ca et Mg supérieures aux seuils de carence). Le constat est similaire pour les bassins versants de Senones.

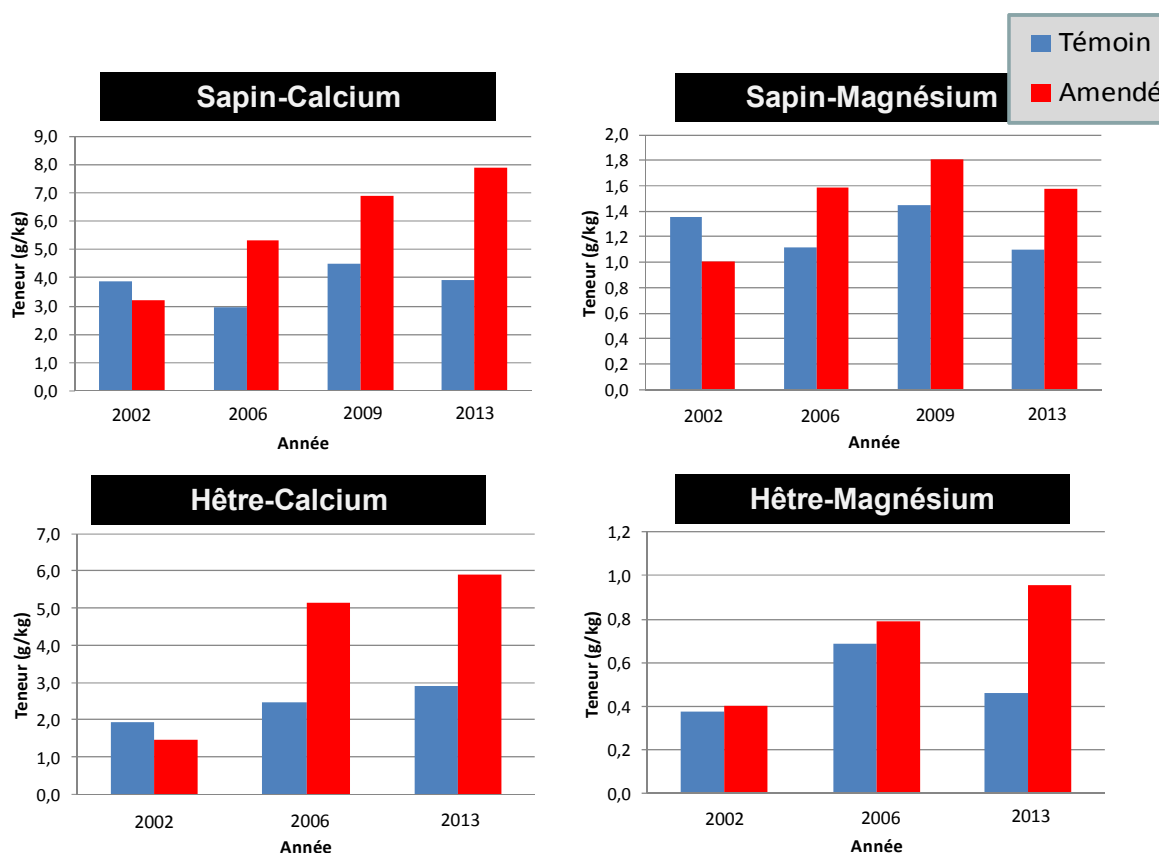


Figure 6 : Concentrations foliaires en Magnésium et calcium pour le sapin et le hêtre, avant l'apport d'amendement (2002) puis après cet apport (2006, 2009, 2013), pour les bassins versants témoins et amendés de Cornimont.

Pour mieux comprendre l'amélioration du statut nutritionnel des peuplements, il faut s'intéresser aux éléments nutritifs biodisponibles dans les sols. En 2013, les teneurs en calcium et magnésium échangeables des sols du bassin versant témoin de Cornimont (Figure 7) sont faibles et inférieures aux teneurs mesurées dans les premiers horizons de sol du bassin versant amendé. Ces résultats sont en accord avec les augmentations de pH enregistrées dans l'horizon 0-15cm du bassin versant amendé. Les teneurs en potassium sont relativement similaires entre le bassin versant témoin et amendé en 2013, cet élément étant présent en quantité très limitée dans la formulation de l'amendement (80 kg/ha de KCl).

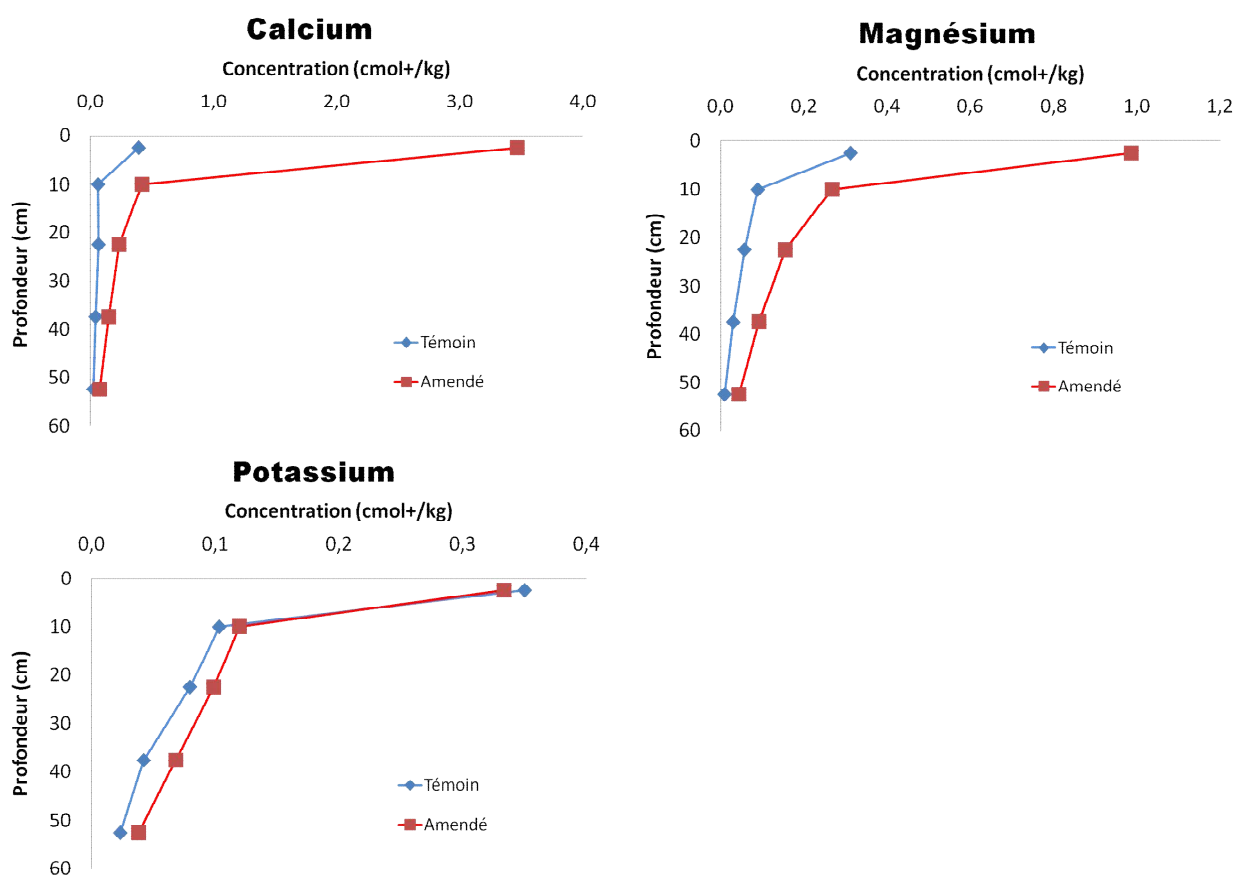


Figure 7 : Teneur en calcium, magnésium et potassium échangeables des sols des bassins versants témoins et amendés de Cornimont en 2013, 9 ans après l'apport

Les résultats pour les bassins versants de Senones sont présentés dans la figure n°8 et amènent aux mêmes conclusions. L'amendement a permis une augmentation des teneurs en calcium et magnésium dans les premiers horizons du sol du bassin versant amendé.

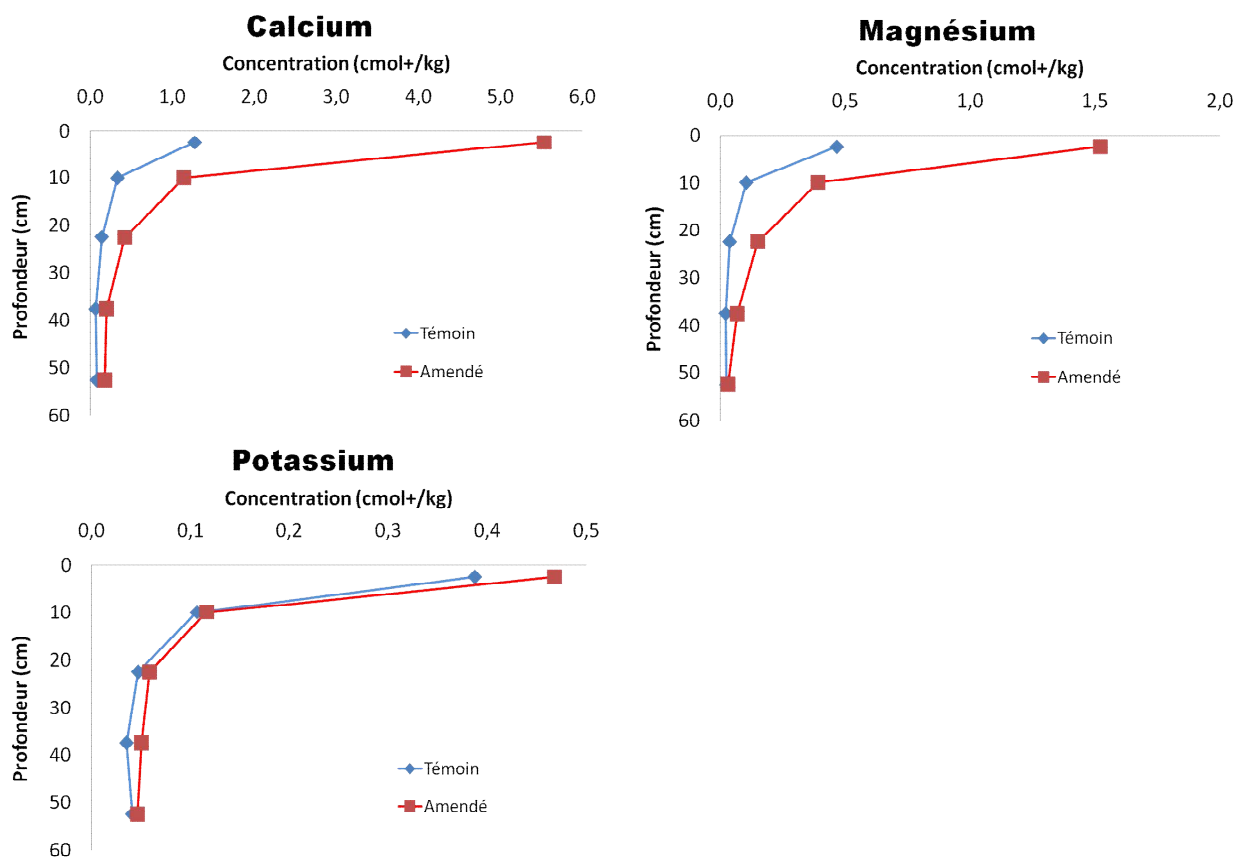


Figure 8 : Teneur en calcium, magnésium et potassium échangeables des sols des bassins versants témoins et amendés de Senones en 2013, 9 ans après l'apport

Conclusion partielle

Quel que soit le substrat (granite ou grès), l'amendement a permis de regarnir en partie le complexe d'échange en cations nutritifs (Ca et Mg), qui ont progressivement remplacé les cations acides (H et Al) dans les premiers horizons des sols. Ces changements ont permis et permettent une meilleure nutrition (évaluée dans cette étude au travers des analyses foliaires) des peuplements dans les bassins versants amendés.

L'effet de l'amendement sur les humus, les sols et le statut nutritionnel des peuplements est donc positif et durable sur Granit et Grès. La réponse ruisseaux est quand à elle plus mitigée (voir partie précédent, fonction du système hydrologique en présence (temps de transfert court vs long)).

Bilan entrées-sorties

❖ Personnes impliquées :

Arnaud Legout (CR, INRA BEF), Benoit Pollier (AI, INRA BEF), Serge Didier (TR, INRA BEF), Etienne Dambrine (UMR Carrtel)

❖ Rappel des objectifs :

Les forêts françaises font face aujourd'hui à des pressions extérieures croissantes. Ces nouvelles contraintes sont d'ordre climatique et/ou nutritionnel et/ou sylvicole. Les dépôts azotés (liés majoritairement au parc automobile) restent à l'heure actuelle élevés et une baisse des éléments nutritifs (Ca et Mg) dans les dépôts atmosphériques est constatée à l'échelle de l'Europe. Les politiques forestières actuelles se tournent également de plus en plus vers une exportation accrue de biomasse forestière pour produire de l'énergie. La durabilité des écosystèmes forestiers à faible fertilité minérale (cas du Massif Vosgiens), donc par définition plus sensibles aux perturbations extérieures, est remise en question dans un tel contexte. La dégradation des écosystèmes forestiers et de fait des eaux qui les drainent est d'ailleurs attestée par l'augmentation des opérations d'amendements dans les Vosges (800 ha en 2008, 2000 ha en 2011) et par l'existence de nouveaux projets.

Dans ce contexte, l'objectif de l'action décrite ici est d'établir des bilans environnementaux « entrées – sorties » pour les bassins versants de l'étude. Ces bilans de fertilité minérale, établis sur plusieurs années grâce aux enregistrements/monitorings réalisés, sont des outils puissants de diagnostic pour voir l'évolution d'un écosystème. Ces bilans établis sur le système « sol » prennent en considération les entrées (dépôts atmosphériques, altération, amendements éventuels) et les sorties (exportations de biomasses, drainage). Le drainage, considéré dans cette approche comme « une perte » alimente les cours d'eau et/ou des aquifères. Nous pouvons ensuite évaluer l'impact de différents scénarii sylvicoles (rémanents laissés au sol, rémanents exportés,...) sur l'écosystème, l'objectif étant de documenter sur les bassins versants l'impact de la sylviculture sur la fertilité minérale des sols et par conséquent sur la qualité des cours d'eaux.

❖ Présentation des résultats :

En condition de relief modéré et en climat tempéré, le bilan de fertilité peut s'écrire :

<p>BILAN = Entrées [Apports Atmosphériques + Apports par Altération des minéraux du sol + Apports par amendement] - Sorties [Pertes liées à l'Exportation de Biomasse + Pertes par Drainage]</p>
--

Les bilans ont été calculés pour les nutriments Ca et Mg. L'interprétation est la suivante :

- ❖ un bilan positif signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont supérieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriments assurant la nutrition du peuplement est donc en augmentation, la fertilité n'est pas menacée et la durabilité de l'écosystème n'est pas remise en question ;
- ❖ un bilan négatif signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont inférieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriments assurant la nutrition du peuplement est donc en diminution, la fertilité est menacée et la durabilité de l'écosystème est remise en question. L'écosystème est en danger si aucun redressement n'est envisagé.

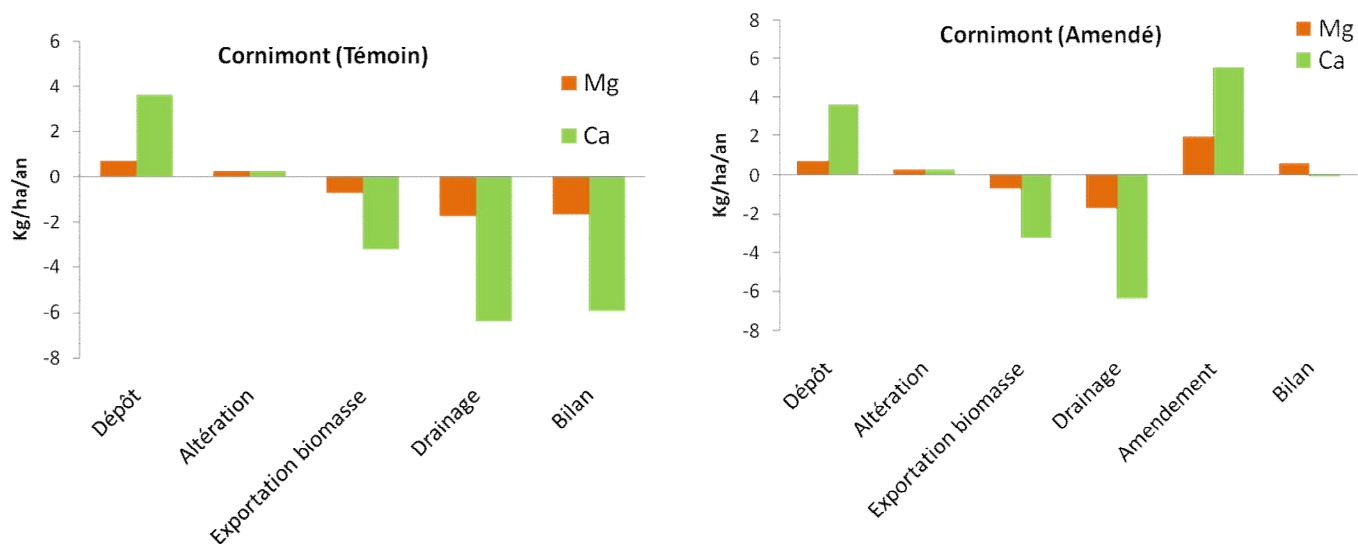


Figure 9 : Bilans entrée-sortie pour les sols des bassins versants témoins et amendés de Cornimont

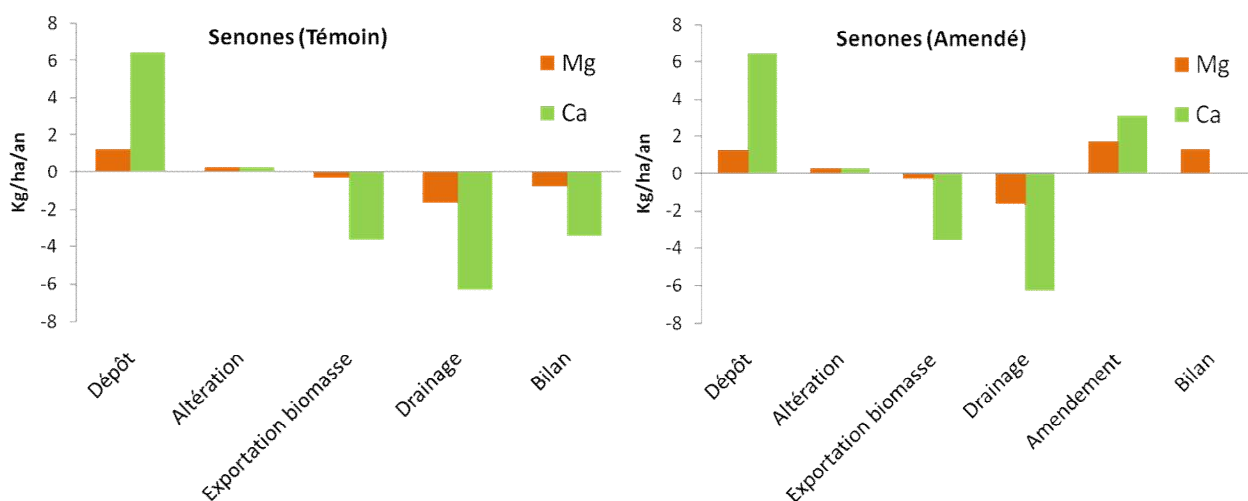


Figure 10 : Bilans entrée-sortie pour les sols des bassins versants témoins et amendés de Senones

Quel que soit le substrat (granite ou grès), les bilans entrées-sorties sont négatifs pour le calcium et le magnésium pour les bassins versants témoins (Figure 9 et 10). Cela signifie que le stock de Ca et Mg assurant la nutrition du peuplement est en diminution. Ces bilans indiquent que la durabilité de ces écosystèmes est remise en question et corroborent les préconisations d'apport d'amendement faites en 2002.

Les bilans entrées - sorties pour les bassins versants amendés sont proches de l'équilibre ou légèrement positifs. L'amendement a donc permis de rééquilibrer les bilans mais ceux ci

restent fragiles. Dans ces écosystèmes, il n'est pas envisageable d'accroître l'exportation de biomasse (rémanents...) sans nuire à la durabilité de ces écosystèmes (perte de certaines fonctions, dégradations de la qualité des eaux de surface...).

Dans le contexte actuel de demande de production accrue de bois énergie, les bilans réalisés sur les bassins versants amendés (Figures 9 et 10) illustrent parfaitement le fait que la remédiation chimique (amendement) est indissociable d'une politique raisonnée d'exportation des rémanents en forêt. L'apport d'amendement sur sol pauvre chimiquement à des fins de restauration de la fertilité ne doit pas inciter à réaliser des surexploitations de biomasse.

Conclusions

Le gestionnaire peut intervenir sur de nombreuses variables pour permettre l'utilisation durable de la capacité à produire des écosystèmes forestiers. Dans les différents termes pris en compte dans le calcul d'un bilan de fertilité minérale (Apports atmosphériques, Apports par altération, Pertes par drainage, Pertes liées à l'exportation de biomasse), le terme « pertes liées à l'exportation de biomasse » est le plus facilement modulable par l'homme à court terme. Quelques recommandations d'ordre général visant au maintien de la productivité et à la pérennité de l'écosystème, sont rappelées ci-dessous :

Bien choisir l'essence : adapter au mieux l'essence à la station apporte une garantie pour optimiser durablement les fonctions de l'écosystème, éliminant bon nombre de stress aux peuplements.

Gestion des coupes adaptée : pratiquer des transitions les plus progressives possibles entre les révolutions forestières et préserver au maximum une couverture végétale au sol (strate herbacée, régénération bien établie) pendant ces transitions. Proscrire les coupes à blanc qui peuvent occasionner des pertes importantes de nutriments.

Récolter les arbres à un âge suffisamment avancés : les stades initiaux de la vie de peuplements pérennes sont les moins efficaces en terme d'utilisation des ressources minérales pour produire la biomasse (tissus jeunes dominants, recyclage interne à la plante limité, forte allocation des ressources vers le houppier...).

Raisonner la récolte et le traitement des rémanents (Cacot, Eisner et al. 2005). Les rémanents (branches, feuilles, aiguilles) sont des organes très riches en nutriments ; ceux-ci, lorsqu'ils sont exportés, constituent une perte pour l'écosystème.

Répartir les rémanents issus d'une éclaircie ou d'une coupe de régénération de façon homogène sur l'ensemble de la parcelle, afin d'éviter de concentrer les éléments nutritifs retournant au sol sur des surfaces réduites (l'andainage concentre spatialement la fertilité et peut conduire à des peuplements en vague). Éviter les décapages à la lame qui entraînent une perte de fertilité importante si l'humus et/ou l'horizon A sont raclés. Le broyage des rémanents peut permettre de mieux répartir la fertilité mais attention à l'incorporation de rémanents au sol qui peut impacter ses fonctions (perturbation de la structure, de la porosité, de la diversité fonctionnelle....).

Raisonner la méthode de récolte pour limiter notamment la dégradation physique des sols.

Favoriser les mélanges gérables d'essences, de façon à maintenir une biodiversité fonctionnelle active dans l'écosystème. Cette pratique peut conduire à des difficultés de gestion, notamment si la vitesse de croissance des essences est très différente. Le mélange peut se concevoir à différents pixels : pied à pied, bouquets, bandes... etc.

Bibliographie

Cacot, E., N. Eisner, F. Charnet, P. Leon, C. Rantien and J. Ranger (2005). La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers, ADEME Editions.