

## QUEL DEVENIR ET QUEL IMPACT DES POLLUTIONS EN MÉTAUX LOURDS EN FORÊT ?

**Laure Gandois**

CNRS, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab)

« Quel impact et quel devenir des pollutions métalliques en forêt ? »

Laure Gandois, Yannick Agnan, Anne Probst  
ECOLAB, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Fr

Je vais vous présenter des travaux qui ont trait au devenir et à l'impact des métaux dans les écosystèmes forestiers et qui ont été réalisés grâce au réseau RENECOFOR.

Accumulation et impact des métaux dans les sols forestiers

⇒  $\Delta$  Stock?  
⇒ Impact?

**Métaux**

- ⇒ **Element**
  - x Rôle biologique
  - x Affinité pour les constituants du sol
- ⇒ **Végétation**
  - x Canopée
  - x Prélèvements
- ⇒ **Sol**
  - x pH
  - x Matière organique
  - x Texture

### Fil rouge : l'évolution des stocks de métaux dans les sols forestiers

Nous allons nous concentrer sur le compartiment du sol forestier en nous posant la question de l'évolution des stocks de métaux dans les écosystèmes forestiers : y a-t-il ou non une accumulation de ces éléments dans les sols ? Et nous soulèverons aussi la question de leur potentiel impact.

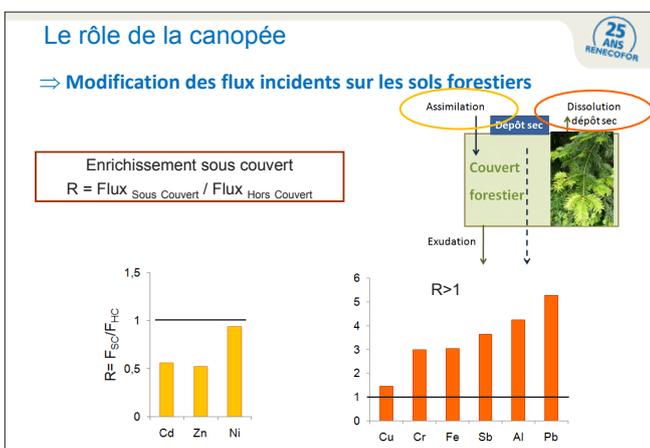
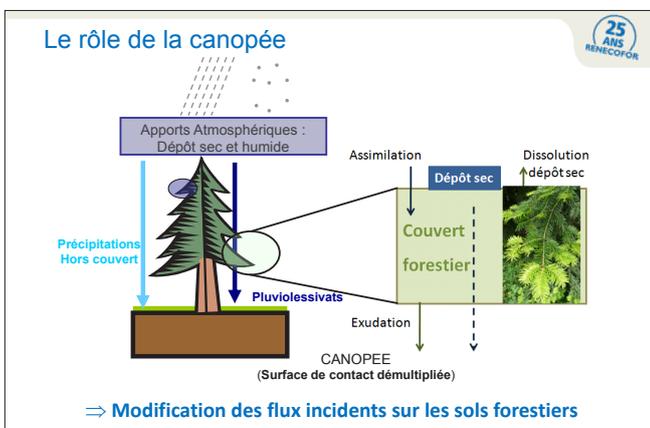
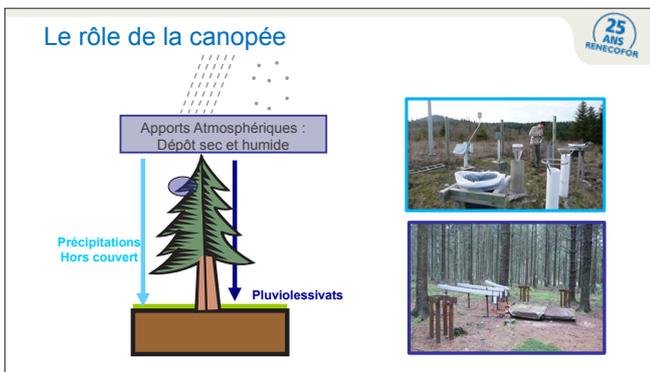
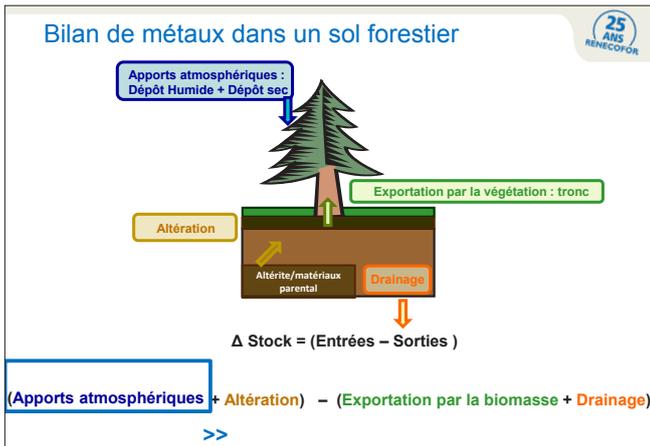
La réponse à ces questions n'est pas simple ; elle dépend de plusieurs facteurs, à commencer par l'élément considéré. La famille des métaux compte beaucoup d'éléments dont certains ont un rôle biologique connu de micronutriments (c'est le cas du cuivre, du nickel, du zinc) tandis que d'autres n'ont pas de rôle biologique connu voire peuvent être toxiques à très faible concentration (cadmium, plomb, antimoine) ; ça joue sur la façon dont l'élément va être recyclé dans l'écosystème. D'autre part ces éléments ont des propriétés physico-chimiques différentes, des affinités différentes pour les divers compartiments du sol, ce qui va aussi contrôler leur mobilité dans la colonne de sol. La végétation est aussi un facteur très important, d'une part du fait de l'interaction entre la canopée et les dépôts atmosphériques, et d'autre part du fait du recyclage de ces éléments qui vont être « transloqués » au sein des arbres ou éventuellement rendus au sol en fonction de la physiologie du peuplement. Dernier facteur très important, et qui peut être appréhendé en particulier grâce au réseau RENECOFOR et à la grande diversité des sites qui y sont représentés, c'est le type de sol, les conditions physicochimiques en termes de pH, de teneur en matière organique et de texture.

Travaux en lien avec RENECOFOR

- ⇒ **Teneur en métaux des horizons H**
  - x 102 sites
  - x Février-Vauléon, 2000
- ⇒ **Teneur en métaux des sols du réseau RENECOFOR**
  - x 11 sites
  - x Origine des éléments
  - x Hernandez, 2003
- ⇒ **Apports atmosphériques, dynamique dans les sols**
  - x 6 sites
  - x Gandois, 2009
- ⇒ **Bioindication par les lichens**
  - x 7 sites
  - x Agnan, 2013
- ⇒ **Programme bioindicateur ADEME**
  - x 4 sites
  - x 2004-2008, 2009-2012

⇒ Sites RENECOFOR, soutien ADEME

Avant de poursuivre, je fais un bref rappel historique sur les travaux qui ont été menés sur le réseau RENECOFOR en ce qui concerne les métaux, puisque ces éléments ne font pas partie du suivi habituel. Il y a eu notamment des travaux de thèse sur les teneurs en métaux dans les profils de sols, et également (c'était le cas de mon doctorat) sur les apports atmosphériques de métaux et la dynamique des métaux dans les sols, leur passage éventuel à la solution de sol. Il y a eu aussi des travaux sur la bioindication (par les mousses et les lichens), et on peut également rappeler que des sites RENECOFOR ont contribué au programme Bioindicateur financé par l'Ademe.



## Les dépôts atmosphériques métalliques en forêt

Nous allons examiner pas à pas les termes du bilan des métaux pour un sol forestier, qui consiste classiquement à évaluer les entrées et sorties pour estimer la variation de stock.

Les entrées dans le système viennent d'une part de l'altération des roches (où ces éléments sont naturellement présents) et d'autre part des apports atmosphériques. Nous nous concentrerons surtout sur ces apports puisque, pour de nombreux éléments, ils dépassent largement les entrées par l'altération. Les sorties se font par l'exportation de biomasse ou par le drainage.

Le sous-réseau CATAENAT permet le suivi des dépôts atmosphériques hors et sous couvert forestier. Nous nous sommes greffés sur 6 sites de ce sous-réseau pour ajouter l'analyse des métaux aux mesures habituelles de ces dépôts hors et sous couvert.

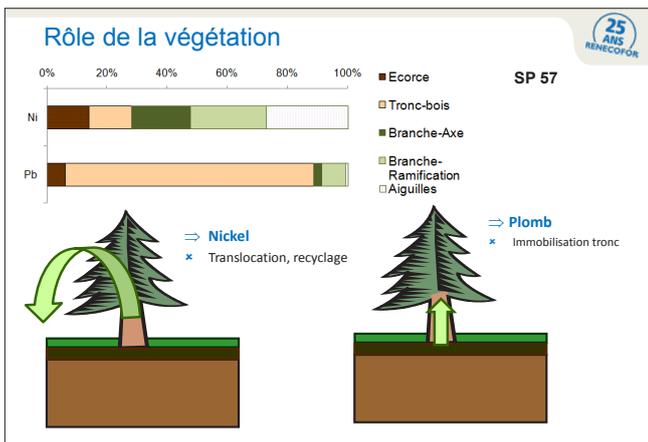
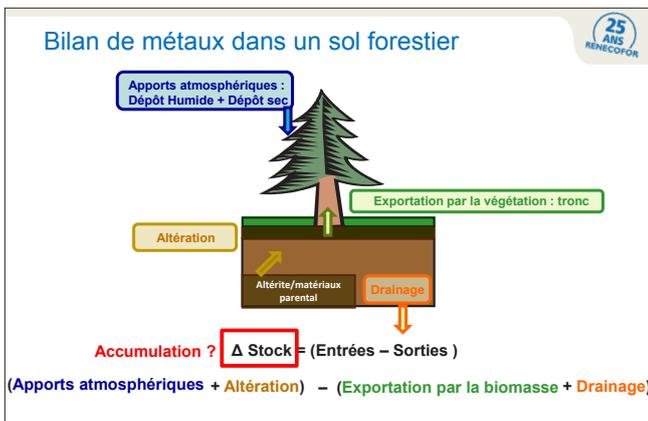
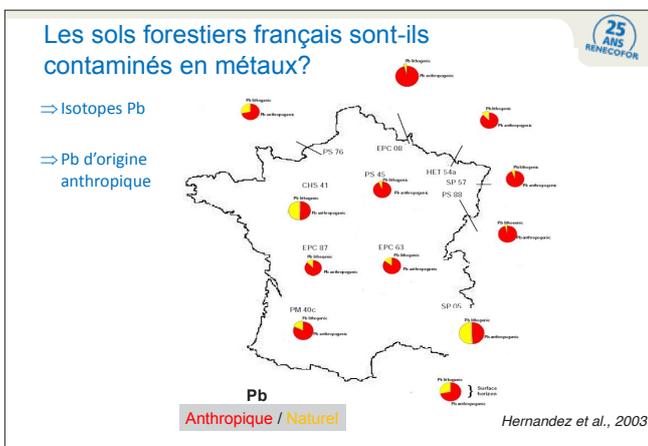
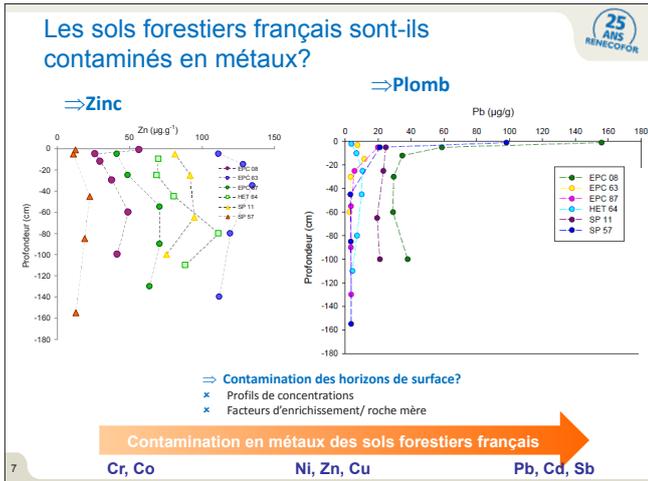
La comparaison des dépôts hors et sous couvert permet d'appréhender les processus qui se produisent au niveau de la canopée : assimilation directe de certains éléments ; accumulation de dépôt sec sur le feuillage durant les périodes sèches, et interaction éventuelle avec des molécules organiques qui peuvent être exsudées par le couvert forestier. Enfin certains éléments sont recyclés et sont exsudés et contribuent à la composition des pluiolessivats.

Au niveau des sols, les flux de métaux sous couvert sont donc différents des flux hors couvert (à découvert).

La comparaison de ces flux a permis de distinguer deux groupes d'éléments et d'identifier ainsi les principaux processus qui se produisent dans la canopée.

Le premier groupe, ici en jaune, c'est celui des éléments dont le flux est réduit au passage de la canopée : c'est-à-dire que les sols forestiers voient moins d'éléments que des sols non couverts situés dans la même zone (le facteur d'enrichissement R est inférieur à 1). On fait donc l'hypothèse que certains de ces éléments sont directement assimilés par le couvert : c'est peu étonnant pour des éléments comme le zinc ou le nickel qui sont des micronutriments ; c'est plus surprenant pour le cadmium, dont je vous ai dit qu'il n'avait pas de rôle biologique connu. C'est là un des exemples d'éléments dont Anne Probst dit qu'ils avancent masqués : le cadmium se comporte souvent de façon similaire au zinc dans les écosystèmes forestiers.

L'autre groupe, en rouge, c'est celui des éléments dont le flux est augmenté au passage de la canopée ( $R > 1$ ). Pour le plomb, les flux qui atteignent le sol forestier sont 5 fois supérieurs aux flux qui atteignent les sols hors couvert. Cette observation, et les observations complémentaires qu'on a faites au niveau de la chimie des pluiolessivats et de la chimie des aiguilles, conduisent à l'hypothèse que c'est principalement l'accumulation de dépôts secs et son interaction avec des molécules organiques exsudées par le couvert qui explique l'augmentation de ce flux sous couvert.



## Importance des dépôts comme source de métaux dans les sols forestiers

Les écosystèmes forestiers reçoivent des dépôts atmosphériques de métaux, mais dans quelle mesure les sols sont-ils contaminés par les métaux ?

Pour faire le diagnostic de la contamination en métaux, on peut d'abord étudier les profils de concentration (en microgrammes par gramme de sol) selon la profondeur. Ici je donne en exemple des profils de concentration établis sur nos 6 sites d'étude pour le zinc et le plomb. Pour le plomb, on observe une augmentation des concentrations vers la surface, qui indique une contamination atmosphérique. Pour le zinc, on constate une grande diversité de concentrations dans les horizons profonds, qui reflète la diversité des situations géologiques, des concentrations naturelles. On utilise donc également le calcul des facteurs d'enrichissement (ratio de la concentration de l'élément considéré sur celui d'un élément invariant, en comparaison du même ratio dans la roche mère) qui permettent de conclure sur la base des profils et d'autres mesures.

Là encore on peut distinguer différents groupes d'éléments. Pour certains métaux on observe peu de contamination des sols forestiers du RENECOFOR, c'est le cas du chrome ou du cobalt. Pour d'autres, la réponse dépend des zones étudiées (c'est le cas du nickel, du zinc, du cuivre) et pour d'autres encore comme le plomb, le cadmium ou l'antimoine, on observe de façon quasi systématique une contamination des profils de sol par les apports atmosphériques.

Dans le cas du plomb, comme l'a dit Anne Probst en introduction, on dispose d'un outil supplémentaire avec les différents isotopes qui ont permis, dans les années 2000, d'identifier l'origine naturelle (géologique) ou anthropique du plomb contenu dans les sols : on a pu montrer que l'essence plombée a été le facteur principal de la dispersion du plomb par voie atmosphérique et de la contamination avérée des sols forestiers français. On voit ici les proportions de plomb naturel (jaune) ou d'origine anthropique (rouge) mesurées dans les horizons de surface des sols de 12 sites RENECOFOR. La taille des cercles est proportionnelle à la concentration totale.

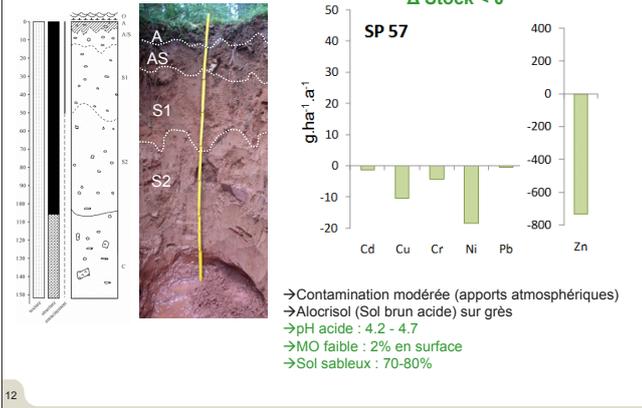
## Les métaux s'accroissent-ils dans les sols forestiers ?

Après avoir montré qu'il y a bien des apports atmosphériques de métaux dans les sols, je reviens à ma question initiale : ces éléments s'accroissent-ils dans les sols forestiers français ?

La réponse passe par la dynamique de ces éléments dans l'écosystème forestier et par le rôle qu'y tient la végétation. Par exemple, à l'occasion d'une coupe sur la placette SP57, nous avons pu analyser les métaux dans tous les compartiments de la biomasse : tronc, branches, aiguilles. Ça nous a permis d'observer le comportement des différents métaux, et je présente ici le cas de deux éléments très contrastés : le nickel et le plomb. Le nickel se retrouve un peu dans tous les compartiments, ce qui démontre sa circulation dans le peuplement ; en conséquence, quand on établit le bilan pour le sol, l'exportation par la biomasse est peu importante et il faut se pencher plutôt sur le drainage à la base de la colonne de sol. En revanche le plomb est surtout présent dans le tronc, avec pour conséquence une importance accrue de l'exportation avec la biomasse, flux qu'on avait relativement ignoré jusqu'alors.

## Le devenir des métaux dans les sols forestiers

25 ANS  
RENECOFOR



La question de l'accumulation dépend aussi des conditions pédoclimatiques. Voyons cela à travers l'exemple de trois sites très contrastés au niveau des conditions pédologiques.

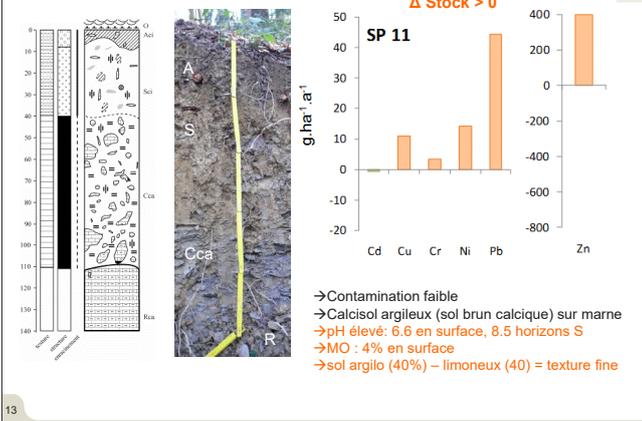
D'abord le site SP57, en Moselle, avec un sol assez acide et très sableux : quand on établit les bilans, on observe finalement un déstockage systématique des métaux (ou valeur nulle) ; ils sont dissous et exportés dans les eaux de drainage.

Le constat est complètement inverse pour le site SP11, dans l'Aude, dont le sol est développé sur marne ; c'est donc un sol très basique, un peu plus riche en matière organique et surtout très argileux. On y observe une accumulation systématique pour tous les éléments considérés.

Enfin, l'effet des conditions pédoclimatiques peut aussi dépendre des éléments. On a le cas ici d'EPC08 dans les Ardennes, un site relativement contaminé dont le sol est acide avec une accumulation de matière organique assez importante dans les horizons de surface. Pour les éléments qui sont sensibles au pH acide, par exemple le cadmium ou le zinc, on observe une perte (déstockage) ou en tout cas pas d'accumulation ; mais pour des éléments qui ont une affinité particulière pour la matière organique, comme le cuivre et le plomb, on observe une accumulation dans le sol.

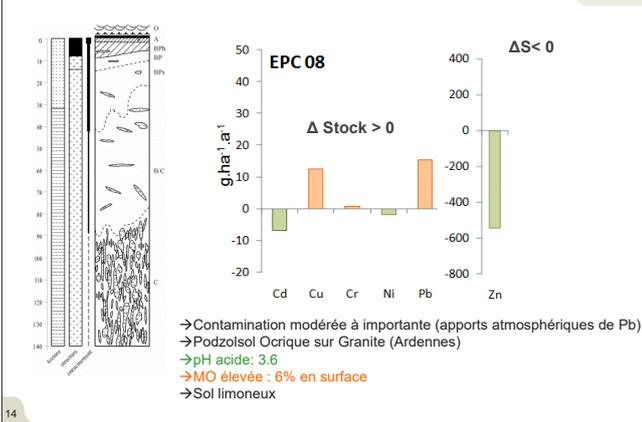
## Le devenir des métaux dans les sols forestiers

25 ANS  
RENECOFOR



## Le devenir des métaux dans les sols forestiers

25 ANS  
RENECOFOR



Profil sol de la placette EPC08

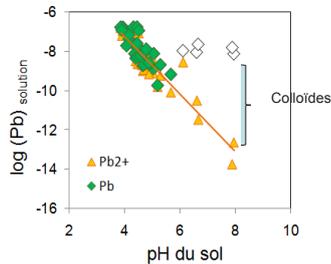
Photo : Erwin Ulrich, ONF

## Un impact pour les écosystèmes?



### ⇒ Charges critiques

- × Basé sur une **limite critique** (concentration en ion libre dans la solution de sol)?



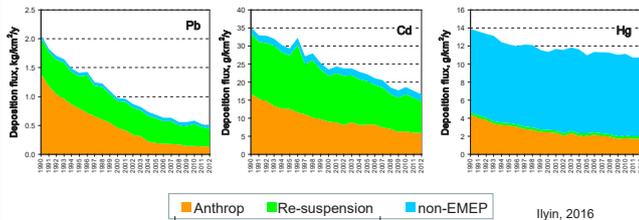
- × Impact écotoxicologique?
- × Transfert aux organismes vivants?
- ⇒ En conditions expérimentales (collemboles) la toxicité accrue si ingestion de complexes MO-Mtx

15

## Perspectives



- ⇒ Polluants émergents en hausse : Sb, Pt
- ⇒ Pollution trans-frontalières, remobilisation de contaminants



- ⇒ Evolution des stocks, lien avec celles des stocks de carbone?

17

## Apport du réseau RENECOFOR



### ⇒ Un réseau de sites d'étude

- × Acquisition de jeu de données uniques
- × Mise en évidence de la diversité des sites

### ⇒ Un contexte scientifique

- × Données environnementales,
  - × Pédologiques
- × Données historiques
  - × Apports atmosphériques



18

## Merci pour votre attention



### Un grand merci :

-Aux agents des placettes EPC 08, EPC 63, EPC 87, HET 64, SP11 et SP 57 : Vincent Borthelle, Jean-Pierre Chassagne, Joël Clarnat, Jean Luc Fiol, Gilles Fournel, René Gregoire, Alain Jacquemard, François Mouchot, Florence Pertile, Pierre Trithardt, Jérôme Vany.

-A l'équipe du RENECOFOR à Fontainebleau : Sébastien Cecchini, Luc Croisé, Marc Lanier, Manuel Nicolas, Valérie Trevedy Benard, Erwin Ulrich.



## Quel impact pour les écosystèmes ?

La question de l'impact des métaux dans les écosystèmes forestiers reste ouverte, on ne peut pas donner de réponse claire actuellement. Par exemple, la méthodologie des charges critiques, qui permet d'estimer des seuils de toxicité pour d'autres types d'éléments, n'est guère applicable dans le cas des métaux car elle est basée sur l'hypothèse que la toxicité est liée à la concentration en ions libres en solution. Cette hypothèse implique que dans les sols à pH assez élevé, il y a très peu de toxicité des métaux puisque ces éléments n'y sont pas présents sous forme d'ions libres en solution. Or nos travaux ont montré qu'aux pH élevés ils sont présents sous forme colloïdale, en s'associant à de la matière organique dissoute ; et on sait au niveau expérimental que les métaux peuvent avoir un effet toxique même sous cette forme. Il faut donc développer une démarche d'écotoxicité approfondie pour pouvoir évaluer vraiment l'impact des pollutions métalliques sur les écosystèmes.

Par ailleurs, si pour certains éléments les émissions sont en baisse, les polluants émergents comme l'antimoine ou les platinoïdes voient au contraire leurs émissions augmenter. Et il ne faut pas oublier que les éléments qui se sont déposés au sol peuvent être réémis : c'est ce qu'on voit ici (figuré en vert) pour le plomb ou le cadmium sur la période 1990-2012. N'oublions pas non plus que les pollutions peuvent provenir d'activités anthropiques lointaines (émissions « non-EMEP\* », extra-européennes, figurées ici en bleu) comme dans le cas du mercure lié à l'utilisation du charbon pour l'énergie...

Enfin on a vu que la dynamique de ces métaux était liée à l'intégralité du cycle biogéochimique de l'écosystème, et au vu de l'évolution des stocks de carbone dans les sols, par exemple, on peut se poser la question de l'évolution des stocks de métaux (cf. liens avec la matière organique).

## En guise de conclusion,

je voudrais dire que l'apport du réseau RENECOFOR à ces études est immense. D'une part, du fait de la mise à disposition des sites d'étude qui ont une grande variété et qui permettent de considérer toute la diversité des fonctionnements pédologiques : c'est indispensable à la compréhension de la dynamique des métaux. Il n'y a que le réseau RENECOFOR qui puisse offrir ça. D'autre part, au-delà des sites, la qualité du contexte scientifique est un apport inestimable pour études comme celle-ci, focalisées sur un élément : je donne en exemple les planches pédologiques qui ont été un outil d'interprétation indispensable et complémentaire aux données que nous avons pu acquérir.

Je vous remercie.