

ACIDIFICATION ET EUTROPHISATION : VERS UN RÉTABLISSEMENT DE LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS ?

Quentin Ponette

Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute

**Acidification et eutrophisation :
vers un rétablissement de la fertilité chimique des sols ?**

Quentin Ponette, Anaïs Saenger, Mathieu Jonard, Manuel Nicolas

Beaune
12 octobre 2017

Bonjour à tous. Je me substitue à Anaïs Saenger, qui a changé de vie depuis l'époque où elle travaillait sur la thématique de la détection et de la quantification des changements temporels des caractéristiques des sols du réseau RENECOFOR. C'est au nom de toute l'équipe qui a travaillé à analyser ces données que je vais vous présenter ce sujet qui concerne l'évolution des sols forestiers en 15 ans de suivi.

Contexte

Pour commencer, quelques rappels sur les sols, qui jouent un rôle très important en termes de services écosystémiques. Le sol est un support essentiel pour la production, par ses effets sur les différentes composantes de la fertilité : chimique, physique, biologique. Il tient un rôle très important dans la régulation des flux de carbone, comme on l'a vu dans la session précédente, mais aussi de l'eau et des éléments minéraux. Et en plus c'est un réservoir considérable de biodiversité.

Les sols forestiers évoluent sous l'influence d'une série de facteurs extrêmement variés et qu'on maîtrise assez peu. Il y a déjà tout ce qui a eu lieu dans un passé relativement lointain et qu'on ne connaît pas toujours (les antécédents cultureux, les coupes réalisées dans les décennies passées...). Il y a le système lui-même, l'évolution du peuplement, qui fait évoluer les propriétés des sols. Il y a bien sûr les changements globaux, et en particulier des apports acides et d'azote et leur diminution récente. Et il y a enfin les pratiques de gestion, qui elles-mêmes évoluent. Je passe vite, par manque de temps...

Disons aussi quelques mots de **l'acidification des sols**, pour compléter un peu ce qui en a été dit en introduction. L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons : c'est la notion de découplage dont parlait Laurent Saint-André. Elle peut être liée à différents apports d'acide, soit dans les sols, soit par les apports atmosphériques. Nous allons considérer ici principalement les apports atmosphériques, en distinguant les types d'apport.

Il y a d'abord les apports d'acide sensu stricto, ici sous forme d'acide nitrique (HNO_3), qui acidifient le sol en déplaçant des cations basiques (Ca, Mg, K). On voit sur cet exemple que des protons (H) se sont substitués sur le complexe d'échange au calcium, lequel se retrouve en solution (Ca^{2+}) et exposé de surcroît aux pertes par drainage.

Contexte

Les sols forestiers dans un environnement changeant

- Les sols forestiers, sources de nombreux services écosystémiques
 - support de production : composantes chimiques, physiques & biologiques de la fertilité
 - régulation qualitative et quantitative des flux : eau, carbone, éléments minéraux
 - réservoir de biodiversité
- Un environnement changeant
 - un héritage dont l'influence est souvent mal estimée
 - des évolutions générées par le système lui-même
 - des changements globaux variés, aux impacts multiples
 - des pratiques de gestion qui évoluent
- Des sols sensibles ?
 - des intrants le plus souvent limités
 - des contraintes intrinsèques parfois fortes
 - des sols aux propriétés contrastées
 - des pressions très diverses
 - une même pression, des indicateurs de sensibilité multiples

2

Contexte

Acidification des sols

- L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons
- La magnitude et la nature des sources de protons diffèrent largement d'un écosystème à l'autre

Apports **externes** : acides forts

2HNO_3

acidification

3

Contexte

Acidification des sols

- L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons
- La magnitude et la nature des sources de protons diffèrent largement d'un écosystème à l'autre

Apports **externes** : sels

3 KCl

acidification nette nulle
acidification de la solution =
alcalinisation de la phase solide

Al³⁺
Cl⁻
Cl⁻ Cl⁻

4

Mais les apports atmosphériques contiennent aussi des sels d'origine marine. Ici j'ai pris l'exemple du chlorure de potassium (KCl) : dans ce cas l'effet sur l'acidification des sols est nul parce que l'alcalinisation nette de la phase solide du sol consécutive à l'adsorption du potassium (K) sur le complexe d'échange correspond précisément à l'acidification nette de la solution.

Enfin on a des cas intermédiaires de composés potentiellement acidifiants, où le devenir en termes d'acidification dépend très fortement de la forme de l'azote et des transformations de l'azote dans le sol. Par exemple, dans une première étape, l'ammonium (NH₄) peut se fixer au niveau du sol et, relativement plus tard, si les conditions le permettent, se nitrifier (oxydation en NO₃) et engendrer une acidification du sol, par la libération des protons (H).

Contexte

Acidification des sols

- L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons
- La magnitude et la nature des sources de protons diffèrent largement d'un écosystème à l'autre

Apports **externes** : composés potentiellement acidifiants

(NH₄)₂SO₄²⁻

acidification tributaire des transformations de N

Ca²⁺ SO₄²⁻ → Mg²⁺ SO₄²⁻ NO₃⁻ NO₃⁻

nitrification

Sources **internes** : multiples

5

Le sol peut réagir face à un apport d'acide, mettre en place un certain nombre de systèmes tampons. C'est ce que vous voyez sur la courbe : il n'y a pas une baisse automatique et directe du pH selon la quantité de protons ajoutée, cette évolution est tamponnée par une série de réactions qui vont laisser des traces dans le sol, et ce sont ces traces qui vont nous servir d'indicateur et que nous allons analyser plus en détail. Ces processus affectent la qualité des sols et des eaux, mais de façon différenciée selon les caractéristiques initiales des sols :

- réduction des réserves minérales ;
- réduction de la capacité d'échange ;
- réduction des 'bases' échangeables et du taux de saturation en bases ;
- solubilisation de l'aluminium ;
- diminution du pH de la solution du sol.

Parlons enfin des **apports d'azote**. L'azote peut être considéré comme bénéfique compte-tenu de son impact potentiel sur la productivité, mais nos écosystèmes tempérés sont souvent saturés en azote. Du coup, cet azote constitue plutôt un problème par ses effets sur l'acidification, les déséquilibres nutritionnels et éventuellement par ses impacts négatifs via le lessivage des nitrates.

Contexte

Acidification des sols

- L'acidification résulte d'un flux irréversible de protons
- La magnitude et la nature des sources de protons diffèrent largement d'un écosystème à l'autre

Apports **externes** : acides forts, sels, composés potentiellement acidifiants

Sources **internes** : multiples

- De nombreux processus contribuent à neutraliser les protons

échange ionique
dissolution
altération

6

Contexte

Apports d'azote

- Les apports atmosphériques, une bonne nouvelle pour la forêt ?
 - l'azote, élément clé de la productivité...
 - ...mais devenu rarement limitant en forêt tempérée
- Le versant obscur des apports azotés
 - des effets potentiels sur l'acidification des sols
 - un drainage accru des 'bases' suite à l'augmentation des anions mobiles
 - une plus forte immobilisation des nutriments dans la biomasse pérenne
 - des déséquilibres nutritionnels
 - une mobilisation des nitrates vers les nappes

7

Contexte

Questions clés

- Les propriétés des sols ont-elles changé en 15 ans de suivi ?
- Les changements détectés sont-ils cohérents ?
- Ces changements peuvent-ils être attribués à l'évolution récente des dépôts atmosphériques ?
- Ces changements sont-ils susceptibles d'affecter : la forêt future ; les services écosystémiques attendus de celle-ci ?



Méthodes

Prélèvements des sols

Principes

Chimie des sols : contrôle de la variabilité spatiale

- latérale

5 grappes (13,5 x 13,5 m)
5 points par grappe

- verticale

horizons holorganiques :

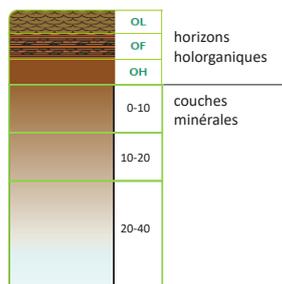
Ol, Of, Oh

couches minérales :

0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm

Description des sols : 2 fosses par placette (profondeur ≤ 1 m)

- analyses physico-chimiques ciblées



- estimation qualitative de la charge caillouteuse



Méthodes

Analyses chimiques

• Paramètres mesurés

Mêmes méthodes et même laboratoire (LAS, INRA Arras) aux deux campagnes

Paramètre	Méthode	Hor. holorganiques Couches minérales (cm)					
		Ol, Of	Oh	0-10	10-20	20-40	
C organique ^a	Combustion sèche	x	x	x	(x)	(x)	
	Méthode Anne				x	x	
N total	Combustion sèche	x	x	x	(x)	(x)	
	Méthode Kjeldahl				x	x	
P extractible	Dyer (pH CaCl ₂ ≤ 6,5) / Joret-Hébert (pH CaCl ₂ > 6,5)			x	x	x	x
	Colorimétrie						
pH H ₂ O / CaCl ₂	1 : 5 (V : V) H ₂ O ou CaCl ₂ 0,01 M			x	x	x	x
Cations échangeables	BaCl ₂ 0,1 M			x	x	x	x
	ICP (K, Ca, Mg, Mn, Al) ou titrage (H, Al)						
K, Ca, Mg totaux	Hf/HClO ₄	x	x				
	ICP						

^a Dosage des carbonates si pH CaCl₂ > 6

• Paramètres calculés

ECEC (cmol_c kg⁻¹) = (K+Ca+Mg+Al)_{ech}
S/T (%) = ((K+Ca+Mg)_{ech} / ECEC) x 100



Méthodes

Estimation des stocks

$$Stock_x = Concentration_x \times Masse/ha (\text{à } 105^\circ C) \times (1 - \text{Cailloux hors DA})$$

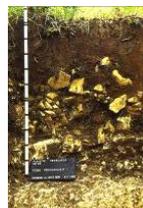
Analyses chimiques en laboratoire sur un échantillon représentatif



Echantillonnage d'une surface (cadre de litière) ou d'un volume défini (cylindre de densité apparente)



Cailloux, pierres, blocs estimés sur fosses



Objectifs et méthodes

Quels sont les grands objectifs de l'étude par rapport à ces différentes questions ?

Nous avons d'abord cherché à savoir si les propriétés des sols avaient changé en 15 ans de suivi et quelles étaient ces propriétés. Nous avons ensuite voulu savoir si les changements détectés étaient cohérents, s'ils pouvaient être expliqués par les évolutions récentes des dépôts atmosphériques notamment. Enfin, dans une phase plus exploratoire, nous avons essayé de voir quelles pourraient être les conséquences de ces changements sur la forêt future et les services écosystémiques.

Pour répondre à ces questions, le réseau RENECOFOR est un outil magnifique. Mathieu Jonard a déjà présenté la méthode de prélèvement d'échantillons (cf. session 3). En deux mots, elle vise d'abord à maîtriser la variabilité spatiale, qui est fort importante pour les sols forestiers, à l'aide d'un échantillonnage par grappes. Et elle permet d'étudier comment les propriétés évoluaient avec la profondeur, puisqu'on soupçonne que l'évolution est plus importante en surface qu'en profondeur, avec un découpage par couche : les horizons holorganiques d'une part et les couches minérales de l'autre. Deux campagnes de prélèvement ont eu lieu : une en 1993-1995, l'autre en 2007-2012, soit 15 ans en moyenne après la première, en faisant migrer ces fameuses grappes dans une direction fixée pour réaliser le même type de prélèvements.

Ces sols ont été analysés par un laboratoire accrédité, le laboratoire de l'INRA à Arras. On a analysé un certain nombre de paramètres pour traduire les évolutions des sols : un pôle lié à la matière organique avec le carbone, l'azote et le phosphore, un indicateur de l'acidité (pH) et des indicateurs indirects de l'acidité, les cations échangeables, et enfin, pour les horizons de surface, les cations totaux.

À partir de ces paramètres on a pu en calculer d'autres : la capacité d'échange cationique des sols (somme des bases échangeables et de l'aluminium échangeable), et un indicateur de la saturation des sols en bases échangeables, ce qu'on appelle le taux de saturation.

Nous avons pu alors calculer des stocks et évaluer les changements de stocks au cours du temps, après avoir vérifié que les analyses donnaient des résultats comparables d'une campagne à l'autre : c'est tout l'aspect contrôle de qualité.



Photo : Erwin Ulrich, ONF

Méthodes

Quantification des changements

- Evolution des propriétés chimiques individuelles

Modèle statistique
campagne : effet fixe
placette : effet aléatoire

Analyse des effets

P valeur (< 0,05)

taille des effets : faible (↗, ↘), moyen (↗↘, ↘↗), fort (↗↘↗, ↘↗↘)

- Evolution conjointe des propriétés chimiques

Corrélations de rang sur les changements de propriétés entre campagnes

Analyses en Composantes Principales sur les valeurs centrées réduites par placette

- Divergence d'évolution selon le type de sol

Trois niveaux d'acidité - sols carbonatés exclus selon pH H₂O dans 0-10 cm :
très acides (< 4,5), intermédiaires (4,5-5,5), faiblement acides (> 5,5)

Modèle statistique : interaction (campagne × type de sol)



Résultats

Horizons holorganiques

Stocks de C et N

Rapport C/N

Stocks de Ca, Mg & K totaux

	Effet
C _{org}	↗
N _{tot}	NS
C/N	↗↘
K _{tot}	NS
Ca _{tot}	↗
Mg _{tot}	↗

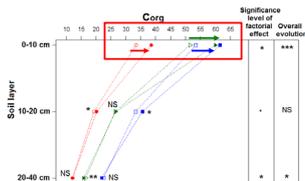


Résultats

Couches minérales

C organique, N total, C/N ; P extractible

Couche (cm)	Paramètre chimique			
	C _{org}	N _{tot}	C/N	P _{extr}
0-10	↗	↗	↗	NS
10-20	NS	↘	↗	NS
20-40	↘	↘	↗	NS
0-40	↗	↘	↗	NS

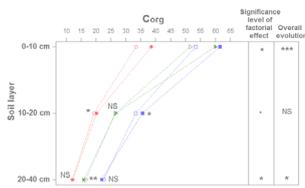


Résultats

Couches minérales

C organique, N total, C/N ; P extractible

Couche (cm)	Paramètre chimique			
	C _{org}	N _{tot}	C/N	P _{extr}
0-10	↗	↗	↗	NS
10-20	NS	↘	↗	NS
20-40	↘	↘	↗	NS
0-40	↗	↘	↗	NS



Ces changements ont d'abord été quantifiés paramètre par paramètre, et comme on a beaucoup de données, la probabilité de mettre en évidence des changements est élevée. Par conséquent il ne suffit pas de se baser simplement sur la significativité des effets, il faut apprécier la « taille » de ces effets. C'est pourquoi vous verrez dans la suite un système de petites flèches : plus il y a de flèches plus l'effet est important d'un point de vue écologique, qu'il soit à la hausse (flèches bleues) ou à la baisse (flèches rouges).

Nous avons ensuite essayé de voir globalement comment les sols ont évolué en prenant en considération l'ensemble des propriétés. Et nous avons enfin essayé de voir dans quelle mesure les évolutions pouvaient diverger en fonction des types de sol et notamment des niveaux d'acidité. C'est pourquoi, dans les figures suivantes vous verrez les sols très acides sont représentés en vert, les sols faiblement acides en bleu (nous avons exclu de l'analyse les sols carbonatés) et les sols intermédiaires en rouge.

Résultats : les évolutions constatées

Dans les horizons de surface les changements sont relativement modérés : on a une augmentation du stock de carbone (déjà évoquée dans la session 3), une stabilité de l'azote et surtout une augmentation importante du rapport C/N qui est issue directement des deux effets précédents. Au niveau des bases totales, il y a relativement peu de changement.

Passons aux couches minérales, en commençant par les éléments qui traduisent l'évolution du pôle organique. Je ne m'étends pas sur le cas du carbone, que Mathieu Jonard a présenté en détail. Je vais plutôt me concentrer sur l'azote, dont les évolutions sont très différentes en surface et dans les couches profondes.

Dans la couche 0-10 cm, on constate une augmentation du stock d'azote alors que dans les couches profondes on constate une diminution importante de l'azote. Ces évolutions sont observées quel que soit le type de sol. Sur les graphiques, le sens des flèches va de la campagne 1 à la campagne 2 et montre pour les trois familles de sols une augmentation dans les horizons de surface et une diminution pour les horizons profonds. Le résultat mathématique de cette évolution relative du carbone et de l'azote, c'est une augmentation du rapport C/N dans tous les cas.

En ce qui concerne le phosphore nous n'avons pas observé d'évolution significative.

Le pH, lui, a baissé de manière relativement faible et seulement dans les horizons de surface (0-10 voire 10-20 cm), mais exclusivement dans les sols les plus acides (courbes vertes).

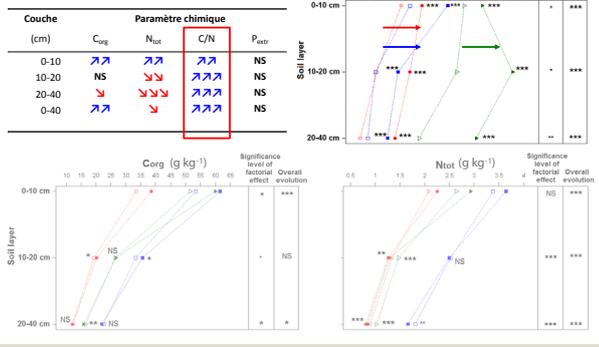
Quant à la capacité d'échange du sol, donc la capacité à retenir des éléments, on constate qu'elle a augmenté dans les deux horizons de surface. Là encore c'est un effet général qui s'observe quel que soit le type de sol. En moyenne, le calcium contribue très peu à cette augmentation de charge ; sa teneur diminue même dans certains cas comme dans les sols les plus acides, en profondeur.

Pour le potassium et le magnésium, en revanche, on a une augmentation importante, du même ordre de grandeur dans les deux horizons de surface, et là encore quel que soit le type de sol.

Résultats

Couches minérales

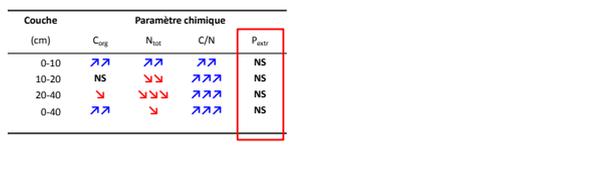
C organique, N total, **C/N**; P extractible



Résultats

Couches minérales

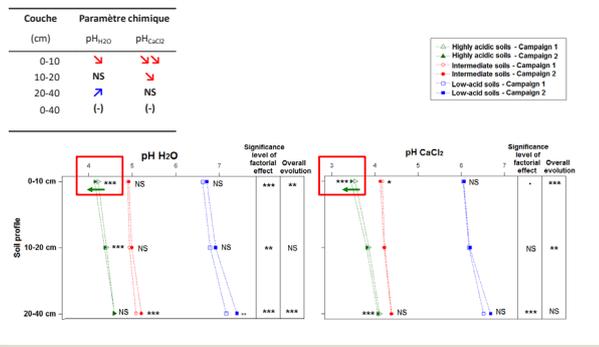
C organique, N total, C/N; **P extractible**



Résultats

Couches minérales

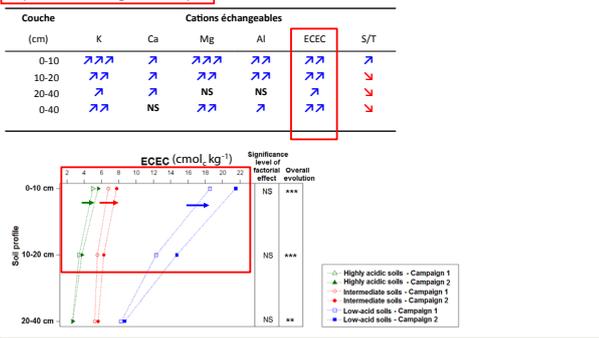
pH



Résultats

Couches minérales

Cations échangeables
Capacité d'échange cationique



Enfin si on s'intéresse à **l'aluminium**, qui traduit l'acidité, on constate également en moyenne une augmentation, toujours dans les deux mêmes couches, mais avec des nuances importantes selon le type de sol puisque cette augmentation est assez logiquement observée surtout dans les sols les plus acides, en vert sur la figure.

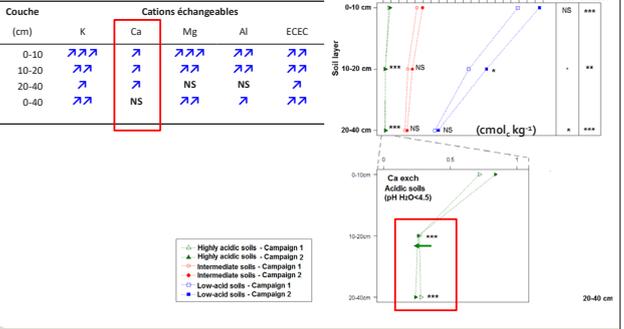
Le résultat des courses, c'est que globalement le **taux de saturation en bases** évolue relativement peu. Un peu à la hausse dans l'horizon de surface, et un tout petit peu à la baisse dans les horizons plus profonds.

Résultats

Couches minérales

Cations échangeables

Calcium

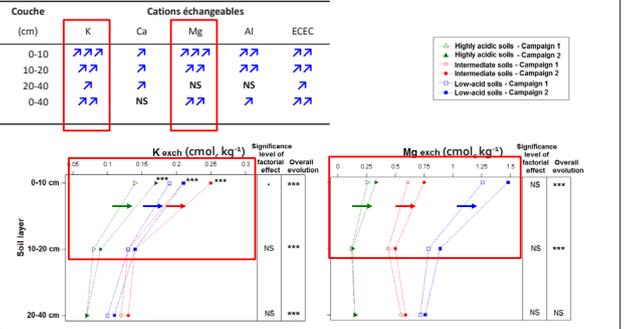


Résultats

Couches minérales

Cations échangeables

Potassium et magnésium

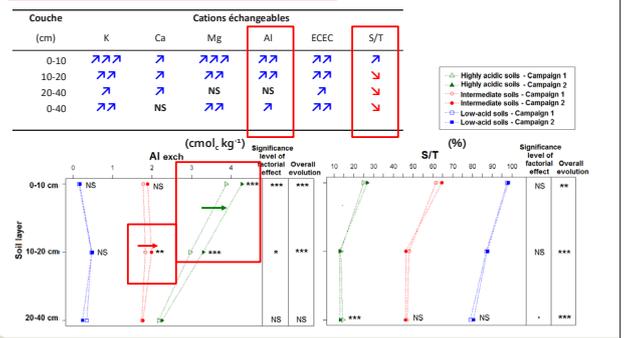


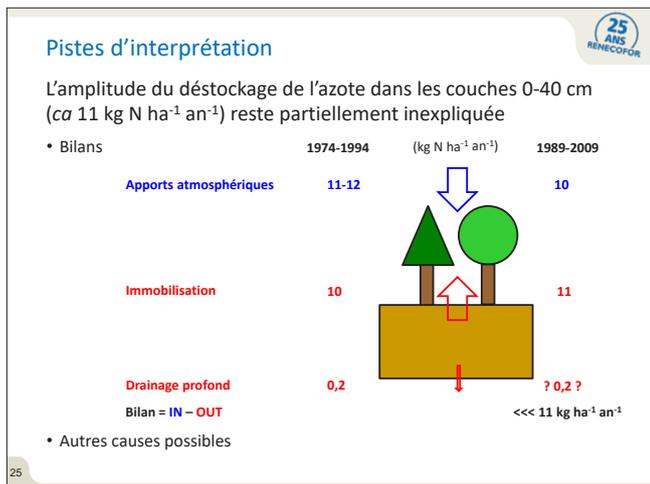
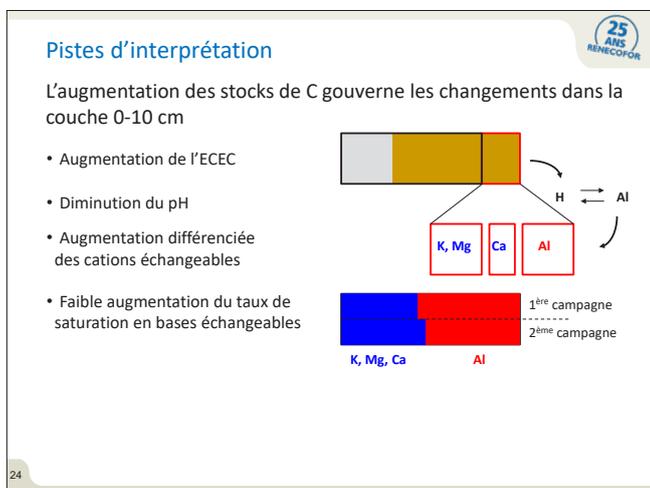
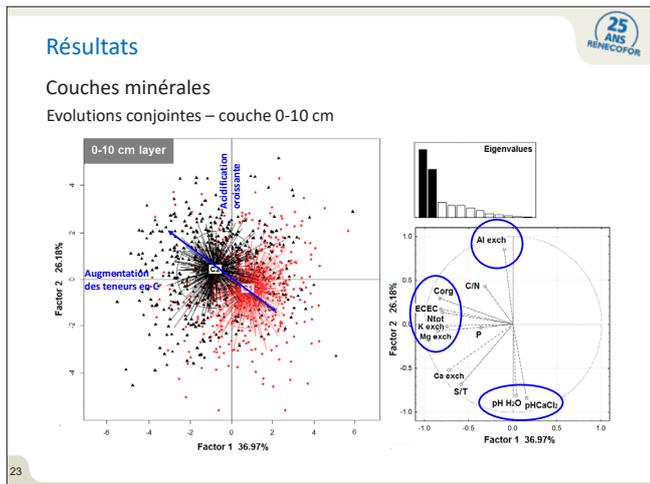
Résultats

Couches minérales

Cations échangeables

Aluminium ; Taux de saturation en bases





Quelles sont les causes de ces changements dans les couches minérales ?

Je vais passer rapidement sur ce type de figure qui montre l'évolution globale des propriétés des sols, ici dans l'horizon 0-10 cm : en rouge la position des sols à la campagne 1, en noir la position à la campagne 2. Vous voyez qu'il y a un 'déplacement' important des caractéristiques des sols dans deux directions : déplacement essentiellement vers la gauche, qui témoigne d'une augmentation des teneurs en carbone, et secondairement vers le haut, qui représente une augmentation de l'acidité. Je passe sous silence les couches sous-jacentes, où l'évolution est moins marquée, pour arriver directement à une tentative d'interprétation.

Tentative d'interprétation

Au niveau de la couche 0-10 cm, il semble que la dynamique du carbone soit le principal moteur des changements. Dans cette couche holorganique, les échangeurs sont essentiellement constitués de matière organique (c'est ce qui est représenté en brun), par opposition aux constituants minéraux. Le fait de rajouter du carbone organique va augmenter la charge et par conséquent l'ECEC (capacité d'échange cationique). D'autre part ce carbone organique va avoir un impact sur l'acidité du sol : il entraîne une baisse de pH qui, elle-même, peut conduire à relâcher des ions aluminium par solubilisation des phases solides. On a vu préalablement que l'augmentation de la charge était compensée principalement par du potassium, du magnésium et de l'aluminium, et relativement peu par du calcium. Globalement, le résultat c'est que le taux de saturation en bases augmente par rapport à ce qu'on observait en première campagne, mais très légèrement puisque le potassium et le magnésium augmentent mais également l'aluminium.

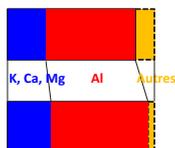
En ce qui concerne l'azote, nous avons été surpris de constater un déstockage si important dans les horizons profonds et les causes ne sont pas encore absolument élucidées. Nous avons d'abord examiné si ça pouvait être lié à l'évolution des apports et des sorties, en comparant ces apports et ces sorties sur deux périodes de référence : la période 1974-1994, d'une part, et 1989-2009, de l'autre. Comme Aude Bourin l'a souligné, les apports atmosphériques d'azote ont diminué. Du côté des sorties, l'immobilisation a pu augmenter puisque l'apport d'azote peut avoir un effet fertilisant sur la forêt ; nous avons donc supposé une immobilisation légèrement plus importante d'azote dans la biomasse. Par contre nous n'avons trouvé aucun indice d'augmentation des sorties d'azote par drainage. Donc en l'état, ce bilan ne permet pas d'expliquer ce déstockage important. D'où l'hypothèse que nous a soufflée Jean-Luc Dupouey : peut-être est-ce lié au développement de la végétation dans les placettes RENECOFOR ?

Quant à la capacité d'échange, dont on a vu qu'elle a augmenté en surface, elle augmente aussi dans la couche 10-20 cm, mais l'interprétation est différente : ça ne peut pas venir d'une augmentation des teneurs en carbone puisqu'on n'en a pas détecté. Ce qu'on pense c'est qu'elle est simplement liée au fait que les cations (K, Ca, Mg, Al) ont pu déplacer une partie des ions échangeables qui ne sont pas comptabilisés dans les analyses. C'est ce qui est représenté sur la figure : ce qui est comptabilisé, c'est ce qui est figuré en rouge et en bleu, pas ce qui est en jaune. Entre les deux campagnes, davantage de K, Ca, Mg et Al ont pu occuper des sites précédemment occupés par ces cations non comptabilisés, parmi lesquels il y a probablement de l'ammonium, qui a pu migrer ou se nitrifier et contribuer au déstockage d'azote que j'ai évoqué.

Pistes d'interprétation

25 ANS RENECOFOR

L'augmentation de l'ECEC dans la couche 10-20 cm s'explique par des échanges avec des cations non / mal comptabilisés (H, Mn, Fe, NH_4^+ , ...)

1^{ère} campagne2^{ème} campagne

La mobilisation de NH_4^+ pourrait contribuer au déstockage de N

26

Conclusions et perspectives

25 ANS RENECOFOR

- Changements significatifs de nombreux paramètres après 15 ans
 - grande cohérence globale
 - changements détectés principalement dans les couches supérieures, sauf N
- Nature des changements différents selon la couche
 - 0-10 cm : changements gouvernés par l'augmentation des stocks de C
 - 10-40 cm : changements dominés par la réduction des stocks de N, à stock de C constant
- Lien avec évolution récente des dépôts atmosphériques complexe
 - acidification :
 - en 0-10 cm, évolution partiellement liée à celle des stocks de C
 - réponses contrastées selon l'indicateur : pH, éléments échangeables, S/T
 - déstockage de l'azote dans les couches 10-40 cm :
 - sans lien apparent avec la réduction des apports azotés
 - processus à clarifier
- Impacts possibles sur le fonctionnement des écosystèmes
 - changements significatifs mais évolutions relatives ou absolues contrastées
 - dynamiques de C et N largement affectées, avec nombreux impacts observés / attendus
 - intérêt d'un couplage observation-expérimentation-modélisation

27

RENECOFOR et moi...

25 ANS RENECOFOR

- Ma première expérience professionnelle...
- De très nombreux points FORTs
 - possibilité de détecter des évolutions temporelles
 - de confronter la réponse de paramètres variés
 - d'intégrer de nombreux processus dans l'interprétation des résultats
 - intégration dans des réseaux
 - contextualisation et généralisation des résultats
- Des évolutions possibles
 - diversifier les écosystèmes forestiers suivis
 - tester et adopter des techniques de mesures innovantes
 - suivre de nouveaux paramètres

22

En résumé et en conclusion

Nous avons pu observer des changements importants de plusieurs paramètres physicochimiques, et de manière fort cohérente. La nature de ces changements diffère selon la couche considérée. Dans la couche 0-10, le changement est essentiellement lié à l'augmentation du stock de carbone ; dans la couche 10-40, il est principalement lié au déstockage de l'azote, à carbone constant. Les liens avec les évolutions récentes des dépôts atmosphériques sont assez complexes.

En ce qui concerne l'acidification, on a vu qu'il y a une diminution du pH assez contradictoire avec la diminution des apports acides et qui peut s'expliquer plutôt par une augmentation des stocks de carbone. Si on considère différents indicateurs, on observe parfois des réponses contrastées : une diminution du pH et par contre une augmentation des bases échangeables, une augmentation de l'aluminium échangeable et globalement une augmentation très légère du taux de saturation en bases. Pour le déstockage de l'azote, les processus restent à clarifier, probablement à l'aide de la modélisation.

Que dire de mon point de vue sur RENECOFOR ?

RENECOFOR a été ma première expérience professionnelle : j'ai passé une année à Fontainebleau, où j'ai pu analyser les données de la première campagne de sols.

À part ça, vous l'avez compris, le réseau a de très nombreux points forts, grâce à une collaboration efficace entre de très nombreux acteurs — les forestiers mais aussi tous ceux qui interviennent à toutes les étapes du processus pour les analyses chimiques, le contrôle des données, les analyses, etc. Grâce à la puissance de ce jeu de données on est en mesure de détecter des changements, et de confronter ces changements à l'évolution d'autres variables de réponse (voir si ça va dans le même sens ou non). Il est également possible d'intégrer de nombreux processus pour interpréter les résultats et comprendre les changements observés. Par ailleurs, RENECOFOR n'est pas isolé mais intégré dans un ensemble de réseaux, non seulement en France mais aussi à l'échelle internationale, ce qui permet de contextualiser les résultats et aussi, dans une certaine mesure, de les généraliser.

Il y a des pistes d'évolution possibles, notamment sur la question des âges dont on constate que c'est quelque chose de très important ; il faudrait pouvoir diversifier les écosystèmes en termes d'âge. On a vu aussi qu'il peut être utile de tester et mettre en place des techniques innovantes (télé-détection par exemple) pour mesurer un certain nombre de paramètres, et on peut imaginer qu'il sera nécessaire de mesurer d'autres paramètres à l'avenir.

Je vous remercie pour votre attention