

# DÉGRADATION DE LA NUTRITION DES ARBRES EN PHOSPHORE : UN SIGNAL CONFIRMÉ À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

**Mathieu Jonard**

Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute



## Dégradation de la nutrition minérale des arbres : un signal confirmé à l'échelle européenne

**Mathieu Jonard**, A. Fürst, A. Verstraeten, A. Thimonier, V. Timmermann, N. Potočić, P. Waldner, S. Benham, K. Hansen, P. Merilä, Q. Ponette, A. C de la Cruz, P. Roskams, M. Nicolas, L. Croisé, M. Ingerslev, G. Matteucci, B. Decinti, M. Bascietto et P. Rautio.



Je reviens à cette tribune pour parler non plus de carbone dans le sol mais de nutriments dans les feuilles avec la question de l'évolution de la nutrition minérale des arbres au cours du temps.

Après une première étude réalisée à l'échelle de la France, j'ai eu la chance de traiter les données d'analyses foliaires sur l'ensemble des placettes du PIC Forêts. Et c'est le résultat de cette étude que je vais présenter aujourd'hui. Mais je vous propose de poser d'abord le cadre théorique.

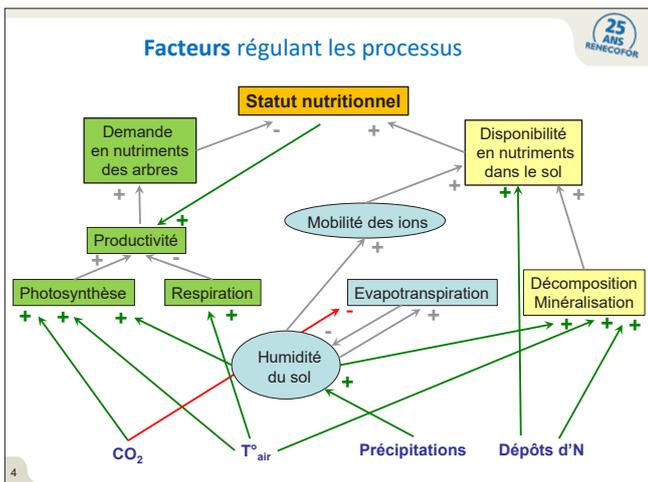
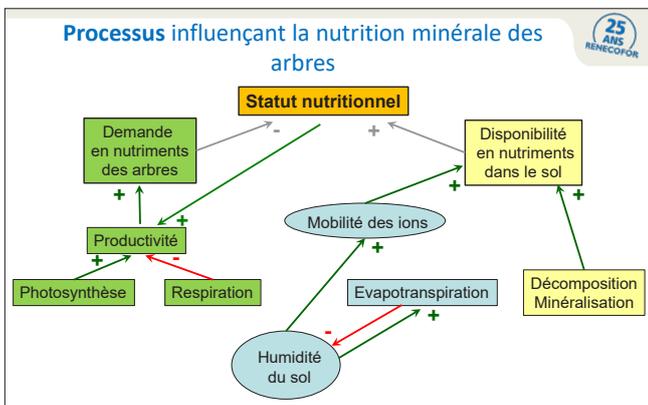
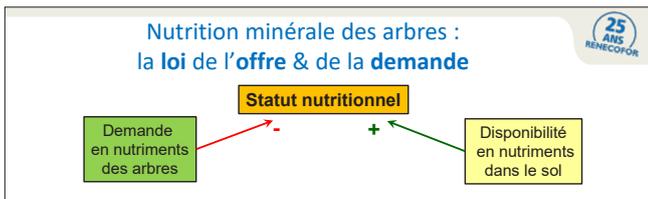
### Nutrition minérale des arbres : cadre théorique

Commençons en définissant le statut nutritionnel d'un arbre. C'est une notion qui traduit en quelque sorte à quel point l'arbre dispose de suffisamment de nutriments pour assurer son développement, sa croissance, sa reproduction. Toutes choses égales par ailleurs, le statut nutritionnel aura tendance à se détériorer si la demande en nutriments de l'arbre augmente, suite par exemple à une augmentation de la croissance. Il sera par contre d'autant meilleur que la disponibilité en nutriments dans le sol sera grande.

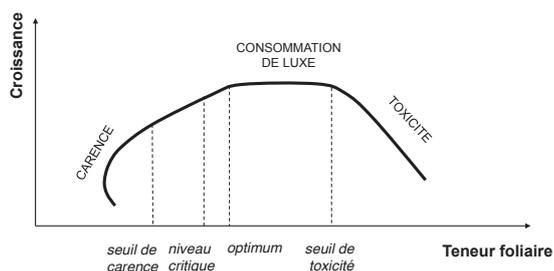
La demande en nutriments de l'arbre dépend directement de la productivité de l'arbre, qui est elle-même déterminée par une série de processus, dont deux processus majeurs : la photosynthèse et la respiration. De son côté, la réserve en nutriments dans le sol est rechargée par la minéralisation de la matière organique mais aussi par l'altération des minéraux (qui n'est pas représentée ici) ; sa disponibilité dépend également de la teneur en eau du sol, qui influence la mobilité des ions, donc leur capacité à migrer vers la racine. Et la teneur en eau dépend de tous les flux d'eau qui se produisent dans l'écosystème, en particulier l'évapotranspiration.

Tous ces flux sont tributaires du climat, des dépôts atmosphériques.

On peut donc se poser la question : comment va évoluer le statut nutritionnel si le climat change, si les dépôts évoluent ? Une manière simple de faire est d'observer comment se fait l'évolution actuellement : ceci prend un peu de temps mais on peut suivre au cours du temps le statut nutritionnel.



## Diagnostic foliaire : un outil d'évaluation du statut nutritionnel



(adapté de Prévot et Ollagnier 1956, Bonneau 1988)

25 ANS RENECOFOR

## Objectifs de l'étude

→ **caractériser le statut nutritionnel** des principales essences en Europe :

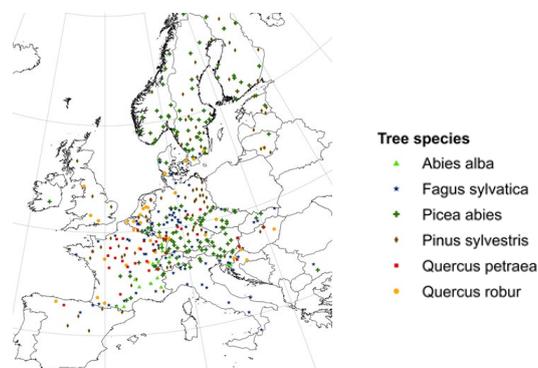
- chêne sessile et pédonculé, hêtre,
- épicéa commun, pin sylvestre et sapin pectiné

→ **identifier les nutriments limitants**

→ **détecter les évolutions temporelles** dans la nutrition des arbres

25 ANS RENECOFOR

## Données d'analyse foliaire collectées dans 425 placettes du PIC Forêts entre 1992 et 2009



25 ANS RENECOFOR

Dans cette optique, **le diagnostic foliaire** est un outil très intéressant. Il s'agit de prélever des échantillons foliaires, de les analyser, et de comparer les teneurs foliaires obtenues à des valeurs seuil connues. Cette approche se base sur la relation qui existe entre la croissance et les teneurs foliaires. Pour une certaine gamme de teneurs foliaires, la croissance est optimale ; en-deçà et au-delà de cette gamme, la croissance est réduite par manque ou par excès de nutriments. Ainsi on peut positionner différentes valeurs seuil sur la courbe. D'abord le seuil de carence, qui correspond à une réduction assez forte de la croissance et à l'apparition de symptômes comme par exemple le jaunissement des feuilles de hêtre suite à une carence en magnésium. Puis il y a le niveau critique qui correspond à une perte de croissance de 10% environ, l'optimum qui est la valeur la plus basse de la gamme des concentrations pour une croissance optimale, et enfin le seuil de toxicité qui est la valeur la plus élevée de cette gamme. Sur la base de ces seuils, on peut déterminer le statut nutritionnel des arbres.

## Les objectifs de l'étude et les données disponibles

Le premier objectif de l'étude était de caractériser le statut nutritionnel des principales essences en Europe pour lesquelles on avait suffisamment de données. Pour les feuillus, ce sont les chênes sessile et pédonculé et le hêtre, et pour les résineux, l'épicéa, le pin sylvestre et le sapin pectiné.

Caractériser le statut des nutritionnel des grandes essences, donc, et identifier les nutriments limitants. Le deuxième grand objectif était de détecter les évolutions temporelles dans la nutrition des arbres.

Pour ça, j'ai eu la chance de disposer d'un excellent jeu de données qui comprend l'ensemble des données d'analyses foliaires collectées entre 1992 et 2009 dans plus de 400 placettes du PIC Forêts réparties dans toute l'Europe. Un des grands avantages du jeu de données, comme Nils König l'a expliqué, c'est qu'on travaille avec des méthodes harmonisées entre les différents pays et qu'on a un programme très rigoureux d'assurance qualité et de vérification de la comparabilité des résultats.

Brièvement, comment se fait l'analyse foliaire ? On prélève des feuilles dans le tiers supérieur de la couronne, sur un minimum de 5 arbres par placette. Pour les résineux, on sépare les aiguilles en fonction de leur âge. Les échantillons sont séchés, broyés puis minéralisés avant d'être analysés chimiquement. Parallèlement, on détermine la masse foliaire (= masse de 100 feuilles ou de 1000 aiguilles).

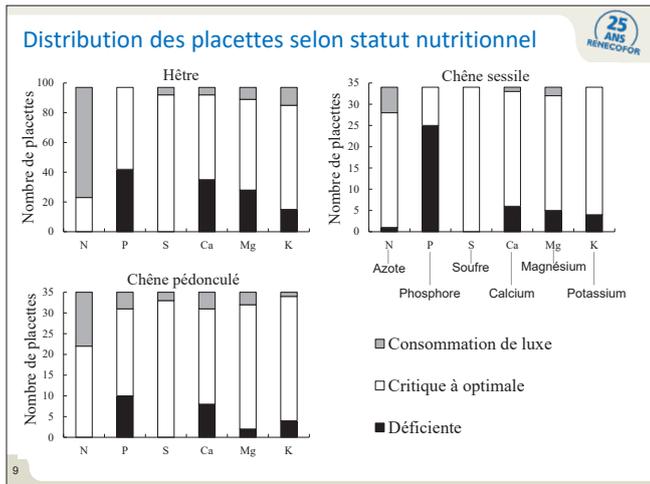
Passons maintenant aux résultats.

## Analyse foliaire



- prélèvement dans le 1/3 supérieur de la couronne
- minimum 5 arbres par placette
- séparation des aiguilles en classes d'âge
- séchage et broyage des échantillons
- minéralisation et/ou digestion
- analyse chimique
- détermination de la masse foliaire

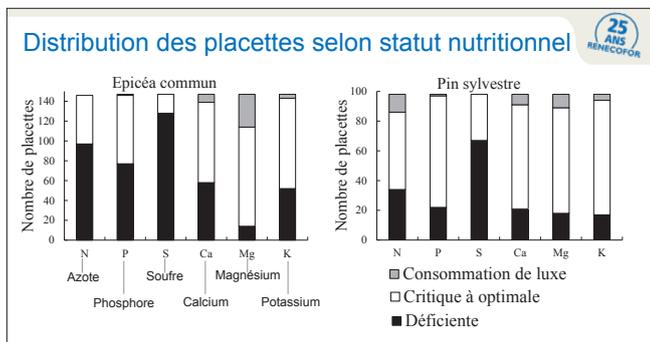
25 ANS RENECOFOR



## Le statut nutritionnel des arbres, par essence

Le premier résultat concerne, pour chaque essence, la distribution des placettes selon le statut nutritionnel, classé en 3 niveaux : un niveau de carence (nutrition déficiente), un niveau intermédiaire entre le niveau critique et l'optimum et, au-delà de l'optimum, un niveau de consommation « de luxe » voire, pour certains éléments, de toxicité.

D'abord les placettes de **feuillus**. On voit que la nutrition azotée (N) est assez bonne, et que pour une proportion non négligeable de placettes c'est même une consommation de luxe, notamment pour le hêtre. Par contre, au niveau du phosphore (P), il y a un nombre important de placettes qui sont en carence (entre 30 et 70 % des placettes). Pour le soufre, la nutrition est bonne. Et pour les cations basiques (calcium, magnésium, potassium), elle est bonne en moyenne mais avec tout de même une proportion non négligeable de placettes qui présentent des carences selon les éléments, notamment au niveau du calcium (jusqu'à 30% de placettes en carence). Finalement, l'élément qui semble le plus limitant en ce qui concerne les essences feuillues, c'est le phosphore.



Pour ce qui est des **résineux**, le schéma est à peu près semblable, avec cependant certaines différences, notamment au niveau de la nutrition azotée pour laquelle la proportion de placettes en carence est bien plus importante. En ce qui concerne le soufre, les teneurs foliaires sont basses, mais on ne peut pas vraiment parler de carence parce qu'on n'avait pas de seuil ; dans ce cas les placettes ont simplement été classées en 3 niveaux de concentration (basse, moyenne ou élevée). Pour les cations basiques, c'est un peu comme chez les essences feuillues. Finalement, il semblerait qu'il y ait pour les résineux une co-limitation encore forte par l'azote et le phosphore, sans doute en lien avec l'impact, dans le jeu de données, des placettes résineuses des pays nordiques.

## Qu'en est-il des évolutions temporelles ?

### Evolution temporelle de la nutrition foliaire

25 ANS RENECOFOR

Essence	Age des aiguilles	Masse foliaire	Concentrations foliaires (mg g <sup>-1</sup> )					
			N	P	S	Ca	Mg	K
Hêtre		+++	-	---	---	-	---	
Chêne sessile			---	---	---			-
Chêne pédonculé		(+)						
Sapin pectiné	année en cours		--					+
Epicéa commun	année en cours	+++			---			(+)
Pin sylvestre	année en cours			-	---			
Sapin pectiné	1 an			-				
Epicéa commun	1 an		-	---	--			---
Pin sylvestre	1 an					+++		

Voici un tableau qui reprend les essences en distinguant, pour les résineux, les aiguilles de l'année des aiguilles d'un an, et qui récapitule les tendances qui se sont montrées significatives sur la période 1992-2009. Quand il n'y a pas de signe « + » ou « - », c'est qu'il n'y a pas d'évolution. On remarque que, lorsqu'il y a une évolution significative de la masse foliaire, c'est à la hausse, alors que pour les teneurs foliaires, ce sont plutôt des évolutions à la baisse en ce qui concerne l'azote, le phosphore et le soufre et aussi le potassium. Pour le calcium et le magnésium, on a des évolutions à la baisse dans les peuplements feuillus et des évolutions plutôt à la hausse – quand il y en a – pour les peuplements résineux.

### Des tendances déjà observées à l'échelle de la France (entre 1993 et 2005)

25 ANS RENECOFOR

Groupes	Nb	Masse foliaire	N	S	P	Ca	Mg	K	Na	Cl
Chêne pédonculé - Sols acides	9				↘	↘	(↘)			↗
Chêne sessile - Sols acides	22		↘		↘					↗
Hêtre - Sols acides	18	↗	(↘)		↘	↘	↘			↗
Hêtre - Sols eutrophes	8				↘	↘				↗
Douglas - Sols acides	6	↘						(↗)		
Epicéa - Sols acides	12		(↘)			(↘)				
Epicéa - Sols eutrophes	3	↗	↘			(↘)				↗
Pin maritime - Sols acides	5				↘	↘	(↗)			
Pin sylvestre - Sols acides	14				(↘)					
Sapin pectiné - Sols acides	6		(↘)		↘				↗	↗
Sapin pectiné - Sols eutrophes	5		↘							

Ces résultats sont très semblables à ceux qu'on avait obtenus quelques années auparavant à l'échelle de la France, sur la période 1993–2005. Il y avait des essences supplémentaires (Douglas, pin maritime), et on avait distingué les types de sol. Les tendances détectées étaient les mêmes : augmentation de la masse foliaire et diminution des teneurs.

Evolution temporelle de la nutrition foliaire

Essence	Age des aiguilles	Masse foliaire	Concentrations foliaires (mg g <sup>-1</sup> )						
			N	P	S	Ca	Mg	K	
Hêtre		+++	-	---	---	-	---		
Chêne sessile			---	---	---	-		-	
Chêne pédonculé		(+)							
Sapin pectiné	année en cours		--					+	
Epicéa commun	année en cours	+++			---			(+)	
Pin sylvestre	année en cours			-	---				
Sapin pectiné	1 an			-					
Epicéa commun	1 an		-	---	---			---	
Pin sylvestre	1 an						+++		

- Masse foliaire ↗ ⇒ fertilisation par ↗ du CO<sub>2</sub> atm. et dépôts d'N
- ↘ teneurs foliaires en N et S ⇒ ↘ dépôts atmosphériques
- Masse foliaire ↗ ⇒ teneurs ↘ ⇒ effet de dilution ?

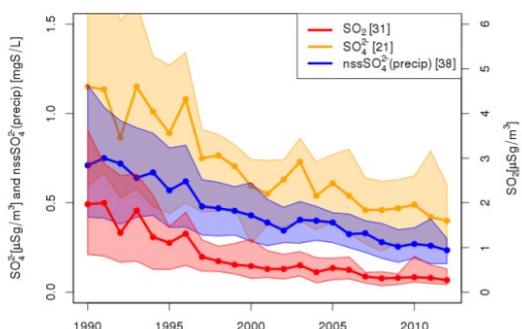
Comment expliquer ces tendances ? Je vais seulement pouvoir émettre des hypothèses.

On peut relier l'augmentation de la masse foliaire à une augmentation de la productivité qui viendrait de l'effet « fertilisant » du CO<sub>2</sub> atmosphérique et des dépôts d'azote. C'est le genre de résultat qu'on observe également dans les expériences d'enrichissement en CO<sub>2</sub> ou dans les dispositifs de fertilisation. La baisse des dépôts atmosphériques peut expliquer la diminution des teneurs foliaires en soufre et également en azote mais dans une moindre mesure.

Aude Bourin nous a montré (session 4) toutes les tendances constatées au niveau des dépôts. J'ai juste repris ici un graphe de l'EMEP\* pour les évolutions à l'échelle européenne. On voit ici que les concentrations dans l'atmosphère en dioxyde de soufre (rouge), sulfate particulaire (jaune) et dissous dans la pluie (bleu) ont connu une forte baisse au cours du temps. Je pense que cette baisse a eu un impact direct sur la concentration en sulfate dans la solution du sol et en soufre dans les feuilles.

Pour ce qui est de l'azote, il y a une baisse également mais elle est moins prononcée et il est moins facile de dire si cette baisse des dépôts a joué un rôle significatif dans la baisse des teneurs en azote des feuilles.

Evolution temporelle de la concentration en dioxyde de soufre, en sulfate particulaire ou dissous dans la pluie



Evolution temporelle de la concentration en dioxyde d'azote, en nitrate particulaire ou dissous dans la pluie

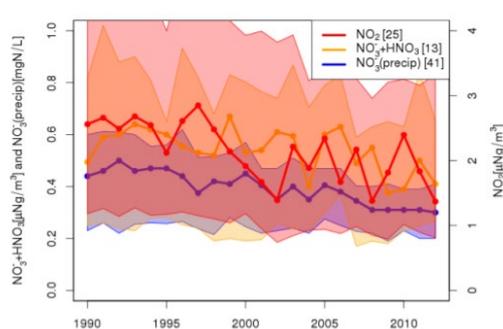
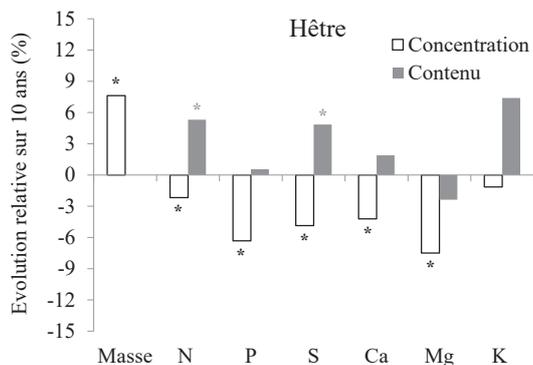


Illustration de l'effet de dilution

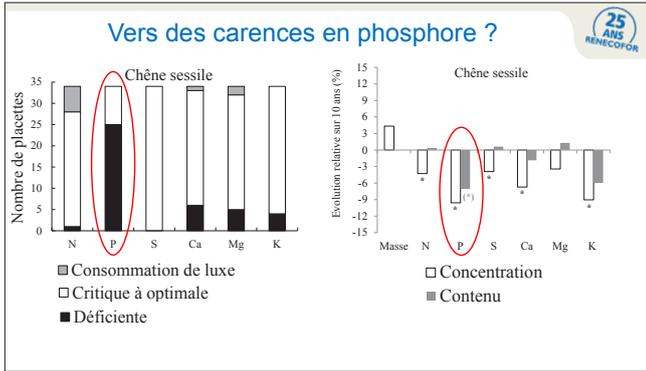


Autre hypothèse pour expliquer l'évolution à la baisse des teneurs foliaires, c'est un effet de dilution suite à l'augmentation de la masse foliaire.

Et cet effet est très bien illustré dans le cas du hêtre. On voit sur ce graphique l'évolution relative sur 10 ans pour les différents paramètres foliaires : il y a une augmentation assez nette de la masse foliaire qui se fait en parallèle d'une diminution systématique des teneurs en azote, en phosphore, en soufre, en calcium, en magnésium, à l'exception du potassium.

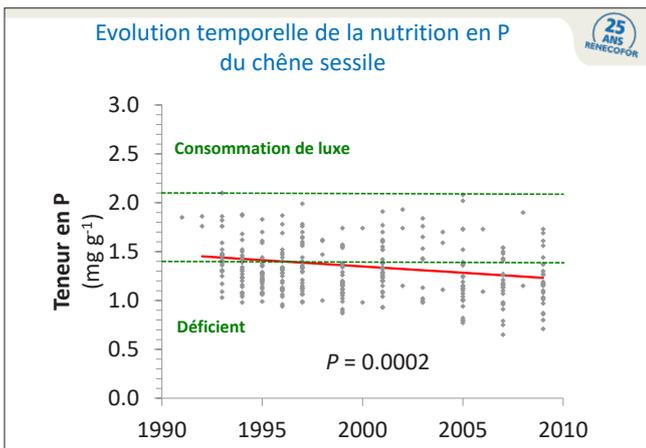
Diminution des teneurs (concentrations), mais pas du contenu en nutriments, c'est-à-dire de la quantité de nutriments contenus dans les feuilles, qui n'a pas évolué ou qui a légèrement augmenté. Mais cette augmentation de la quantité de nutriments n'a pas suffi à compenser l'augmentation de la masse foliaire, ce qui fait qu'on a quand même une diminution des teneurs par effet de dilution.

Alors que l'explication marche très bien pour le hêtre, c'est moins clair pour le chêne sessile : on observe une diminution systématique des teneurs foliaires alors qu'a priori il n'y a pas d'évolution de la masse foliaire. Pour le pédonculé, c'est le contraire : on voit une légère tendance au niveau de la masse foliaire mais pas au niveau des teneurs foliaires.



L'évolution du phosphore est celle qui me semble la plus préoccupante. Je vous montre ici le cas du chêne sessile, dont plus de 70% des placettes sont en carence pour le phosphore, avec en parallèle une diminution assez claire de la concentration et aussi du contenu en nutriments.

Autre manière de voir l'évolution de la teneur en phosphore au cours du temps, toujours pour le chêne sessile : on était en moyenne au niveau du seuil de carence au début de la période d'observation et petit à petit, on passe au-dessous de ce seuil de carence. Cela ne paraît pas très spectaculaire, mais pour le laps de temps considéré, au regard du cycle de vie d'un arbre, c'est une évolution assez significative.



Plus inquiétant encore, ces évolutions à la baisse sont d'autant plus prononcées que le statut nutritionnel en phosphore est bas. On a ici en abscisse la teneur foliaire moyenne en phosphore sur la période 1992-2009, pour chaque placette de chêne sessile : plus elle est basse, plus l'évolution relative (exprimée ici pour 10 ans) est négative.

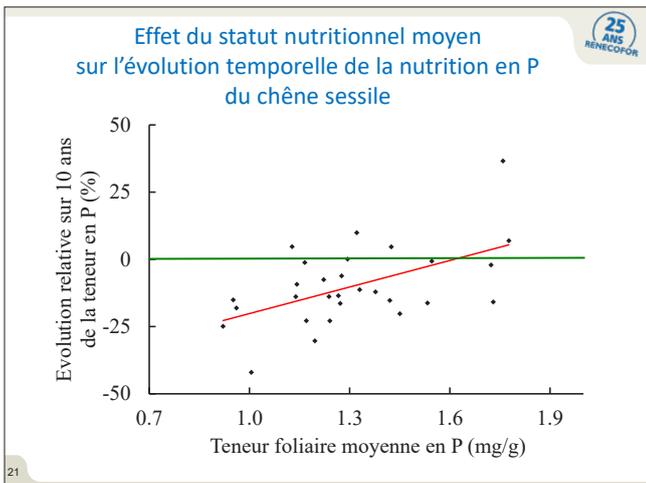
## En conclusion

On voit une détérioration assez nette de la nutrition foliaire entre 1992 et 2009, et il y a différentes hypothèses (je ne les ai pas toutes présentées) pour expliquer cette détérioration :

- une offre du sol qui ne suffirait pas à satisfaire la demande accrue en nutriments, liée à une augmentation de la productivité ;
- peut-être une diminution de la capacité de prélèvement des arbres du fait d'une moindre allocation de carbone aux fines racines, aux mycorhizes, suite à une nutrition azotée trop bonne (cette hypothèse ne vaut que pour les feuillus, en lien avec les dépôts d'azote) ;
- la diminution des dépôts soufrés ; ça vaut bien sûr pour les teneurs en soufre, mais la diminution de ces dépôts pourrait avoir induit aussi des effets sur la teneur en phosphore via le sol. Il se pourrait qu'il y ait eu une modification des équilibres entre le sulfate et le phosphate sur le complexe d'échange anionique du sol.

Ces contraintes nutritionnelles qui semblent augmenter avec le temps vont certainement avoir un effet sur la réponse des écosystèmes forestiers aux changements globaux et notamment sur la séquestration du carbone. C'est pourquoi je pense qu'il est très important d'essayer de les intégrer dans les modèles globaux du cycle du carbone et du climat, sinon on risque de surestimer la capacité de séquestration des forêts.

Tous ces résultats soulignent une fois encore l'importance du suivi à long terme. Si on pouvait continuer ce suivi sur une révolution voire plusieurs ça permettrait d'avoir des résultats encore plus intéressants.



### Conclusions & perspectives

#### Détérioration de la nutrition foliaire entre 1992 et 2009

- Offre du sol insuffisante pour satisfaire la demande en nutriments (↗ demande ⇒ ↗ productivité)
- ↘ capacité de prélèvement (fines racines, mycorhizes) ⇒ dépôts d'N élevés
- ↘ dépôts d'S

⇒ réponse des écosystèmes forestiers aux chgts globaux : séquestration du C

⇒ nécessité de prendre en compte les contraintes nutritionnelles dans les modèles globaux du cycle du C et du climat

⇒ importance du suivi à long-terme des écosystèmes forestiers

25 ANS RENECOFOR

Je vous remercie et je profite de l'occasion pour remercier les membres du panel d'experts du PIC Forêts sur les feuilles et les litières, qui ont tous contribué de manière directe ou indirecte à cette étude.

