

SESSION 5 - DYNAMIQUE DES POLLUANTS PERSISTANTS EN FORÊT

INTRODUCTION

Anne Probst

CNRS, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (EcoLab)

Dynamique des polluants persistants en forêt

Anne Probst¹

Exposés de : Laure Gandois, Yves Thiry, Jérôme Poulenard

¹EcoLab, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

Que sont les polluants persistants ?

Il y a trois sortes de polluants persistants en forêt. Ce sont d'abord des **métaux**, représentés (à gauche) sur le tableau périodique des éléments avec des couleurs indiquant leurs différents types : métaux de transition en vert ou autres métaux en rose, métalloïdes en violet, et les lanthanides encore appelés terres rares en orange. Le deuxième groupe est celui des **radionucléides**, isotopes non stables (radioactifs) de certains éléments, qui vont se désintégrer au cours du temps ; c'est ce qu'illustre le petit schéma à droite avec la chaîne de désintégration de l'uranium jusqu'au plomb. Ces radionucléides, dont certains sont naturels, ont des durées de vie différentes. Le troisième groupe, enfin, concerne des molécules organiques et non plus des minéraux ; c'est celui des polluants organiques persistants, avec notamment (mais ce ne sont pas les seuls) les **hydrocarbures aromatiques polycycliques** (HAP), qui se composent d'atomes de carbone et d'hydrogène avec au moins deux cycles aromatiques condensés. J'ai illustré ici les 16 molécules considérées comme « prioritaires » par l'agence de protection environnementale américaine.

Qui sont ces Polluants Persistants ?

Les métaux

Les Radionucléides

Isotopes non stables

Désintégration

HAP

16 prioritaires Selon US EPA

2

Les Métaux, les HAP et les Radionucléides

Les métaux

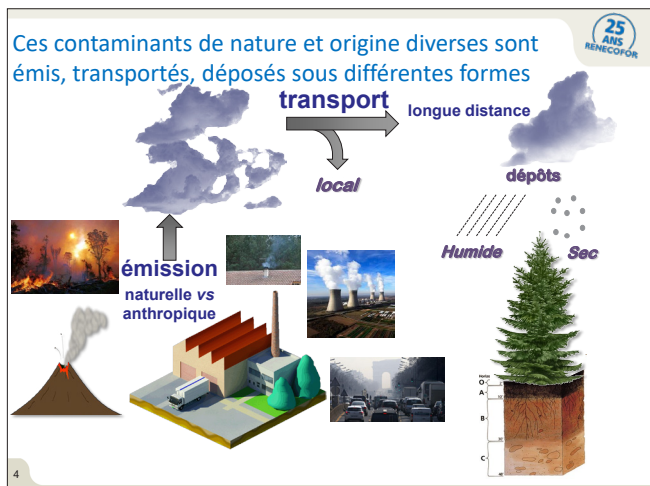
Les Radionucléides

HAP

16 prioritaires Selon US EPA

3

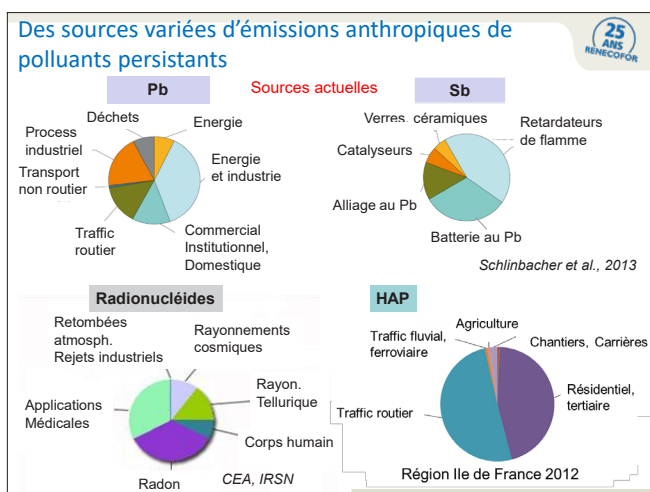
- naturels ou anthropiques
- peu dégradables
- transportés sur de longues distance
- transférés dans tous les compartiments des écosystèmes
- certains ont un rôle biologique
- potentiellement toxiques pour l'homme et les organismes vivants en général
- capacité d'adsorption sur les particules



Les sources d'émissions

Ces contaminants peuvent être d'origine naturelle, du fait par exemple des éruptions volcaniques, des feux de forêt... Mais ils proviennent également des émissions anthropiques liées aux activités industrielles, aux centrales nucléaires, à la circulation automobile, etc. Tout cela se retrouve dans l'atmosphère et peut être transporté soit sur de courtes distances (avec des retombées très proches des sources d'émissions), soit sur de très longues distances, à des milliers de kilomètres... où des forêts « innocentes » reçoivent ces apports non désirés sous forme de dépôts humides, avec la pluie, ou de dépôts secs entre les pluies.

Les sources varient selon les polluants et peuvent évoluer avec le temps. Pour les métaux, le plomb a par exemple des sources très diverses : les secteurs de l'énergie et de l'industrie, le trafic routier (encore aujourd'hui), etc. Mais pour l'antimoine, métalloïde émergent, le profil est différent : il provient essentiellement des additifs retardateurs de flamme, ou des batteries... au plomb !



Pour les radionucléides, un graphique synthétique de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) montre des origines naturelles, comme les rayonnements cosmiques ou telluriques, et des origines anthropiques comme les rejets industriels ou les applications médicales... Quant aux HAP, leur profil est très restreint, en tout cas en Ile-de-France où les deux sources majeures sont le trafic routier et le secteur résidentiel et tertiaire ; mais cela peut varier selon les régions.

Évolution des émissions

Il faut savoir que deux familles de polluants persistants, les HAP et les métaux, sont régies dans le cadre de la Convention de Genève pour encadrer les émissions (comme on l'a vu pour le soufre et l'azote). Cela se fait en particulier grâce à la ratification du protocole Aarhus (en 1998), sous l'égide de la Commission Economique pour l'Europe de l'Organisation des Nations Unies (UNECE).

Ce dispositif a fortement contribué à réguler les émissions en Europe. Sur le graphique en haut à gauche, on voit que l'évolution du plomb (tireté bleu), du cadmium (en gris) et du mercure (en jaune) est globalement à la baisse depuis les années 1990. On retrouve cette évolution pour d'autres métaux sur certains profils de droite, et le graphique du bas montre aussi une tendance à la baisse sur les HAP, malgré une sorte de niveau de fond qui reste assez stable ces dernières années.

Par contre, on remarque aussi, dans ce qui est entouré de rouge, que les émissions européennes de certains métaux comme le cuivre (en vert) sont stables dans le temps, ou même que d'autres augmentent : c'est le cas ici du sélénium (bleu foncé), mais il se peut qu'il y en ait d'autres.

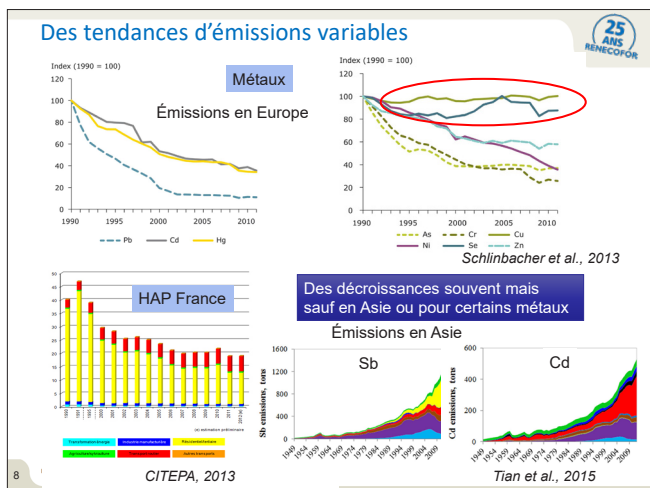
Mais surtout il y a d'autres régions du monde où on observe une explosion des émissions de ces polluants, comme en Asie dont les émissions sont illustrées ici pour le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) sur la période 1949-2009.

La convention de Genève pour encadrer leurs émissions vers l'atmosphère

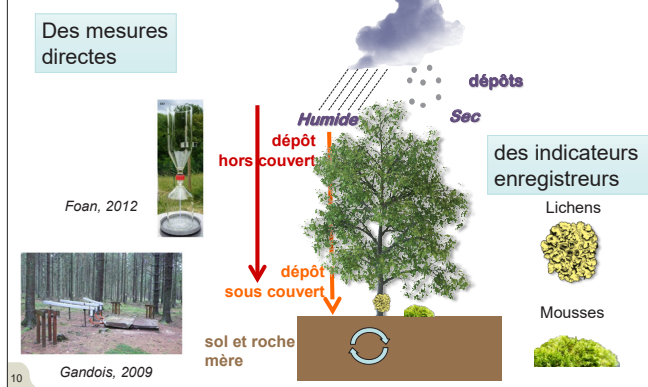
Le protocole Aarhus (1998) vise à réduire les émissions de HAP et les métaux issues des activités humaines (UNECE).

Convention de Genève sur la Pollution Transfrontalière Longue Distance, LRTAP

Commission Économique pour l'Europe de l'Organisation des Nations Unies (UNECE, 1998)



Des dépôts de ces contaminants mal quantifiés et un cycle biogéochimique mal connu en forêt



Des dépôts mal connus

Les dépôts de ces contaminants sont assez mal connus, parce qu'ils sont en concentrations faibles et qu'il est difficile de les détecter et de les collecter. Il y a des dépôts humides et des dépôts secs, des dépôts à découvert différents des dépôts sous le couvert des arbres, et tout cela conditionne ce qui arrive au sol.

On peut chercher à faire des mesures directes, sous couvert à l'aide des gouttières de collecte des pluiolessivats installées sur les placettes RENECOFOR, ou bien à découvert avec d'autres équipements qui peuvent être différents. Pour les polluants organiques, par exemple, les collecteurs doivent être en verre pour éviter la contamination par le récipient.

C'est bien, mais ce n'est pas parfait, et on peine à savoir vraiment les dépôts qui arrivent au sol.

Outre les mesures directes, il y a des indicateurs indirects comme les lichens ou les mousses, présents en forêt et qui peuvent être des accumulateurs de ces éléments.

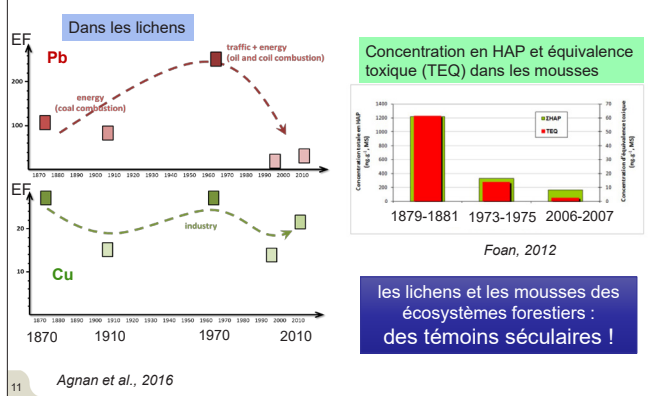
Ainsi, par exemple, les travaux de Yannick Agnan et collaborateurs en 2016 (graphes de gauche) ont consisté à étudier les enrichissements (EF) en plomb et en cuivre dans les lichens. On a fait de la rétro observation, c'est-à-dire qu'on a mesuré les teneurs des lichens prélevés aujourd'hui dans les stations du réseau et celles des lichens récoltés par le passé et conservés dans des herbiers. On a pu remonter grâce aux herbiers jusqu'aux années 1870, et en gros les résultats de ces mesures correspondent au profil des émissions : on retrouve le pic des années 80 pour le plomb tandis que pour le cuivre on a une sorte de stabilité qui correspond à la relative stabilité des émissions pendant la même période.

Louise Foan a fait en 2012 une étude du même type pour les HAP dans forêts des Pyrénées ; en allant chercher dans les herbiers, elle a trouvé une décroissance des concentrations de HAP enregistrées dans les mousses, qui reflète assez bien la baisse des émissions. Les mousses et lichens peuvent donc être des témoins séculaires de ce que reçoivent les écosystèmes forestiers.

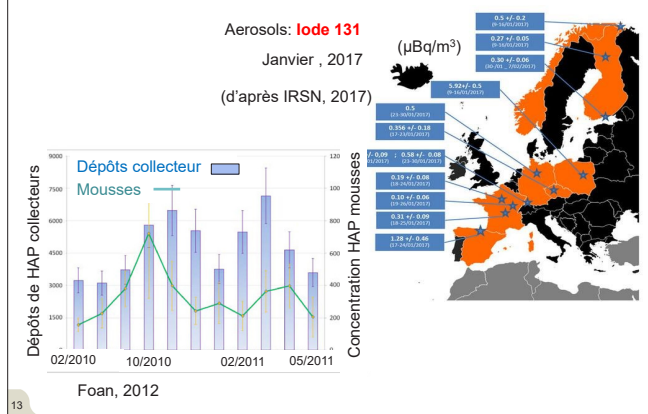
Cependant la difficulté majeure est de passer d'une concentration dans les mousses ou dans les lichens à l'estimation d'un dépôt dans le temps : on ne sait pas sur combien de temps ni de quelle façon ils accumulent les polluants. Louise Foan a tenté de regarder comment variant au cours des saisons, de façon continue, le dépôt des HAP mesuré dans les collecteurs (barres bleues) et la concentration mesurée dans le même temps dans les mousses (ligne verte) : les variations sont globalement cohérentes, mais passer de la concentration dans la mousse à un dépôt reste difficile.

Et enfin nos forêts peuvent être exposées à des contaminations imprévisibles. Voici l'exemple d'un épisode qui, d'après l'IRSN, a touché l'Europe en janvier 2017 avec des concentrations assez élevées en iode 131. On ne sait pas d'où cela vient, mais en tout cas les forêts l'ont enregistré : les dépôts ont atteint ces écosystèmes.

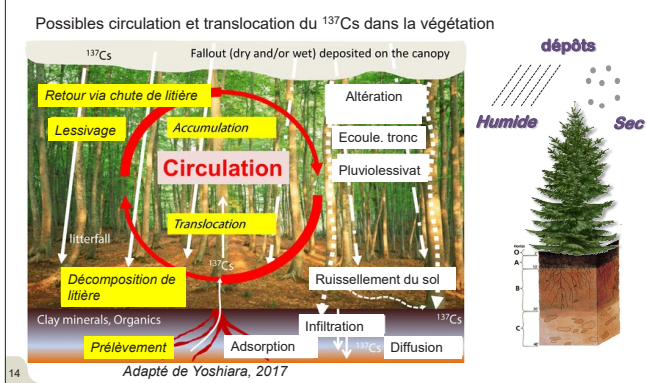
Une contamination et des retombées atmosphériques évolutives dans le temps



Les écosystèmes forestiers soumis à des dépôts variables et des retombées inconnues!



Les forêts sont des écosystèmes sensibles dont la constitution peut être un accélérateur d'entrée de ces contaminants au sol



Comportement des polluants persistants dans les écosystèmes forestiers

Vous l'avez compris, nos forêts sont sensibles aux retombées atmosphériques, mais elles peuvent jouer un rôle d'accélérateur.

J'ai représenté ici le **cycle du césium 137** en forêt, un cycle relativement complexe et qui ressemble beaucoup au cycle des éléments nutritifs, avec des retombées atmosphériques, des écoulements et pluiolessivats qui ruissellent dans le sol, la reprise par la végétation, et la recirculation à travers les chutes de litières qui reviennent au sol, etc. Or le césium n'est pas du tout un élément nutritif...

... mais c'est un de ces polluants qui avancent masqués ! On voit dans la classification périodique des éléments que le césium (Cs) est très proche du potassium (K) qui, lui, est un élément nutritif essentiel. Leurs propriétés physiques et physico-chimiques sont semblables, ce qui fait que le Cs se comporte comme le K et peut, comme lui, circuler dans tout l'écosystème. On va donc le retrouver au sein du sol où, bien sûr, il va interagir avec les composants du sol.

Plus généralement, les dépôts humides et pluiolessivats se retrouvent dans la solution de sol et, comme je l'ai dit, les polluants persistants ont la capacité de s'adsorber sur les différents composants : la matière organique, les oxydes, les argiles, enfin tout ce qui compose le sol. Mais cela ne se fait pas de façon homogène. Grâce à des extractions chimiques avec des réactifs différents, on peut savoir sur lesquels de ces composants se fixent les divers polluants. Sans entrer dans le détail, vous voyez ainsi sur le graphique de droite que le plomb 210 (^{210}Pb) ou le radium 226 (^{226}Ra) ont à peu près la même « spéciation », assez simple, alors que le thorium (^{234}Th) se répartit dans beaucoup de compartiments : il a la capacité de circuler entre les divers composants et d'être facilement libéré.

Ces comportements sont encore peu connus, en particulier pour les HAP et les radionucléides, et il faut chercher à les élucider pour pouvoir anticiper et prévenir les risques pour l'environnement.



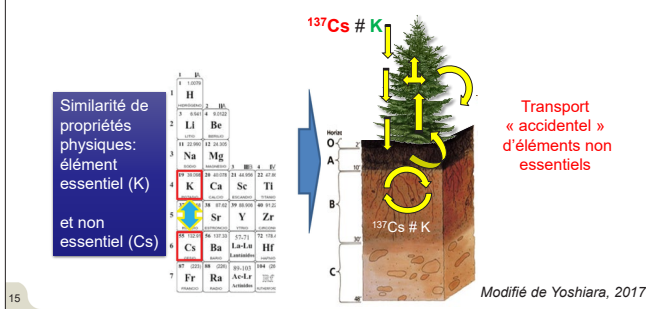
Photo : Erwin Ulrich, ONF

Les débuts de la placette EPC08

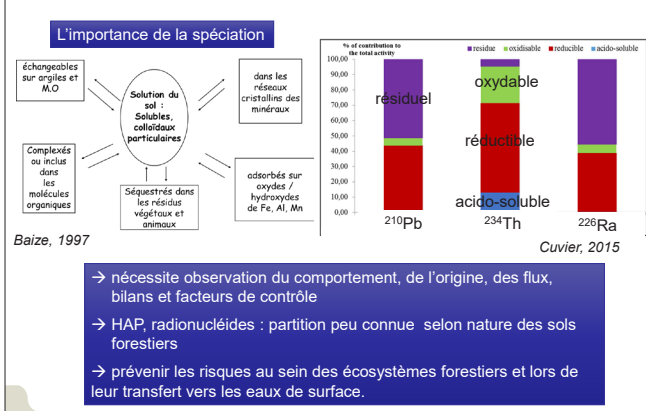
Des polluants persistants qui se « substituent » dans l'environnement forestier

Ils avancent parfois masqués !

^{137}Cs analogue du potassium, nutriment essentiel des cycles biogéochimiques en forêt, est facilement transporté et transféré dans les écosystèmes forestiers (Lamarque et al., 2010)

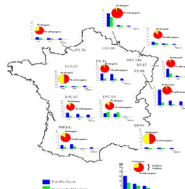


Les polluants persistants peuvent se fixer sur les composants du sol, migrer ou être fixés, s'accumuler

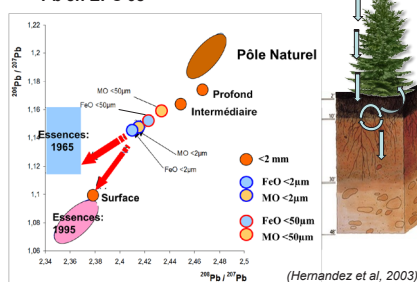


Des polluants persistants dans l'environnement forestier : le sol comme réacteur, stockeur, « expulseur »

Fixation, ou migration?
Par quels composants? À
quelle échelle de temps?



Pb en EPC 08



La fraction d'origine anthropique de certains métaux est accumulée dans les horizons de sol forestiers et peut migrer dans les horizons en s'associant à certains composants

18

RENECOFOR :

support de recherches environnementales intégrées

- observations actuelles
- observations historiques
- support de prédictions
- validation d'hypothèses : du processus aux bilans
- outil de rétro-observation environnementale
- intégration de nouveaux questionnements



La science moderne!!
est basée sur
l'Observation

Aristote (-384 - -322)

19

Les questions débattues

- Quel impact et quel devenir des pollutions en métaux lourds en forêt ?

Par Laure Gandois

- Mieux connaître le cycle des éléments dans les écosystèmes forestiers pour mieux évaluer les risques potentiels associés au stockage des déchets radioactifs ?

Par Yves Thiry

- La forêt est-elle un indicateur des polluants organiques persistants de l'atmosphère et de leur accumulation dans l'environnement : l'exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques

Par Jérôme Poulenard

20

En ce qui concerne le plomb, les différents isotopes ont permis d'affiner la question de la contamination d'origine anthropique et de sa dynamique dans le sol. Je ne vais pas commenter la carte, car Laure Gandois va le faire dans l'exposé suivant.

Mais je tiens à présenter ce graphique, un diagramme isotopique selon les proportions de deux séries d'isotopes du plomb qui permettent de caractériser des sources de matière. On peut y situer le « signal isotopique » spécifique des carburants au plomb de deux générations, ainsi que celui du plomb qui se trouve naturellement dans les sols. Dans les années 2000, nous avons étudié le sol de la placette EPC08 en distinguant l'horizon profond, l'horizon intermédiaire et l'horizon de surface. Nous avons trouvé dans l'horizon de surface un fort enregistrement de plomb correspondant aux carburants de l'époque, ce qui veut dire que le plomb émis par la circulation est bien retombé via les précipitations et qu'il a été stocké dans les sols. Le plomb de l'horizon profond, par contre, est très proche du pôle naturel. Quant à l'horizon intermédiaire, nous l'avons « décortiqué » en particules grossières (points cerclés de rouge) et particules fines (points cerclés de bleu), en distinguant dans les deux cas les oxydes (points bleus) et la matière organique (points jaunes). Ce faisant, nous nous sommes aperçus que le plomb anthropique était plutôt associé aux particules fines et qu'il était surtout issu des carburants d'ancienne génération. D'autre part, ce sont surtout les oxydes -plutôt que la matière organique- qui avaient capté ce plomb et avaient contribué à le faire migrer » dans le profil de sol.

En conclusion

Quel est l'apport de RENECOFOR dans tout ça ? C'est un support d'observations actuelles et historiques, c'est un support de prédictions, de validations d'hypothèses qui vont du processus jusqu'au bilan, on le verra dans les exposés qui suivent. On verra aussi qu'il peut être un outil de rétro-observation environnementale et qu'il permet d'intégrer de nouveaux questionnements.

À son époque, déjà, Aristote disait que « la science moderne est basée sur l'observation » ! C'est toujours vrai aujourd'hui.

Je laisse maintenant la parole à Laure Gandois, puis à Yves Thiry et enfin à Jérôme Poulenard, qui vont approfondir certains aspects concernant respectivement les pollutions en métaux lourds, le cycle des éléments radioactifs, et l'enregistrement des HAP atmosphériques par la forêt et les sols forestiers.