

# Convention particulière zone atelier Moselle. Thème Vosges Forestières Amont.

(Restauration naturelle ou provoquée des ruisseaux vosgiens  
acidifiés au cours des années 70 et 80)

## Rapport scientifique

Contrat INRA N° 12000118A

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

*Contact : legout@nancy.inra.fr*

### Partenaires de la convention

1. **Conseil Général des Vosges**, 8 rue de la préfecture, 88088 Epinal.
2. **L'agence de l'Eau Rhin-Meuse**, Route de Lessey, Rozérieulles, BP 30019, 57161 Moulins-les-Metz
3. **L'Institut National de la Recherche Agronomique, Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers**, 54280 Champenoux. (*Chercheurs* : Dambrine Etienne, Legout Arnaud ; *Technicien* : Pollier Benoit)



**Juin 2011**

## Préambule

---

L'eau est une ressource unique, très vulnérable, qu'il convient de mieux connaître, de mieux gérer et de mieux protéger. Les événements actuels et passés ont montré que les problèmes relatifs à l'hydro-système sont d'une part quantitatifs (sécheresse, inondations...) et d'autre part qualitatifs (pollutions, acidification,...), résultant de phénomènes souvent complexes combinant des origines naturelles et anthropiques.

L'acidification des sols, exacerbée par les pollutions atmosphériques, provoque une diminution de la fertilité des sols forestiers, particulièrement marquée sur les grès et les granites naturellement acides et pauvres en éléments nutritifs du massif vosgien. Il en résulte une altération de l'état sanitaire des peuplements de résineux et plus récemment du hêtre, qui deviennent aussi sensibles aux effets des aléas climatiques et aux attaques des ravageurs. Cela se traduit aussi par l'altération de la qualité chimique et biologique des eaux de surface circulant dans ces sols.

L'évolution naturelle des ruisseaux vosgiens tend à une déminéralisation généralisée des eaux et à des évolutions différentes en termes d'acidité. La désorption progressive du sulfate précédemment stocké dans les couches profondes des sols contrôle l'acidité des ruisseaux sur grès ; sur granite, c'est la dynamique du nitrate qui a cet effet. La neutralisation expérimentale par épandage d'amendements calco-magnésiens conduit à des résultats divergents : elle est rapide sur granite mais retardée sur grès, probablement du fait du long temps de transfert de l'eau et des éléments minéraux des sols aux ruisseaux.

## Résumé des actions menées

---

### **Suivi de la qualité des solutions dans les bassins versants vosgiens acidifiés : évaluation des possibilités d'une restauration naturelle et effet de la pratique de l'amendement**

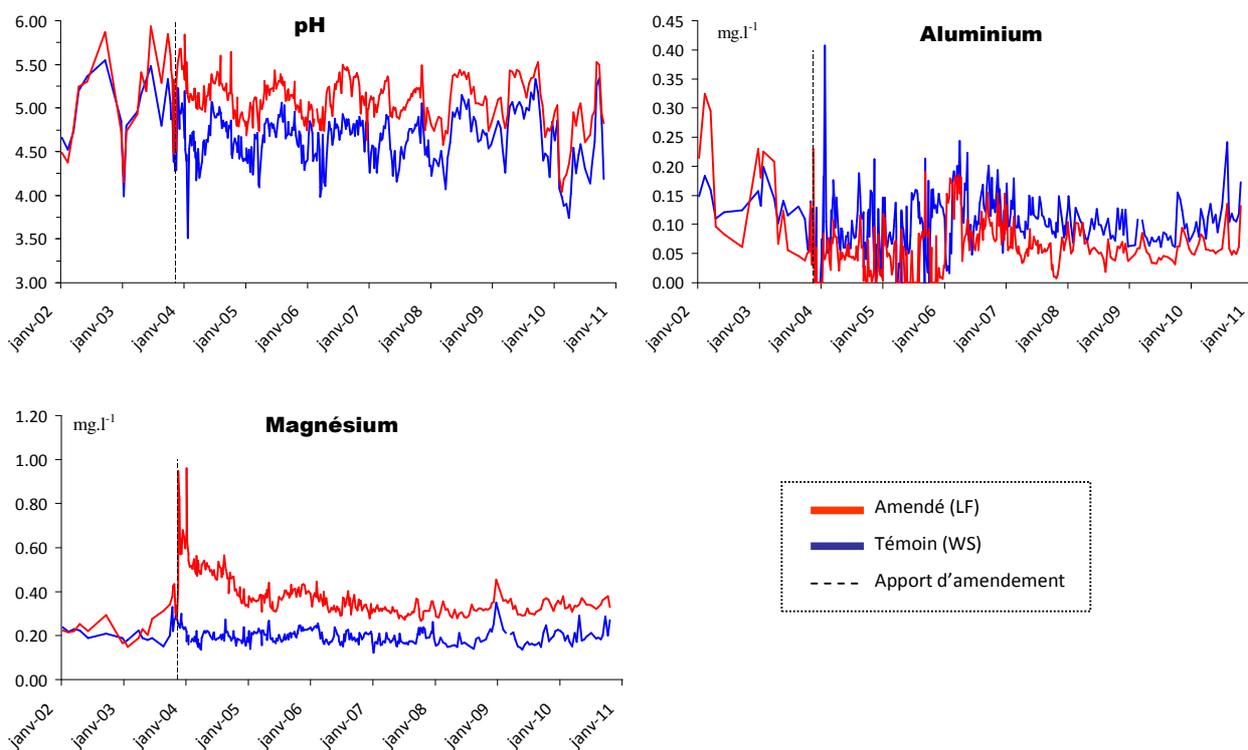
#### ❖ Personnes impliquées :

Etienne Dambrine (*DR, INRA BEF*), Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*), Benoit Pollier (*AI, INRA BEF*), Anne Poswa (*MC, LIMOS*), Nicolas Angeli (*IR, INRA EFF*), François Guerold (*Professeur, LIEBE*), Daniel Viville (*CR, CGS UMR 7517 CNRS / ULP Strasbourg*).

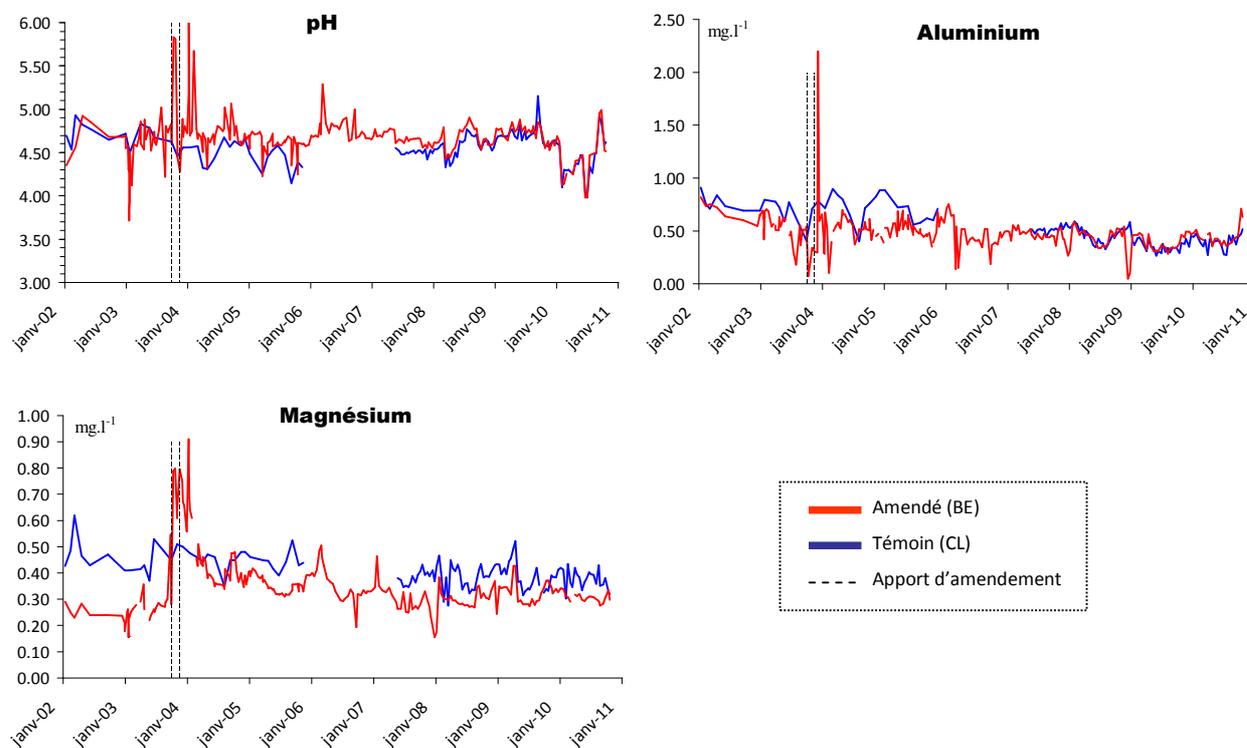
#### ❖ Rappel des objectifs :

Les suivis des ruisseaux à l'exutoire des bassins versants vosgiens du Val de Senones et de Cornimont, commencés en 2003, ont été prolongés de 2008 à 2010 dans le cadre de cette convention (fréquence de prélèvement 15 jours). Les concentrations en éléments majeurs (Al, Ca, Mg, K, Fe, Si, Mn, S, P par ICP-AES ; NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, 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 :**



**Figure 1 :** pH, concentrations en aluminium et en magnésium des ruisseaux des bassins versants témoins et amendés de Cornimont sur la période 2002-2010



**Figure 2 :** pH, concentrations en aluminium et en magnésium des ruisseaux des bassins versants témoins et amendés de Senones sur la période 2002-2010.

Sur **roche mère granitique** (Cornimont, Figure 1), les concentrations en Ca, Mg et S restent supérieures dans le ruisseau du bassin versant amendé en comparaison du témoin, 6 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 6 ans après l'apport. Une prolongation du suivi sur le long terme est nécessaire pour évaluer la durée de ces effets.

Sur **grès** (Val de Senones, Figure 2), le suivi réalisé depuis 2007 n'a toujours pas permis d'observer les effets potentiels de l'amendement sur la qualité des eaux des ruisseaux. En effet, 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.

## **Simulation des effets de différentes évolutions des dépôts atmosphériques et de la sylviculture sur la fertilité des sols et la croissance de peuplements forestiers sur grès Vosgien.**

### ❖ Personnes impliquées :

Gregory Van der Heijden (*M2, INRA BEF*), Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*), Etienne Dambrine (*DR, INRA BEF*), Manuel Nicolas (*ONF*), Erwin Ulrich (*ONF*), Dale Johnson (*Professeur, Université de RENO, USA*)

### ❖ Rappel des objectifs :

L'objectif était d'utiliser un modèle pour prédire l'évolution de la qualité des sols et des eaux sur les bassins versants témoins et amendés. Nous avons retenu pour réaliser ces travaux le 'Nutrient Cycling' modèle (NuCM), qui est un modèle de cycles biogéochimiques à compartiments et à flux. Ce modèle représente l'essentiel des stocks et flux d'éléments minéraux circulant en forêt et permet de simuler la dynamique des éléments minéraux dans et entre les différents compartiments de l'écosystème. Il a été calibré et testé sur de nombreux sites expérimentaux et reproduit dans bon nombre de cas les valeurs observées.

Pour s'affranchir de la complexité de l'écosystème « bassin versant », nous avons choisi dans un premier temps de ne travailler que sur une placette expérimentale du réseau RENECOFOR (SP57) sur grès vosgiens ayant reçu une forte charge acide par le passé (essentiellement S), qui s'apparente fortement par ses caractéristiques pédoclimatique et sylvicole rencontrées au contexte des bassins versants de Senone. Cette placette présente l'avantage d'être très bien documentée et constitue ainsi un écosystème « pilote » pour ces travaux. La complexité de la modélisation à l'échelle même de cette parcelle forestière nous ont conduit à reconsidérer nos objectifs à la baisse. Les simulations de l'effet des changements de dépôts et de sylviculture sur la fertilité des sols et sur la qualité des eaux, ainsi que la réponse de l'amendement sur le long terme, ne seront réalisées dans le cadre de cette convention que sur cet écosystème « pilote ». Ces travaux et les enseignements acquis constitueront la première étape à une modélisation future à l'échelle des bassins versants.

### ❖ Présentation des résultats :

Après l'analyse de l'évolution biogéochimique du site sur la période 1993-2007, nous avons calibré le modèle sur la période 1996-2007. Le modèle a ensuite servi de base pour évaluer pour les 100 prochaines années la réponse de l'écosystème et les évolutions de chimie du sol face à des changements de dépôts atmosphériques (baisse des dépôts soufrés, calciques et magnésiens) et de pratiques sylvicoles (exportations accrues de biomasse).

L'écosystème représenté par la placette SP 57 a été très appauvri par la période de forte charge acide. Le modèle et les bilans d'éléments minéraux montrent une désorption de sulfate dans les sols depuis les années 1990. Le sulfate est drainé entraînant avec lui des cations nutritifs, majoritairement du calcium et du magnésium. Il en résulte une acidification continue malgré la baisse des dépôts atmosphériques soufrés. Le modèle montre que le peuplement encourt un fort risque de carence calcique dans les prochaines décennies et est déjà carencé en magnésium. Ce peuplement ne peut être géré durablement dans la politique forestière actuelle sans apport d'amendement.

### ❖ Publications / communications

Van der Heijden G., 2009. Modélisation de la réponse d'une sapinière sur sol pauvre à des changements de dépôts atmosphériques et de sylviculture. Mémoire de master 2 GGC. 25pp + annexes.

Van der Heijden G., Legout A., Nicolas M., Ulrich E., Johnson D.W., Dambrine E. (in press). Long term sustainability of forest ecosystems on sandstone in the Vosges Mountains (France) facing atmospheric deposition and silvicultural change. *Forest Ecology and Management*

## **Analyse des relations éventuelles entre l'évolution de la qualité chimique de l'eau des ruisseaux vosgiens et de la qualité de l'air**

### ❖ Personnes impliquées :

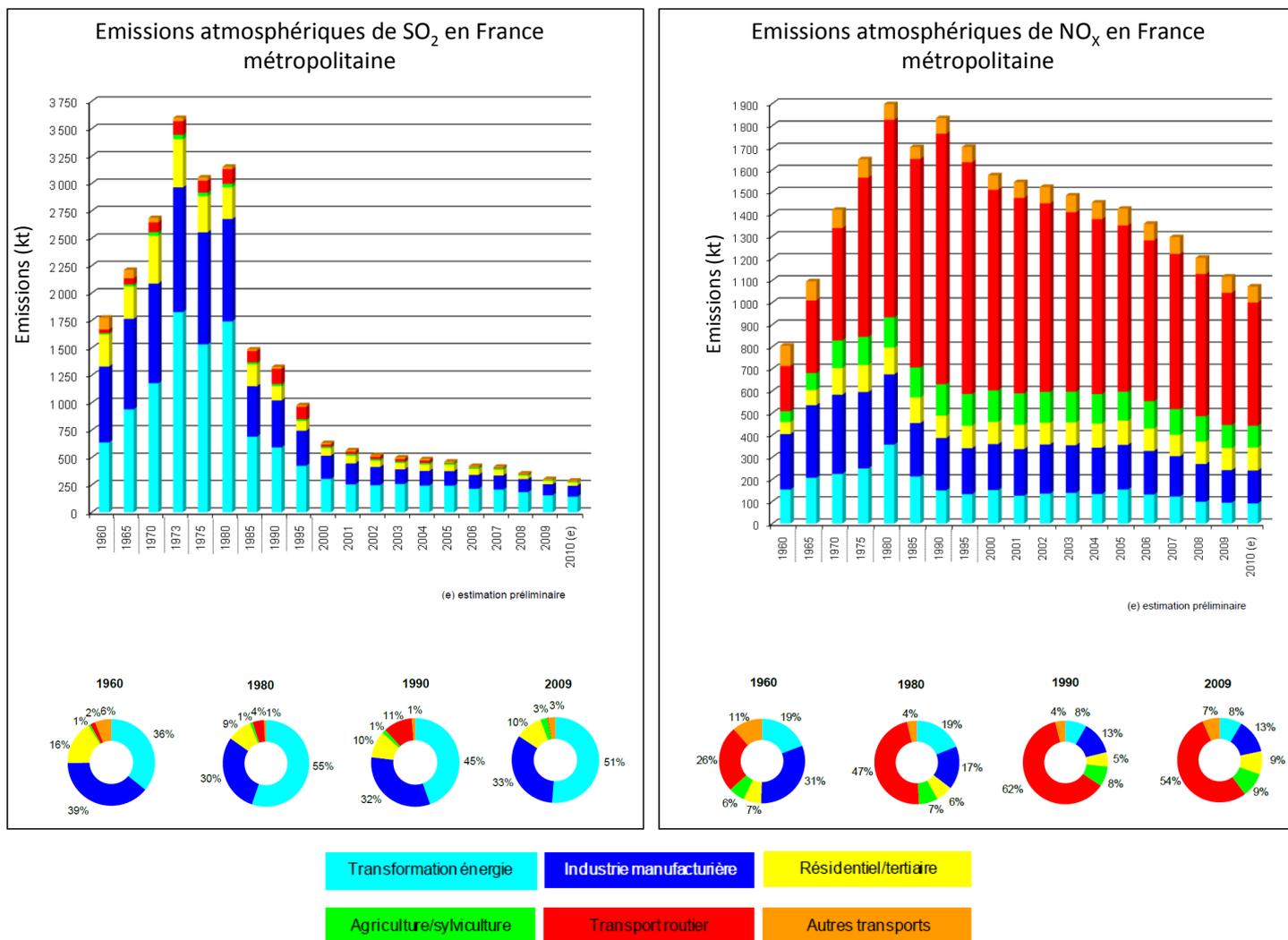
Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*), Benoit Pollier (*AI, INRA BEF*), Etienne Dambrine (*DR, INRA BEF*), Nicolas Angeli (*IR, INRA EFF*), Jean Pierre Schmitt (*Directeur d'Airlor*),

### ❖ Rappel des objectifs :

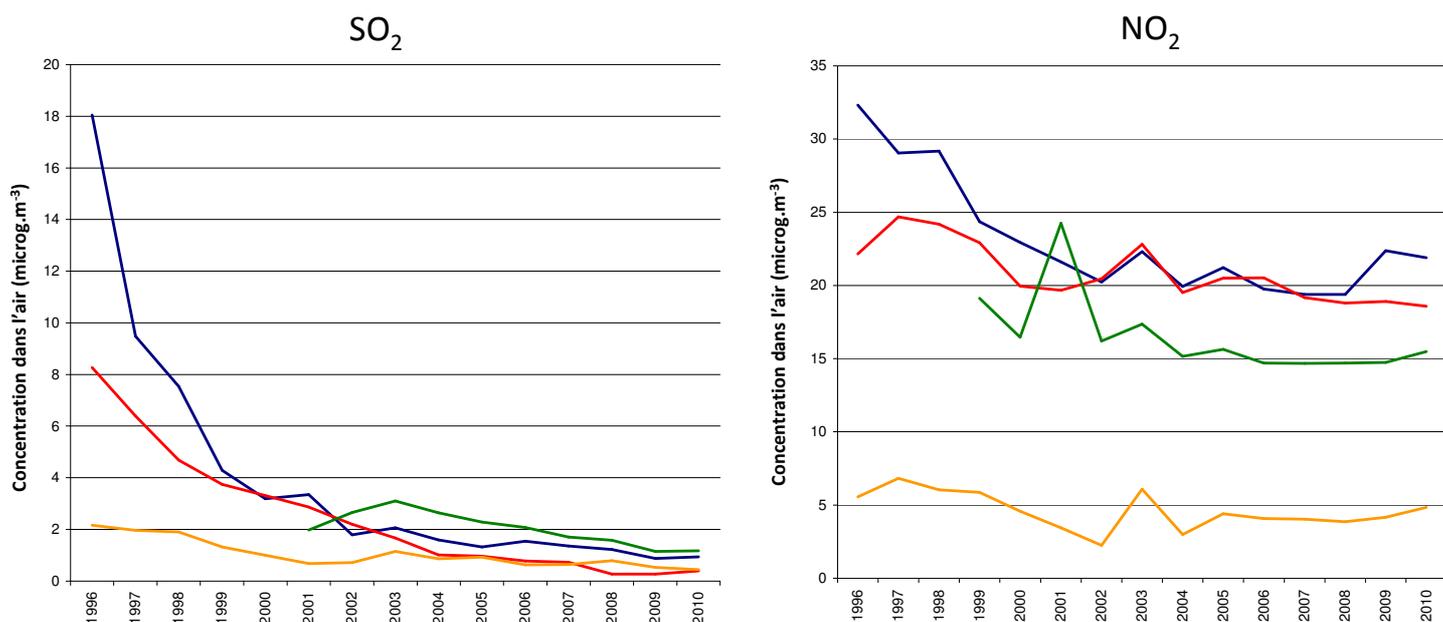
L'objectif de ce point était d'analyser l'éventuelle relation entre l'évolution de la qualité de l'air et la qualité de l'eau des ruisseaux vosgiens sur une chronique temporelle. Pour ce faire nous avons tout d'abord mis en relation des données sur les émissions de NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> à l'échelle de la France (source CITEPA) avec les émissions et la qualité de l'air en Lorraine pour ces mêmes polluants (source Airlor). Ensuite nous avons regardé si les tendances observées dans l'air coïncidaient avec les tendances observées pour les mesures de concentrations en NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, pH et Al quelques ruisseaux vosgiens.

### ❖ Présentation des résultats :

L'acidification ou la dégradation d'écosystème s'observe bien souvent à des échelles fines. Cependant, la pollution responsable de ces états de dégradation doit être étudiée à des échelles locales mais surtout régionales : les polluants émis par les activités humaines retombent en partie à proximité des sources, mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres de leur sources émettrices.



**Figure 3 :** Emission de SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> en France métropolitaine depuis les années 1960, par secteur d'activité (source CITEPA, 2011)



**Figure 4 :** Concentration dans l'air de SO<sub>2</sub> et NO<sub>2</sub> pour quelques stations de mesures lorraines depuis 1995 : **Zone de Saint Nicolas**, **Zone d'Epinal**, **Zone de la Schlucht**, **Zone de Heming** (Source, Airlor).

### ***Emissions à l'échelle de la France***

Les émissions atmosphériques de SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> pour la France métropolitaine sont présentées dans la figure n°4. Depuis les années 1980, les émissions de SO<sub>2</sub> ont été fortement réduites (de 3100kt en 1980 à 250kt en 2010). Cette baisse est très marquée de 1980 à 1995 puis la diminution s'estompe de 2000 à 2010. Les émissions de NO<sub>x</sub> diminuent également depuis les années 1980 de façon régulière mais cette diminution est bien inférieure à celle observée pour SO<sub>2</sub> (1900kt en 1980 à 1050kt en 2010). La transformation d'énergie contribue majoritairement aux émissions de SO<sub>2</sub> alors que pour les NO<sub>x</sub>, le principal contributeur est le transport routier.

### ***Relation entre les émissions à l'échelle de la France et les concentrations mesurées dans l'air de Lorraine***

En France, entre les années 1995 et 2010, les émissions de SO<sub>2</sub> ont été réduites de 75% et les émissions de NO<sub>x</sub> de 35% (figure n°2). Les émissions peuvent être reliées aux mesures de concentrations dans l'air de la basse atmosphère. A l'échelle de la Lorraine les suivis des concentrations en SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub> de plusieurs stations (Figure n°3 ; Source Airlor) montrent que depuis les années 1995, les concentrations en SO<sub>2</sub>, NO et NO<sub>2</sub> ont également diminuées. Ces diminutions des concentrations entre 1995 et 2010 sont en moyenne de 90% pour SO<sub>2</sub>, 25% pour NO et 21% pour NO<sub>2</sub> (calcul réalisé sur les stations de Saint Nicolas, Epinal et la Schlucht). Il existe donc une cohérence entre la réduction des émissions à l'échelle de la France et la diminution des concentrations mesurées dans l'air de Lorraine.

### ***Evolution de la qualité chimique de l'eau des ruisseaux vosgiens***

Si l'on s'intéresse à l'historique des suivis de quelques ruisseaux vosgiens en adéquation avec la période des mesures proposées par Airlor (1995-2010), les baisses de concentrations en SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> et Al observées dans les cours d'eaux sont généralement très faibles. Le pH quand à lui reste bien souvent stable et à des niveaux très bas. La résilience de la majorité des écosystèmes vosgiens dégradés par les fortes charges acides reçues par le passé est donc faible.

## **Suivi du cycle du calcium et magnésium sur les bassins versants sur grès et granite (témoins et amendés) par approche isotopique Sr et Mg**

### **❖ Personnes impliquées :**

Emile Bolou Bi (*Post doc, INRA BEF*), Anne Poswza (*MC, LIMOS*), Nathalie Vigier (*CRPG*), Etienne Dambrine (*DR, INRA BEF*), Benoit Pollier (*AI, INRA BEF*), Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*)

### **❖ Rappel des objectifs :**

L'objectif était d'étudier l'effet de l'amendement sur la dynamique du Mg et Ca dans les sols, solutions de sols et ruisseaux en précisant le rôle des plantes (prélèvement, recyclage)

et des microorganismes (altération). L'idée pour cela était de comparer les variations isotopiques du Mg et du Sr dans les sols, les eaux et les arbres des bassins versants témoins et amendés.

Les méthodes de mesure des isotopes du Mg naturel sont encore très peu connues et un gros travail de développement et de validation d'un protocole chimique et analytique pour la mesure de ces isotopes du Mg, dans une large gamme d'échantillons, a été réalisé préalablement à nos mesures sur les bassins versants. C'est pourquoi notre étude s'est limitée au Bassin versant témoin de Senone.

#### ❖ **Présentation des résultats :**

Notre étude sur le Bassin versant témoin de Senone est la toute première à proposer un ensemble complet de données sur les variations isotopiques naturelles en Mg dans un écosystème forestier in situ. Nos travaux rapportent les premières variations isotopiques en Mg dans des végétaux qui affichent une gamme non significativement distincte de celle des roches et eaux de la croûte continentale. Nos résultats nous apportent des informations inédites sur l'amplitude des variations isotopiques naturelles du Mg entre les sols, les eaux et les arbres de ce bassin et les paramètres qui les contrôlent :

- les végétaux (herbacés et ligneux) prélèvent préférentiellement les isotopes lourds du Mg (adsorption sur les racines).
- Les solutions des horizons supérieurs du sol sont affectées par les prélèvements et la restitution du Mg via les litières (feuilles / racines).
- La composition isotopique du ruisseau semble marquée par la végétation à haut débit. A bas débit elle serait sous le contrôle de processus physico-chimiques dans l'altérite.

Le même type d'investigation sur le bassin versant amendé sur grès et sur les bassins versants sur granite (témoin et amendé) sont maintenant nécessaire pour caractériser la dynamique de l'amendement sur le cycle du Ca et Mg.

#### ❖ **Publications / communications :**

- Bolou-Bi Bolou Emile 2009 « Etude du rôle de la végétation dans le cycle biogéochimique du magnésium : approche isotopique ». Thèse Nancy Université.
- Bolou-Bi E.B., Vigier N., Brenot A. and Poszwa A. (2007) Compared magnesium isotope compositions of plants, rocks and waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, (15), Supplement 1, Pages A106.
- Bolou-Bi E.B., Poszwa A. and Vigier N. (2008) Experimental determination of magnesium isotope fractionation during higher plant growth. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-08852.
- Bolou Bi B.E., Vigier N, Brenot A, Poszwa A. (2009) Magnesium isotopic composition of plants and rocks reference materials, *Geostandard and Geoanalytical Research* Vol 3 (1), 95-109.
- Bolou-Bi E.B., Poszwa A., Vigier N. and Leyval C. (2010) Experimental magnesium isotope fractionation during higher plant growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 9. 2523-2537.
- Balland C., Poszwa\* A., Leyval C., and Mustin C, (2010) Dissolution rates of phyllosilicates as a function of bacterial metabolic diversity, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 19. 5478-5493.
- Balland Clarisse (2010) « Caractérisation expérimentale des relations entre les bactéries des sols, les phyllosilicates et les solutions : modélisation et rôle des paramètres environnementaux ». Thèse Nancy Université.

## **Elaboration d'une synthèse papier sur le chaulage à l'échelle du bassin versant et sur ces effets, à l'usage des gestionnaires forestier et du grand public**

❖ **Personnes impliquées :** Arnaud Legout (*CR, INRA BEF*), Etienne Dambrine (*DR, INRA BEF*), Benoit Pollier (*AI, INRA BEF*), Nicolas Angeli (*IR, INRA EFF*), François Guerold (*Professeur, LIEBE*), Claude Nys (*DR, INRA BEF*).

❖ **Présentation des résultats :**

Cette synthèse se présente sous la forme d'une plaquette de 8 pages. Elle est disponible en format pdf. Le résumé est donné ci-dessous.

Bon nombre d'écosystèmes forestiers français sont localisés sur des sols acides, pauvres en éléments nutritifs. Ces sols sont naturellement acides mais cette acidification est bien souvent renforcée par l'action de l'homme (type de sylviculture, pollution atmosphérique). Plus un sol est acide, moins il peut stocker de cations nutritifs (calcium, magnésium...). Ces cations nutritifs représentent le « garde-manger » des plantes : si la quantité disponible diminue au-delà d'une certaine limite, la plante réduira sa croissance puis dépérira si la situation de déficience en nutriment perdure. L'amendement est conseillé lorsqu'une déficience de la nutrition en forêt et/ou des risques d'acidification des sols ou des eaux sont avérés.

La pratique de l'amendement consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium et/ou magnésium, complétée si besoin d'un apport de phosphore et/ou de potassium afin d'éviter des déséquilibres nutritionnels. L'amendement a pour objectif premier une amélioration des propriétés physiques ou physico-chimiques en vue de favoriser le fonctionnement du sol. Cette pratique vise au maintien ou à la restauration de la fertilité minérale d'un écosystème forestier. On oppose généralement l'amendement à la pratique de la fertilisation qui a pour objectif premier une augmentation de la production.