

Avancées récentes dans le domaine de la physique et physico-chimie des sols.

« *Circulation et immobilisation de l'eau et des nutriments dans le sol et la végétation : utilisation de traceurs* »

Atelier Regefor, 10-12 juin 2013

POSZWA Anne¹, LEGOUT Arnaud², LACLAU Jean-Paul³, VENNETIER Michel⁴, DERRIEN Delphine², ACHAT David⁵, RANGER Jacques²

¹ Université Lorraine, Labo. Interdisciplinaire Écosystèmes Continentaux

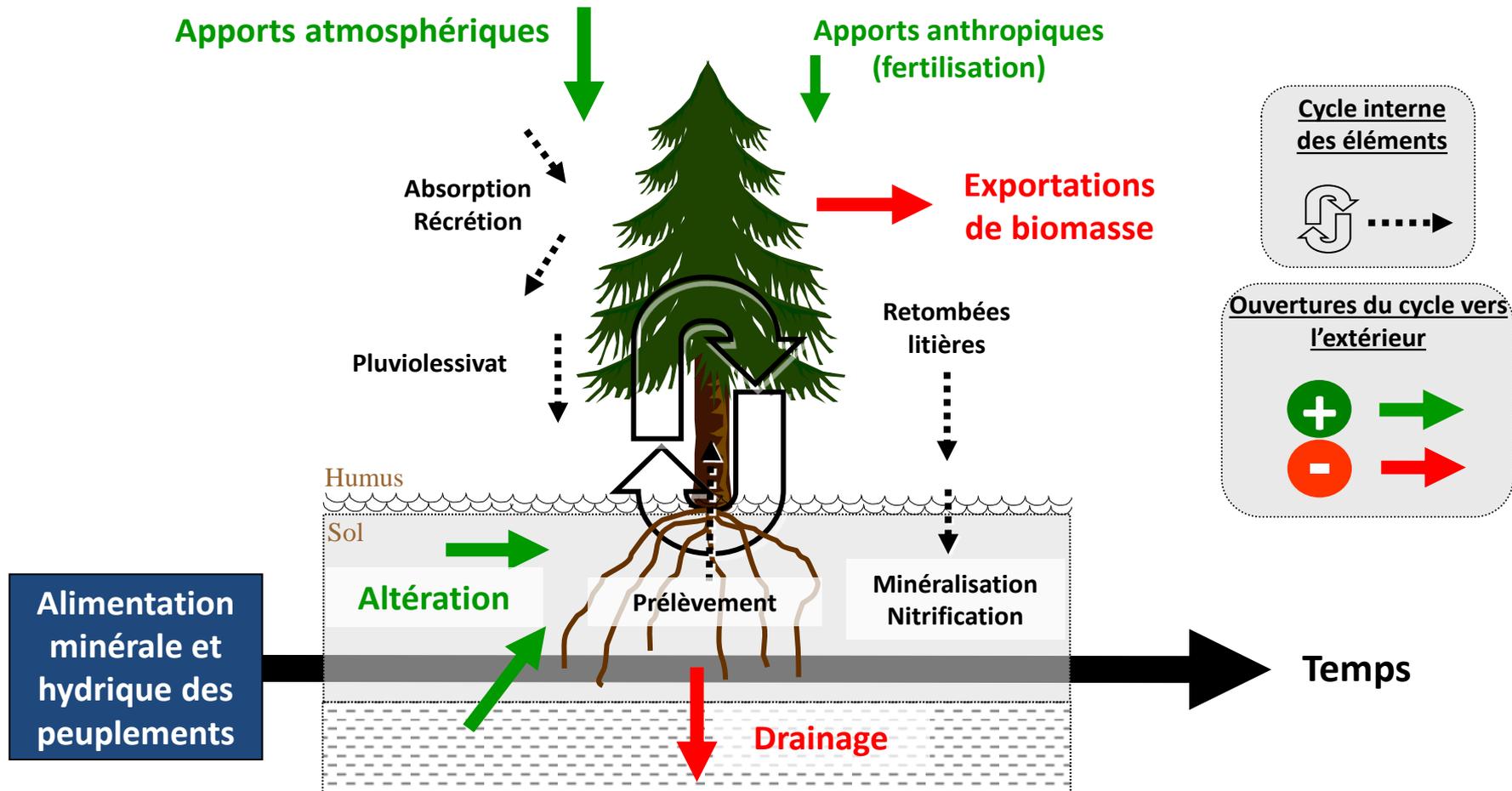
² INRA Nancy, Unité Biogéochimie Ecosystèmes forestiers

³ CIRAD Montpellier, UMR Ecologie fonctionnelle & biogéochimie des sols

⁴ IRSTEA Aix en Provence, Unité Ecosystèmes méditerranéens et risques

⁵ INRA Bordeaux UMR Transfert sol-plante et Cycle des Eléments Minéraux

■ Contexte : le sol, lieu de stockage, de circulation, d'interactions...



=> Nécessité de comprendre la circulation et le stockage des éléments dans l'écosystème (eau, éléments majeurs et traces)

=> Etude des **cycles biogéochimiques** pour comprendre et prédire les réactions des écosystèmes et des sols aux changements (climatiques, sylviculture, dépôts...).

■ Contexte : de nombreuses questions en suspens

- Apports atmosphériques

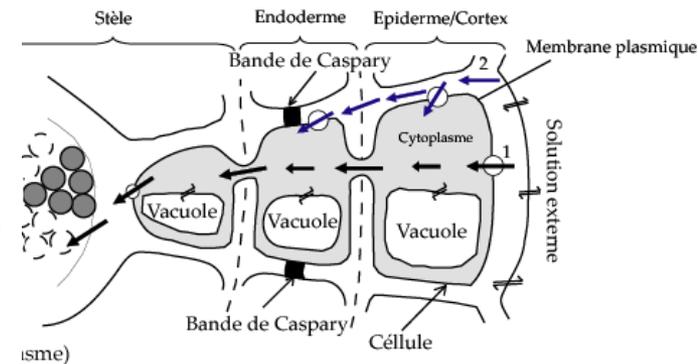
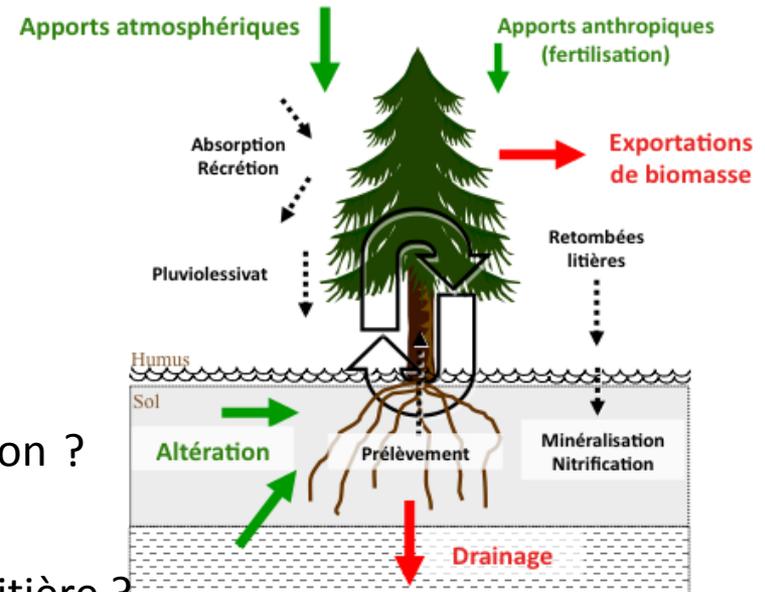
- Contribution dépôts secs ?
- Processus d'absorption- récréation ?

- Processus dans le sol

- Acteurs et processus impliqués dans l'altération ? Dans la dégradation de la litière ?
- Flux de nutriments issus des minéraux ? de la litière ?
- Sources, circulation et stockage de l'eau et des nutriments dans les sols ?
- Quelle disponibilité?

- Processus liés à l'arbres

- Prélèvement racinaire (profondeur, saisonnalité...) ?
- Transferts et immobilisation dans les tissus ?



L'utilisation de traceurs peut venir en appui aux approches conventionnelles

■ Contexte : de nouveaux outils à disposition

- Il existe des traceurs de nombreux éléments d'intérêt

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

- Analogues chimiques
- Abondance isotopes stables

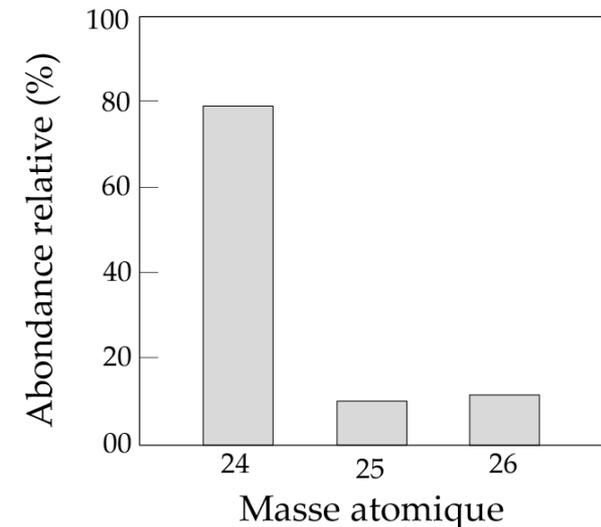


Variations naturelles
marquage

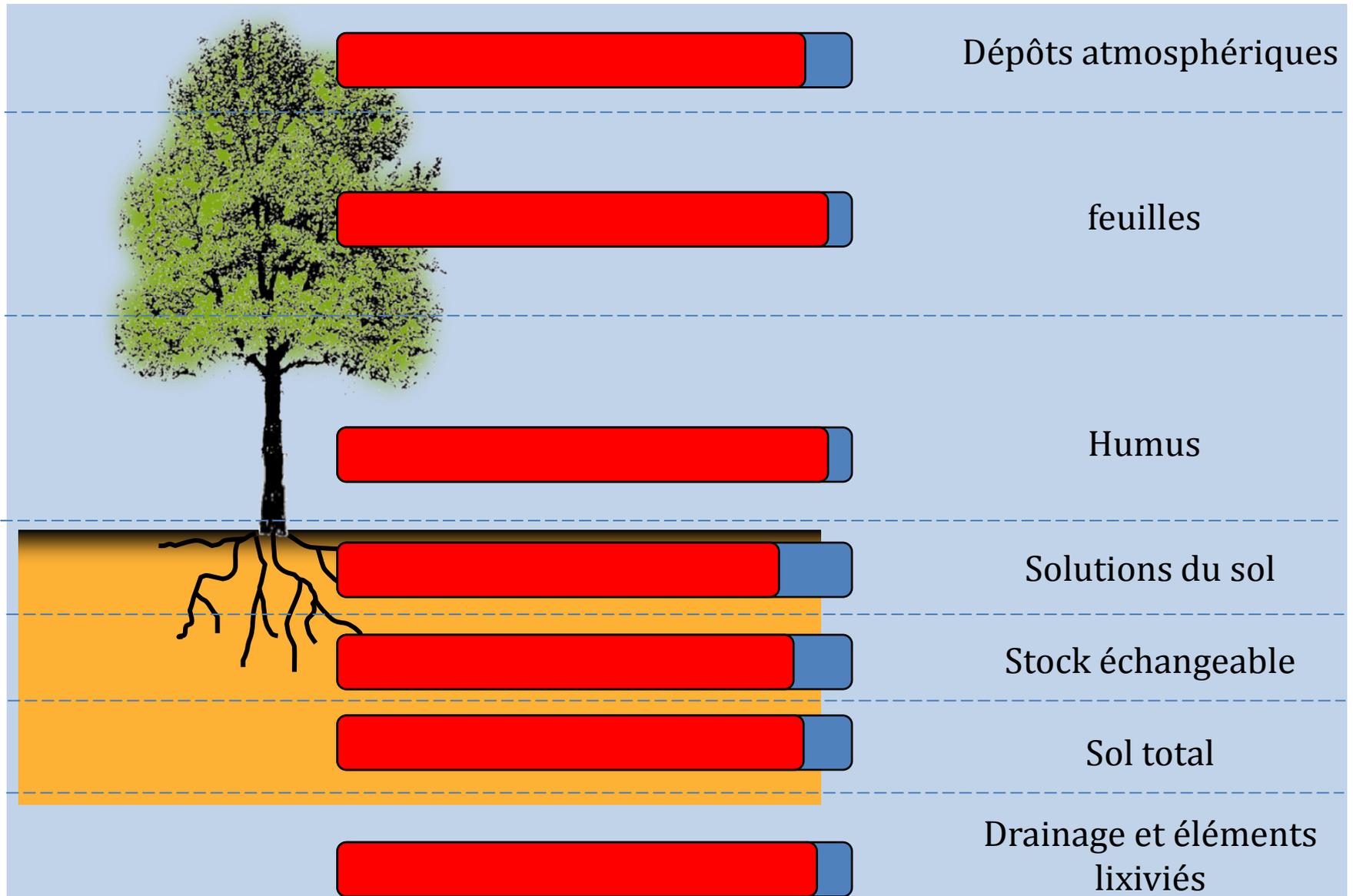
- Qu'est ce qu'un isotope ?

Atomes d'un même élément avec même nombre de protons mais nombre de neutrons différent.

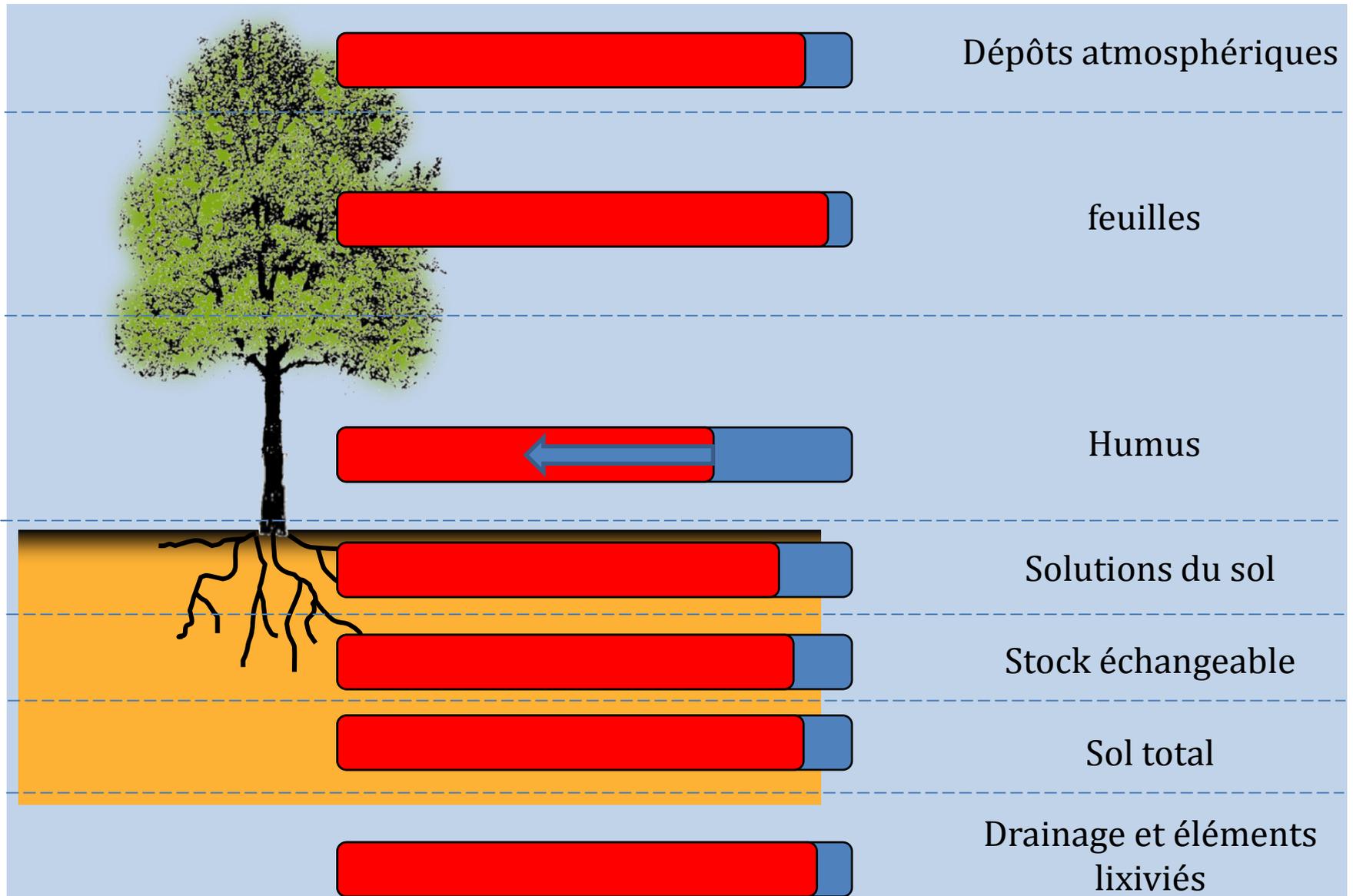
ex. Magnesium ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg



■ Intérêt de l'approche : variations naturelles entre compartiments

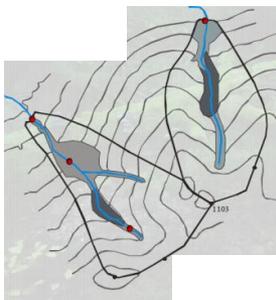


■ Intérêt de l'approche : marquage d'un compartiment



Résultats : circulation des éléments entre les sols, les eaux et les arbres

Où est l'amendement 9 ans après apport sur un petit BV forestier vosgien ?



Site de Cornimont

- **Roche mère** : granite
- **Peuplement** : hêtre – sapin
- **2 BV** : 1 témoin, 1 amendé
- **Superficie** : 124 ha/BV

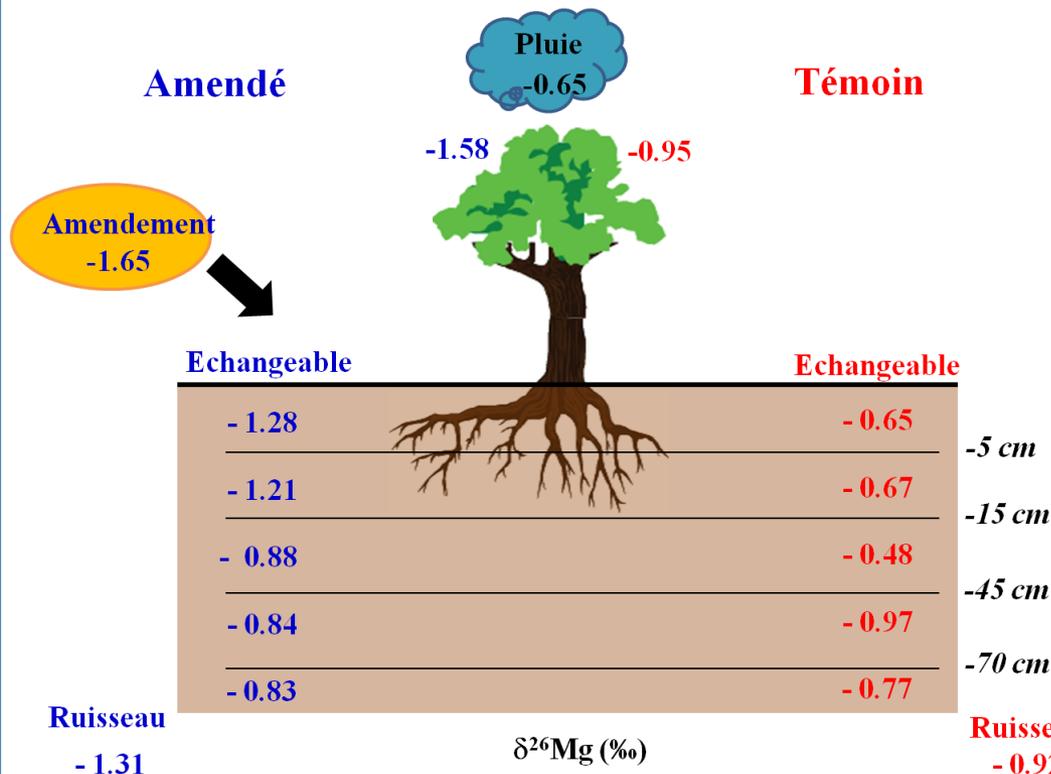
Isotopes naturels du Mg

H																				He					
Li	Be																			B	C	N	O	F	Ne
	Mg																			Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								

Amendé

Témoin

$\delta^{26}\text{Mg}$, 9 ans après l'apport d'amendement :



- Le transfert de l'amendement dans le sol est lent.

- L'amendement a été intégré au cycle biologique.

- L'amendement contribue à la signature du ruisseau à l'exutoire du BV.

Résultats : circulation des éléments entre les sols, les eaux et les arbres

Cycles de Ca et Mg sur les sols lorrains sensibles aux contraintes mécaniques

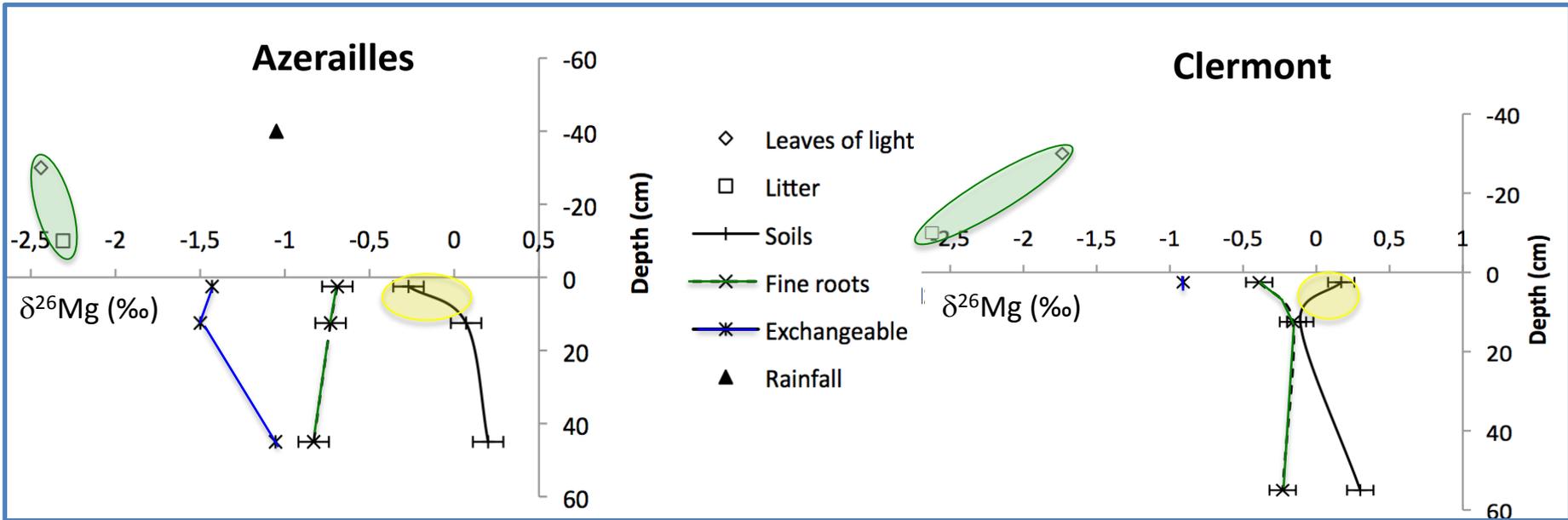
Sites de Azerailles (54) et Clermont en Argonne (55)

- Marne et alluvions / Gaize
- **Peuplement** : hêtre – chêne
- **sols** : Limoneux sur argiles



Isotopes naturels du Mg, Sr et Ca

H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar	
Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				



$\Delta^{26}\text{Mg}$ feuilles litières Clermont > Azerailles

=> processus de retranslocation important du Mg à Clermont : disponibilité moindre ?

■ Résultats : circulation des éléments entre les sols, les eaux et les arbres

Multitraçage isotopique in situ pour étudier des cycles de N, Ca et Mg (Breuil, 58)

Site de Breuil



- **Altitude:** 650 m
- **Climat :** continental
- **Sol :** Alocrisol
- **Roche mère :** granite
- **Peuplement :** hêtre 35ans

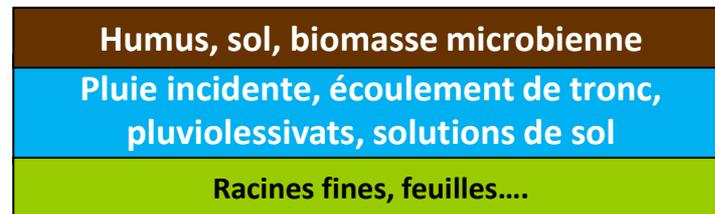
Multitraçage ^2H , ^{15}N , ^{26}Mg et ^{44}Ca

H																	He			
Li	Be															N	O	F	Ne	
Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			

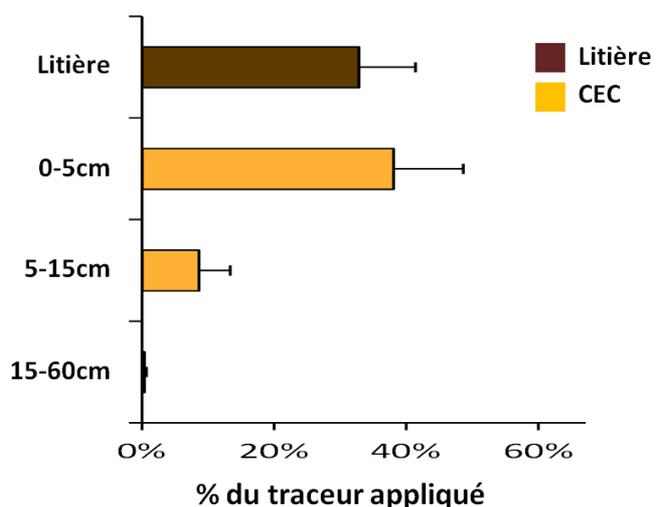
Solution enrichie apportée à la surface du sol en Avril 2010



Monitoring in situ et mesure des ratios isotopiques $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ et $^{44}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ (ICP-MS)



^{44}Ca 2 ans après l'apport



- Cycles Mg et Ca très conservatifs et très lents
- Rétention forte du Mg et du Ca dans l'humus et dans les sols (rôle important de la MO)



■ Résultats : profondeur de prélèvement de l'eau

Origine et âge de l'eau dans en forêt méditerranéenne ?

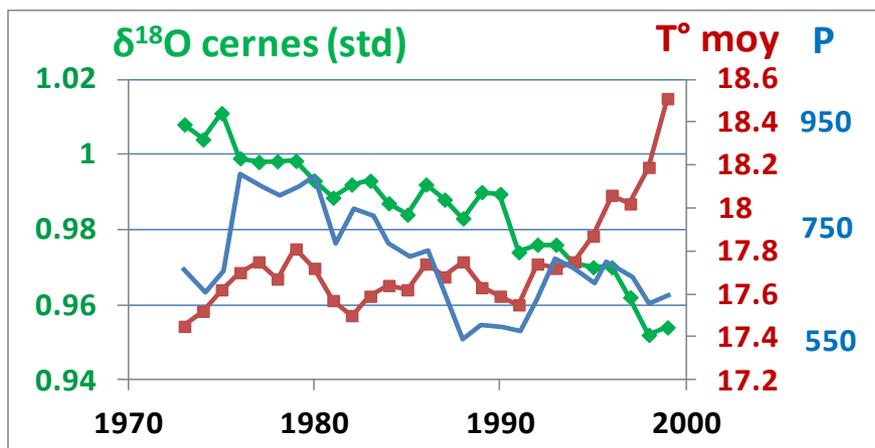
Site de Chypre

Pins d'Alep

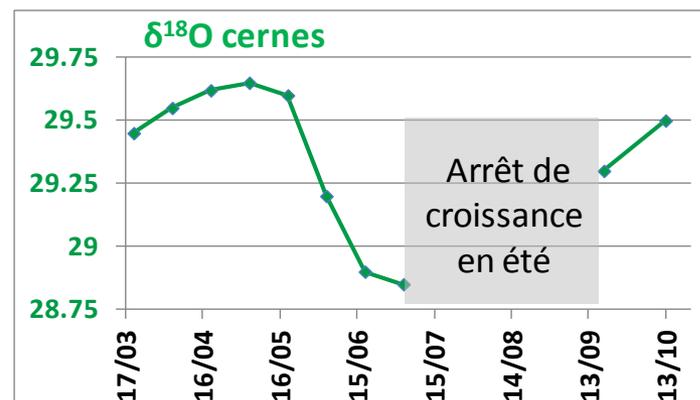
Variations naturelle $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

=> varie comme la t° ... et augmente avec l'évaporation

$\delta^{18}\text{O}$ dans les cernes et le sol : long terme



Dissection cerne : variation interannuelle



Chaque segment correspond à 10% de croissance

Corrélation pluies / largeur de cernes

	Printemps	Été	Automne	Hiver	sept-août	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	6 ans
France	0.70	0.40	NS	NS	0.54	NS	NS	NS	NS	NS
Chypre	0.40	NS	NS	0.41	0.58	0.74	0.74	0.78	0.78	0.77

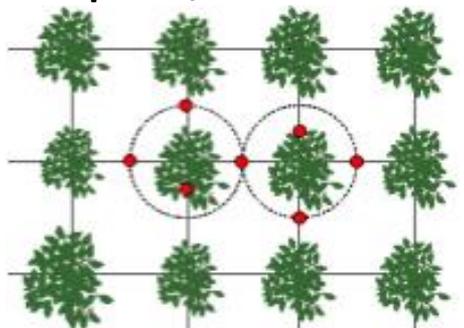
=> Avec l'aridification, les arbres dépendent de pluies de plus en plus anciennes et donc d'eau de plus en plus profonde (enracinements de 6 à 15 m)

■ Résultats : profondeur de prélèvement minéral

Etude de la fonctionnalité des racines avec la profondeur

Site au Brésil
Eucalyptus grandis
 Ferralsols
 * sableux
 * argileux

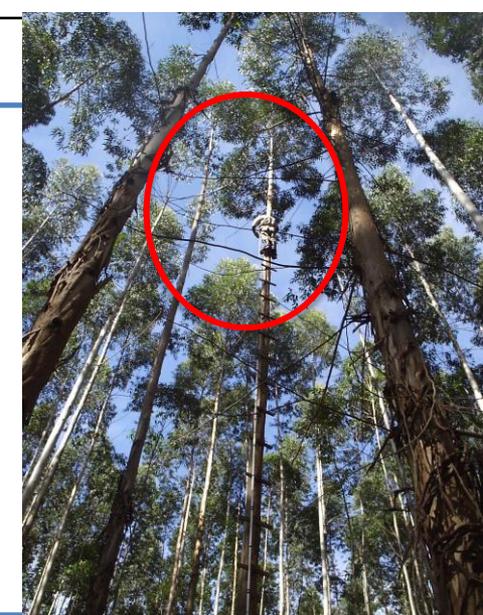
Marquage solutions par Sr, Rb et ^{15}N



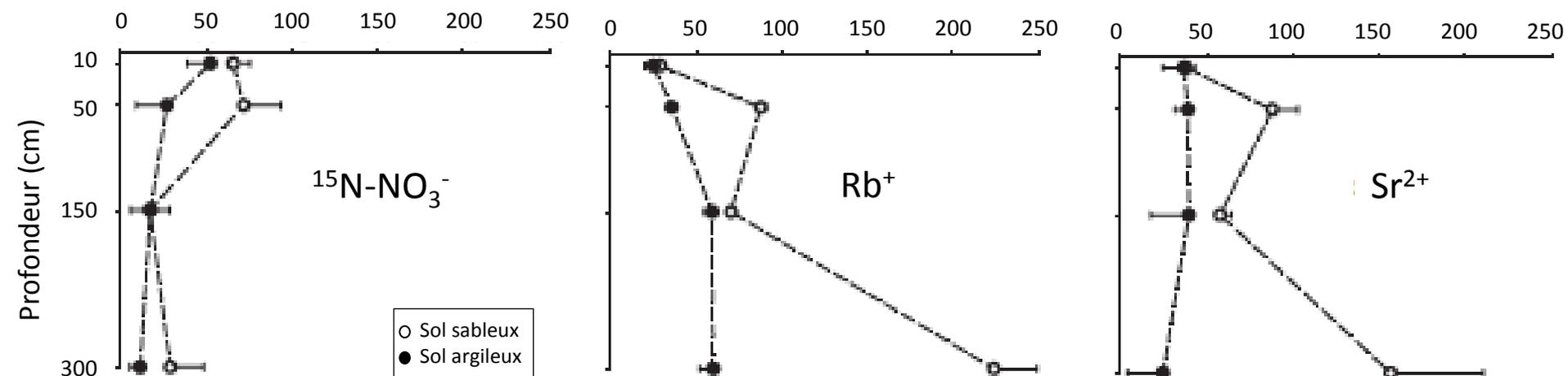
3 réplicats/sol/prof.



10, 50, 150, 300 cm

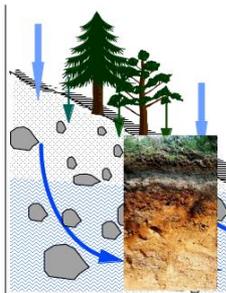


Activité racinaire spécifique potentielle 70 jours après application (% $\text{cm}^{-1} \text{cm}^3$)



Résultats : profondeur de prélèvement et processus

Cycles de Ca et Sr dans des peuplements mélangés au Nord de la Suède



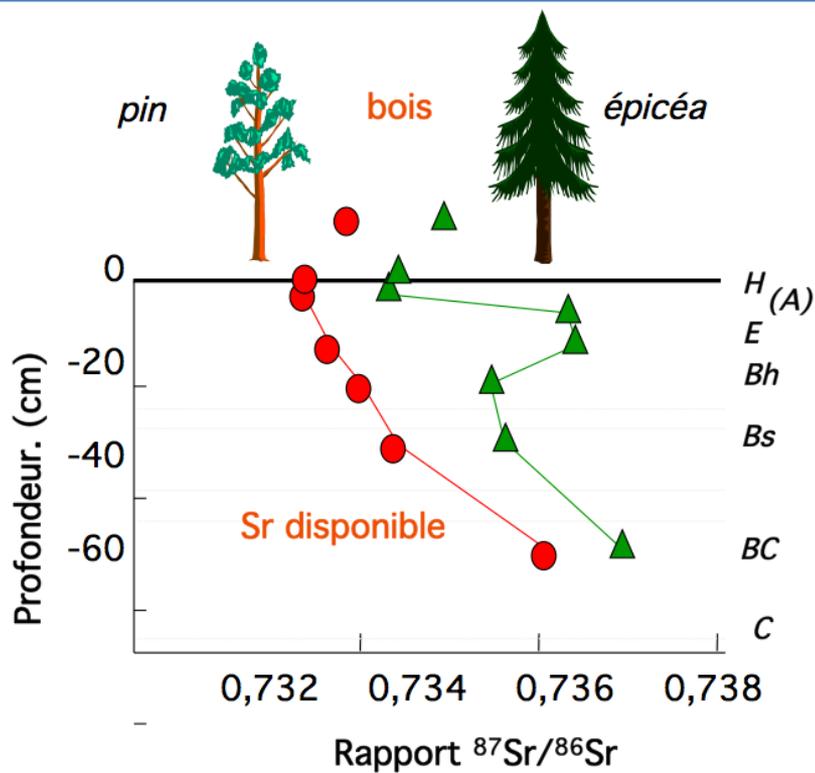
BV Svartberget (Suède)

- **Roche mère** : gneiss 1,9 GA
- **Peuplement** : pin / épicés
- **Sols** : podzols



Isotopes naturels du Sr

H																				He					
Li	Be																			B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																			Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								



- Cycle biologique plus marqué sous épicéas

- Altération minérale spécifique plus intense sous épicéa

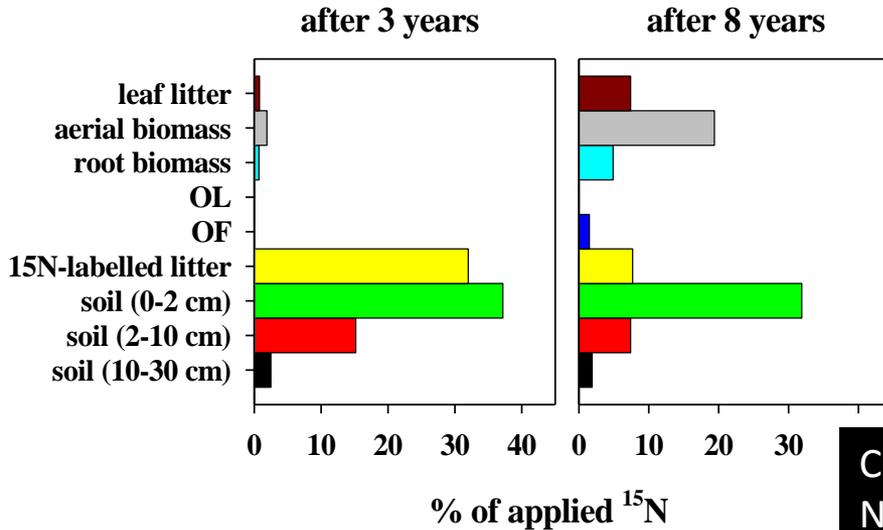
- Profondeur moyenne de prélèvement superficielle, celle des pins étant supérieure à celle des épicéas

■ Résultats : processus dans les sols

Devenir de l'azote issu de la décomposition des litières

Site d'Ebrach
(Allemagne)

Feuilles marquées au ^{15}N apportées comme litière



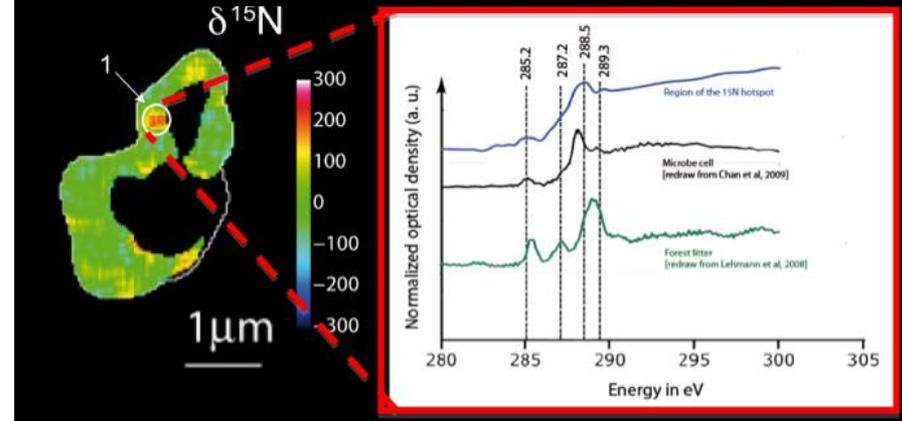
- après 3 ans, le ^{15}N est transféré dans les premiers cm du sol

- après 8 ans, une partie du traceur est restituée au sol après avoir été absorbée et transférée dans les feuilles

Après 12 ans, le ^{15}N est retrouvé dans des composés microbiens à la surface de microagrégats

=> stabilisation des MO

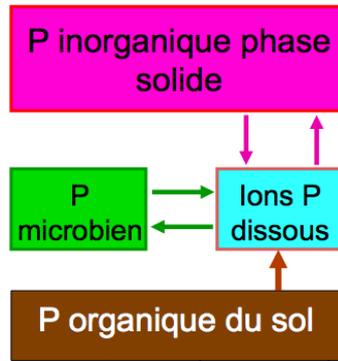
Combinaison des imageries NanoSIMS / STXM-NEXAFS sur une particule de sol



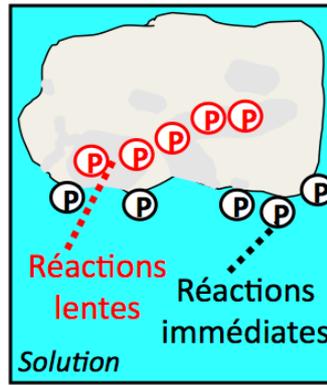
■ Résultats : processus dans les sols

Quantification des processus de disponibilité du P dans les sols forestiers landais

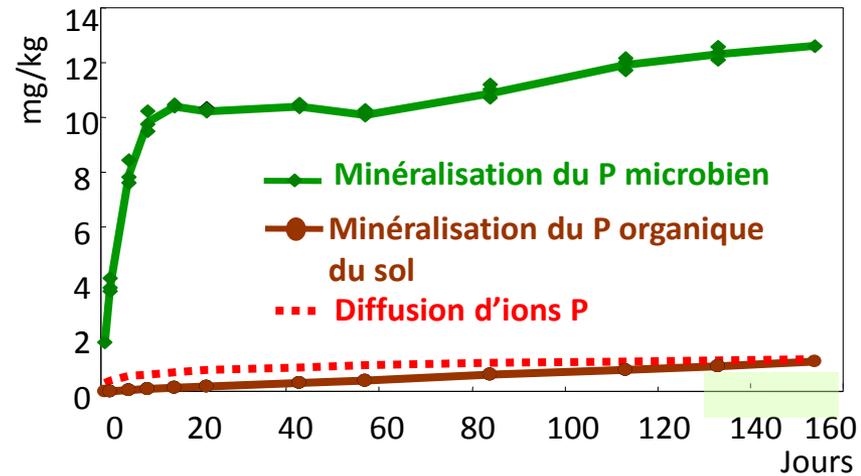
Étude interface solide-solution-microorganismes)



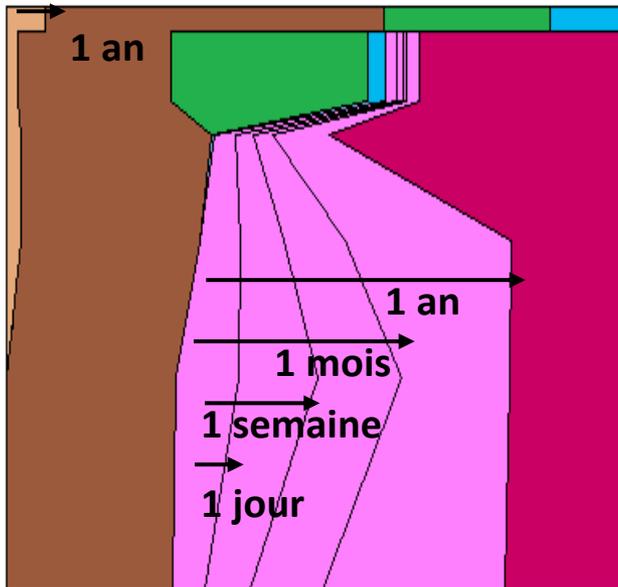
Batch + marquage ^{32}P / Ions P diffusibles



Incubation + marquage ^{33}P / flux de minéralisation (ex. sol minéral de surface)

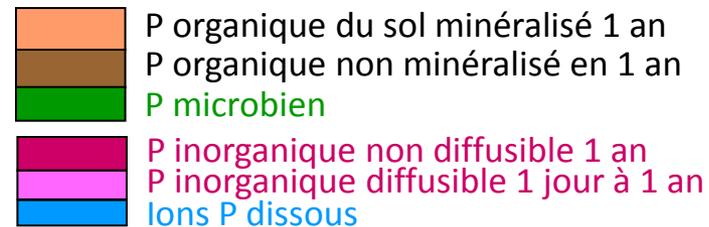


0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 % du P total



Intégration des résultats :

Importance relative des différents processus



■ Résultats : effets de la substitution de nutriments

Est-il possible de réduire les applications de KCl en apportant du NaCl ?

Site au Brésil

Eucalyptus grandis

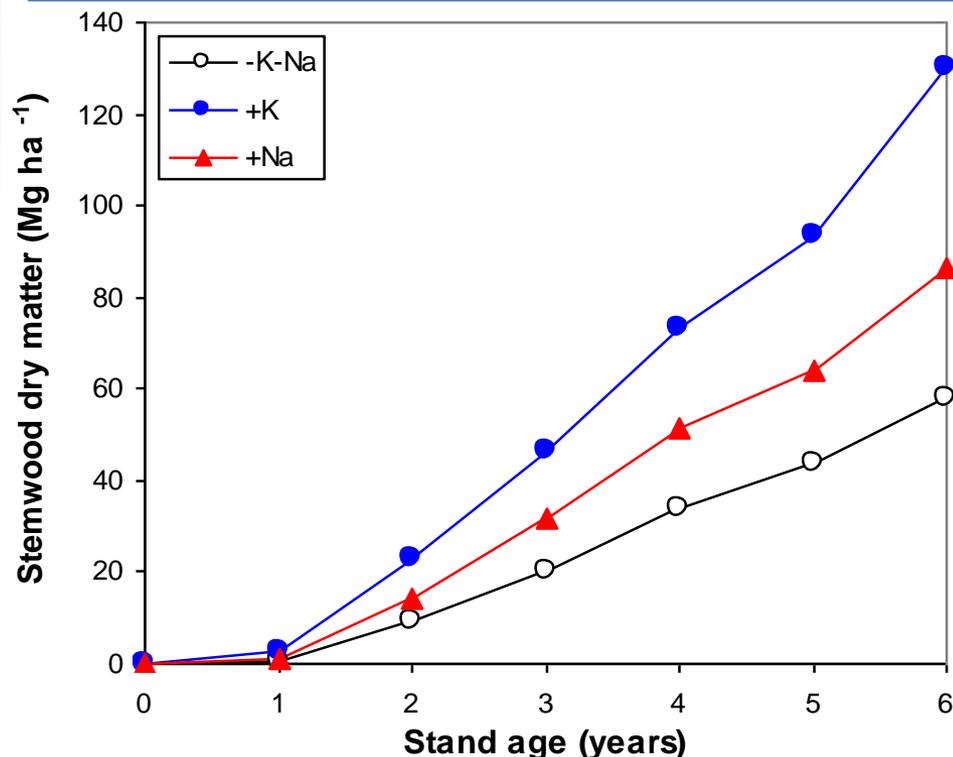
Ferralsols

Apports

- KCl ou K_2SO_4
- NaCl
- Témoin sans K ni Na

Suivi

- Diamètre, hauteur,
- Biomasse / minéralomasse,
- Chutes de litière,
- Respiration du sol



A l'âge d'exploitation (6 ans) :

- Biomasse de bois x 1,5 avec apport de NaCl;
 - Biomasse de bois x 2,2 avec apport de KCl.
- Première fois qu'une réponse positive à l'apport de NaCl a été montrée en forêt;
 - Coût du NaCl \approx 15% du coût du KCl;
 - Na permet d'accomplir les fonctions osmotiques du K dans les feuilles.
 - D'autres fonctions du K sont perturbées avec apport de Na.
 - Une fertilisation mélangeant KCl et NaCl semble prometteuse;

■ Conclusion

-Traceurs : **approche puissante**

- * Pour estimer des sources, mettre en évidence des transferts, identifier des processus...
- * Pour travailler à différentes échelles (BV, placette, profil, agrégat...)

- Besoin de combiner différentes approches pour étudier les écosystèmes naturels

Sites d'étude	Sites ateliers instrumentés = outil puissant Suivis à long terme
Objet d'étude	Tous les compartiments de l'écosystème peuvent être étudiés : Sol (organique et minéral), Solutions, Végétation, microorganismes, animaux.
Approches complémentaires	Ex situ / in situ Méthodes conventionnelles / approches isotopiques Isotopie naturelle / marquage