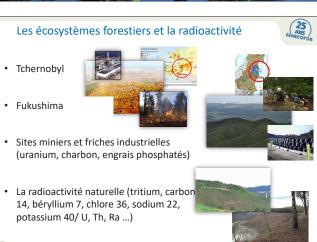
MIEUX CONNAÎTRE LE CYCLE DES ÉLÉMENTS DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS POUR MIEUX ÉVALUER LES RISQUES POTENTIELS ASSOCIÉS AU STOCKAGE DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Yves ThiryAndra, Direction Recherche & Développement

Comment l'observation des écosystèmes forestiers sert aussi à la prévention des risques de pollutions radioactives

Yves Thiry, Direction R&D, Andra





La radioactivité naturelle du sol est plus prononcée dans les massifs granitiques qu'ailleurs

Cette présentation a un intitulé assez générique ; c'est un cadre général dans lequel je vais tenter d'illustrer comment l'utilisation de données et échantillons du réseau RENECOFOR nous a aidés à répondre à certains questionnements scientifiques en lien avec le comportement des éléments radioactifs.

Les écosystèmes forestiers et la radioactivité...

C'est un sujet d'étude qui est encore extrêmement peu développé. Il est même resté longtemps dans la périphérie des études de biogéochimie ou radioécologie, même si, vous vous en souvenez peut-être, les premiers biogéochimistes utilisaient des radiotraceurs : Vladimir Vernadsky en Russie, Eugene Odum aux USA.

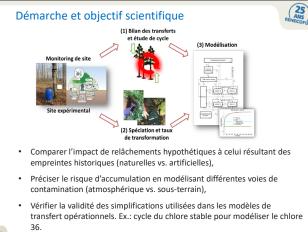
Quelques événements majeurs ont suscité un nouvel intérêt pour le comportement des radioéléments dans les écosystèmes forestiers : on pense notamment à des catastrophes majeures telles que les accidents de Tchernobyl en 1986 et Fukushima en 2011.

Tchernobyl, c'est une émission considérable de radioactivité, des transports sur de longues distances, des contaminations très fortes localement, à tel point que ça pouvait occasionner la mort de la végétation, notamment les pins sylvestres. Aujourd'hui il reste encore des problèmes difficiles à gérer, du fait de contre-mesures assez radicales (l'abandon des territoires) : c'est l'accumulation de biomasse sur pied, de matières organiques mortes et donc le risque d'incendies et de contaminations secondaires dans le futur.

Fukushima, c'est à peu près 10 fois moins de contamination, des transports sur de moins longues distances, mais une contamination très importante de l'écosystème forestier. La forêt représente 70 % des territoires contaminés, avec tous les problèmes de gestion que ça pose à long terme. Les contremesures sont beaucoup plus actives, dynamiques : décontamination non pas de l'entièreté des écosystèmes forestiers mais au moins des forêts proches des habitations ou des zones industrielles, des écoles, etc.

La radioactivité est aussi naturelle. Dans les sites miniers et les friches industrielles liés à la production d'uranium, de charbon et engrais phosphatés, on parle de radioactivité augmentée, du fait de concentrations locales accrues d'éléments comme l'uranium, le radium ou le thorium. Et puis il y a les éléments radioactifs d'origine naturelle avec des retombées notamment dans les écosystèmes forestiers, tels que le tritium, le carbone 14, le béryllium 37, le chlore 36, le sodium 22, le potassium 40. Ce sont des marqueurs naturels qui peuvent être aussi utilisés pour le suivi de leurs isotopes stables dans l'environnement ou celui de contaminations liées aux activités humaines.







La forêt, bon modèle d'études pour de très longues échelles de temps

Pourquoi l'Andra* s'intéresse-t-elle à l'écosystème forestier ?

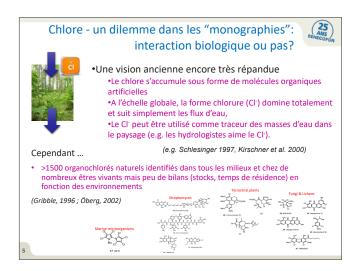
La gestion des déchets radioactifs impose des études d'impacts très sérieuses, fortement encadrées par la réglementation. Pour ça on utilise classiquement des modèles dits « biosphère » dont le but est la quantification d'une dose potentielle et d'un risque « enveloppe », disons un risque maximum. On part d'exutoires supposés (mais réalistes) et de biosphères très stylisées (biosphère tempérée, froide, chaude...) et on utilise des modèles classiques à compartiments et à flux pour chiffrer le transfert dans la chaîne alimentaire et calculer la dose infligée à des groupes critiques supposés utiliser le territoire de façon intense (en autarcie, par exemple). C'est donc une démarche très simplifiée, parce qu'on doit se projeter à très long terme (nos calculs vont jusqu'à 10 000 ans), et qui manque de réponse à certains questionnements scientifiques comme : quelle est la biodisponibilité de l'élément, où va-t-il s'accumuler, quel sera son temps de résidence dans tel ou tel compartiment ? C'est pourquoi nous nous intéressons au développement de modèles plus dynamiques et plus réalistes, qui viennent en support des modèles opérationnels de calcul de dose et qui sont aussi des outils de questionnement.

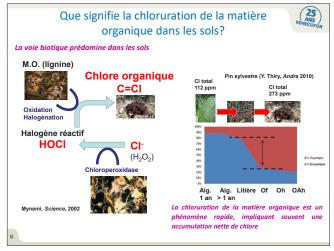
Pourquoi pour la forêt ? Parce que la forêt est très présente dans l'environnement proche des stockages de l'Andra ; parce qu'elle est prédominante sous différents climats, donc aussi sous des climats à très long terme qui nous intéressent pour des études d'impacts, (de type boréal ou méditerranéen) ; parce que les échelles de temps du développement de la forêt, de son fonctionnement, correspondent assez bien aux très longues durées qui nous intéressent.

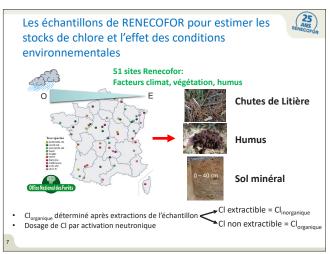
La démarche est assez classique. On part de sites expérimentaux plus ou moins équipés, sources de données et d'échantillons, pour avoir des bilans en termes de stocks, de flux. On peut aller vers l'expérimentation pour mieux appréhender la spéciation ou la transformation de ces éléments. Les données servent à calibrer des modèles qui sont ensuite utilisés pour répondre à certaines questions sur la répartition des éléments, leur taux de persistance, etc. Ces modèles sont très utiles pour répondre à différentes questions comme :

- Peut-on comparer l'impact de relâchements hypothétiques dans le futur à celui des empreintes historiques ? J'ai évoqué par exemple la présence de chlore 36 dans l'environnement ; il est intéressant de positionner l'impact des centres de stockage par rapport au marquage naturel actuel.
- Peut-on préciser le risque d'accumulation en modélisant différentes voies de contamination ? Les centres de stockage peuvent surtout être à l'origine de contaminations potentielles souterraines. Il est très compliqué de modéliser ce genre de comportement, donc on doit passer par l'étude des cycles des éléments stables pour simuler des contaminations souterraines et l'injection des radioéléments correspondants dans le cycle naturel.

Et enfin c'est utile pour vérifier la validité des simplifications de nos modèles opérationnels, ce qui me permet d'expliquer pourquoi je vais me focaliser sur le cycle du chlore stable, qui nous est bien utile pour modéliser celui du chlore 36.







Le cycle du chlore et ses ambiguïtés

Au niveau écologique, le chlore est encore un peu un mystère : y a-t-il une interaction biologique ou pas ? On est face à une vision assez ancienne et encore très répandue, qui dit que le chlore organique est nécessairement d'origine anthropique, qu'à l'échelle globale la forme chlorure domine et suit simplement les flux d'eau, et que le chlorure peut être utilisé comme traceur des masses d'eau dans le paysage. Certains imaginent donc encore que tout le chlore qui entre dans l'écosystème forestier en sort sous forme de chlorure, et très rapidement.

Pourtant il existe dans l'environnement des centaines de molécules organochlorées dont on sait aujourd'hui qu'elles sont produites naturellement. On les retrouve dans des tas de compartiments : les microorganismes marins, les levures, les plantes terrestres, les lichens... et surtout le sol où ont lieu les phénomènes de chloruration de la matière organique.

Voici rapidement ce qu'on en sait aujourd'hui : en présence d'eau oxygénée et d'une enzyme produite par des champignons, le chlore inorganique prend une forme très réactive (de l'eau de javel en quelque sorte) qui réagit avec la matière organique en formant des liaisons covalentes entre chlore et carbone. Donc on a du chlore lié à la matière organique. Cette chloruration de la matière organique intervient surtout lors des tout premiers stades de sa décomposition : on voit bien ici, sous pin sylvestre, le saut entre les proportions de chlore organique (marron) et inorganique (bleu) au cours du processus de décomposition figuré en « abscisses » (avec les aiguilles vertes puis les différents stades de décompositionen fonction de la profondeur). La chloruration est donc un phénomène assez rapide, et qui permet une accumulation de chlore.

Nous nous sommes tournés vers le réseau RENECOFOR pour estimer les stocks de chlore et aussi l'effet des conditions environnementales qui peuvent conduire à une accumulation de chlore sous forme organique. Nous avons travaillé avec le maximum de sites, dont ceux de CATAENAT pour avoir des données climatiques, mais également des échantillons de végétation, d'humus, de sol minéral...

Je passe sur le détail des analyses, sachant qu'on a fait la distinction entre les pools organique et inorganique de chlore.



Recherche d'échantillons dans la "pédothèque" RENECOFOR

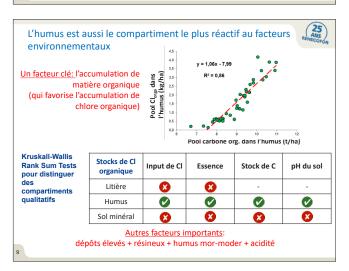
Une grande variabilité des concentrations et stocks de chlore (Redon et al., EST 2011)

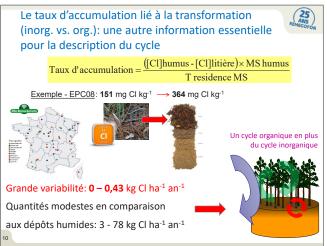


	CI total (mg kg ⁻¹)	% de CI organique	Stock de Cl _{org.} (kg ha ⁻¹)
Litière	46 - 528	41 ± 18	0.1 – 2.5
Humus	45 - 1041	75 ± 27	0.2 - 64
Sol Minéral	25 - 210	89 ± 26	53 - 400

- · Concentrations en Cl plus élevées dans l'humus
- · Fraction en Cl organique élevé dans humus et sol minéral,
- Des stocks plus élevé dans le sol (réservoir)

les humus agissent comme des bioréacteurs



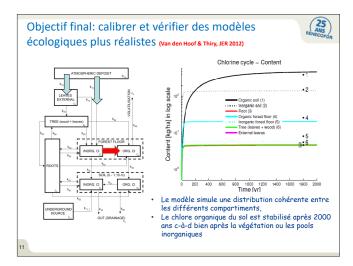


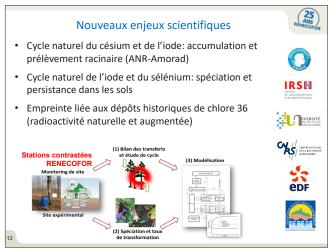
Les premiers résultats nous ont donné ce bilan, qui témoigne d'une très grande variabilité en fonction du type de site. Dans la litière, on observe des teneurs extrêmement variables avec déjà un certain pourcentage de chlore organique ; des traces probables d'un début de l'action microbiologique, même discrète, avant la collecte. Mais ce qui est intéressant c'est l'augmentation non seulement des teneurs en chlore total, mais de la proportion de chlore organique lors de la formation de l'humus. Cependant c'est le sol minéral qui, malgré tout, conserve le rôle de stock de chlore du fait, justement, de la persistance du chlore sous forme organique dans ce compartiment.

De cette première vision on a pu déduire que les humus agissent comme des bioréacteurs ; c'est à ce niveau que se transforme le chlore et c'est ce qui est à l'origine de sa persistance dans le sol.

L'humus est aussi le compartiment le plus réactif aux facteurs environnementaux. L'accumulation de matière organique est un facteur clé, comme l'illustre ce graphe qui montre une très belle relation entre le pool de carbone organique et le pool de chlore organique dans l'humus. Mais, plus largement, nous avons réalisé des tests statistiques pour tenter d'élucider les facteurs environnementaux qui favoriseraient la production et la persistance de chlore dans l'environnement, notamment sous forme de chlore organique. Seul le compartiment de l'humus est apparu comme très corrélé à différentes variables environnementales, notamment les apports de chlore, les essences, le stock de carbone et le pH du sol : plus on a affaire à des dépôts élevés, à des résineux, à un humus de type Mor-Moder et à une acidité forte, plus grande est la probabilité de former du chlore organique et de l'accumuler dans l'environnement.

Enfin pour bien décrire le cycle du chlore, les stocks et les flux ne suffisent pas ; il faut aussi estimer le taux d'accumulation lié à la transformation. On a vu que c'est au niveau de l'humus que se forme le chlore organique, avec des augmentations de concentration du fait de la captation du chlore inorganique des dépôts, lequel rentre dans les réactions de chloruration. Nous avons inventé une petite formule pour quantifier ce taux d'accumulation apparent et nous sommes arrivés à la conclusion qu'il y a toujours une énorme variabilité selon les sites mais aussi que les taux de transformation sont finalement assez faibles. Ça réagit rapidement pendant le processus d'humification, mais globalement le flux de transformation est faible par rapport à d'autres transferts ; ça représente notamment à peine quelques % des retombées. Ce qui nous fait dire qu'on ne peut pas négliger l'existence d'un cycle organique du chlore (en rouge), mais il mobilise encore très peu de quantités par rapport au cycle géochimique (en mauve). Malheureusement je n'aurai pas le temps de parler du cycle biologique (en vert) qui mobilise aussi d'énormes quantités de chlore et sur lequel on devrait revenir dans le futur.





+ Quel est l'apport original de RENECOFOR dans les résultats obtenus ?

Des données et échantillons originaux et complémentaires pour des conditions éco-climatiques contrastées

+ Quels seraient les orientations à prendre pour être en phase avec l'évolution des questionnements et dans l'optique d'un suivi de très long terme (50-100 ans) ?

Privilégier des collections intégrées pour des sites contrastés (retombées atmosphériques, climat, MO, essence ...)

Finalement, grâce à toutes ces données sur les intrants, les chutes de litière, le taux de chloruration et autres (données acquises *via* RENECOFOR et d'autres sites), on est capable de simulations plus réalistes. On peut calibrer le genre de modèle schématisé ici à gauche avec la représentation de la végétation, des différents compartiments du sol, et surtout avec une représentation explicite des compartiments organiques du chlore. À droite, je veux juste souligner la rapidité de la mise en équilibre entre la végétation et les pools de chlore inorganique (nos modèles opérationnels ne sont donc pas remis en question). Mais ce qu'il est intéressant de voir, c'est la lente progression de la formation du pool de chlore organique qui est en général négligée dans les modèles opérationnels ; on n'arrive à l'équilibre qu'après 1000 à 2000 ans environ, ce qui correspond bien aussi à la persistance de la matière organique dans les horizons profonds des sols, dont on a parlé dans la session 3.

Et pour la suite?

À défaut de conclusion, j'ai une bonne nouvelle. Nous avons de nouveaux enjeux, de nouveaux partenaires pour de nouvelles aventures, notamment sur le césium et l'iode en lien avec l'accumulation et le prélèvement racinaire dans le cadre d'un projet ANR; nous avons aussi de nouveaux questionnements sur le sélénium, sa spéciation et sa persistance dans les sols. Dans ces projets, on s'intéresse aux éléments stables pour mieux représenter le cycle des isotopes radioactifs.

Par ailleurs nous allons nous pencher sur l'empreinte liée aux dépôts historiques de chlore 36, soit les dépôts naturels, soit ceux liés aux tests nucléaires atmosphériques. Nous allons bénéficier d'une toute nouvelle technologie, la spectrométrie de masse par accélération, qui est mise en œuvre au CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement), et je pense que ce sera même une première mondiale si on arrive à faire toutes les analyses prévues.

Pour le futur de RENECOFOR, ce que nous lui souhaitons ainsi qu'à nous-mêmes, j'ai été très scolaire : j'ai repris les questions et j'ai mis les réponses !

L'apport de RENECOFOR, c'est surtout, dans notre cas, des données et échantillons originaux et complémentaires pour des conditions écoclimatiques contrastées. Ce qui nous intéresse en particulier ce sont les très longues échelles de temps, donc la diversité des écosystèmes est importante.

Et pour le futur, je pense tout simplement qu'il faut privilégier, continuer à privilégier ces collections très intégrées pour ces sites très contrastés, notamment en termes de climat, de retombées atmosphériques et de types de turn-over de la matière organique.

Merci à RENECOFOR et merci de votre attention.

25 ANS