

LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DES SOLS FORESTIERS : QUELLES AVANCÉES ?

APPROCHE ISOTOPIQUE POUR TRACER LA DYNAMIQUE DE L'EAU ET DES NUTRIMENTS DANS LES SOLS FORESTIERS

ANNE POSZWA – ARNAUD LEGOUT – JEAN-PAUL LACLAU – MICHEL VENNETIER –
PIERRE-JOSEPH HATTON – DAVID LUDOVICK ACHAT – LÉA BEDEL – JACQUES RANGER

Les écosystèmes forestiers sont généralement adaptés à des milieux peu favorables, mais ils doivent faire face à des contraintes de plus en plus fortes, notamment le changement climatique et dans certaines régions, le prélèvement accru de biomasse. La fertilité chimique des sols forestiers est traditionnellement estimée par la mesure des stocks d'éléments nutritifs ou d'eau dans les différents horizons et celle des flux internes, entrants ou sortants de l'écosystème (Legout *et al.*, 2014). Le fonctionnement des écosystèmes forestiers étant caractérisé par des interactions fortes et variables au cours du temps entre facteurs physiques, chimiques et biologiques, le concept même de fertilité est complexe à définir. En effet, le suivi *in situ* de différents compartiments de l'écosystème permet d'accéder à des flux nets qui constituent bien souvent une boîte noire. Cette « boîte » est alimentée par des flux d'entrées (différentes sources) et soumise à des flux de sorties (puits) que les méthodes conventionnelles ne permettent ni de distinguer ni d'expliquer.

De nombreuses questions de recherche restent ainsi en suspens :

- quelle est la contribution des dépôts atmosphériques ? (dépôts humides et secs, absorption foliaire directe) ;
- comment mieux comprendre les processus d'altération des minéraux et de dégradation des matières organiques des sols ? quels sont les organismes impliqués ? quelles sont les sources ? quels sont les flux ? quelle part est stockée dans le sol sous une forme disponible ?
- quelle est la contribution des processus liés à l'arbre ? (localisation spatiale et temporelle du prélèvement racinaire ? transfert et immobilisation dans les tissus ?...).

Ainsi, le rôle des cycles biogéochimiques dans le fonctionnement de ces écosystèmes, dans la fertilité des sols, dans leur capacité à répondre à certaines contraintes (naturelles et anthropiques) et dans leur capacité à maintenir ou restaurer leur qualité, reste encore très imparfaitement connu. La compréhension de la dynamique de l'eau et des nutriments dans et entre les différents compartiments de l'écosystème doit être améliorée. Parmi les méthodes d'étude des cycles biogéochimiques, une approche innovante, complémentaire des études plus conventionnelles, qui restent nécessaires, consiste à utiliser des traceurs géochimiques ou isotopiques. Le développement récent de techniques analytiques très performantes et la diversification de l'offre de ces traceurs conduisent à une utilisation accrue de ces outils. Mis en œuvre dans les études environnementales, ils permettent de suivre le cheminement d'éléments spécifiques ou de groupes d'éléments dans l'écosystème et d'identifier des sources alimentant le compartiment échangeable des sols, les eaux et les êtres vivants. Certains traceurs isotopiques, notamment les isotopes d'éléments légers (exemple : azote ¹⁵N, carbone ¹³C), aident à identifier certains processus physicochimiques ou biologiques.

Après une présentation générale des approches méthodologiques mises en œuvre dans ce domaine, nous présenterons quelques résultats d'études récentes consacrées à une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes forestiers afin d'illustrer l'intérêt de cette approche, qui complète les connaissances sur la biodisponibilité de l'eau et des éléments, la fertilité des sols ainsi que la nutrition minérale et hydrique des arbres.

ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES

Définition et principe de la méthode utilisant des traceurs isotopiques

Chaque élément chimique a plusieurs isotopes, possédant le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons dans le noyau. Les isotopes d'un élément donné ont des propriétés chimiques pratiquement identiques. Par contre, leurs masses et leurs propriétés nucléaires peuvent être différentes : en particulier certains peuvent être radioactifs alors que d'autres sont stables.

Les isotopes radioactifs sont utilisés depuis longtemps en datation des milieux continentaux, avec des applications dans les études pédologiques (^{14}C), pour estimer l'âge de sols et de sédiments quaternaires. Des isotopes radioactifs comme le ^{32}P ou le ^{33}P sont utilisés en laboratoire afin de déterminer les quantités d'éléments potentiellement disponibles dans les sols. Les isotopes stables peuvent être utilisés comme traceurs de sources ou de processus. Le tableau I (p.453) illustre les isotopes stables des éléments qui ont été utilisés dans les travaux discutés ci-dessous, leur abondance et les amplitudes des variations isotopiques naturelles connues actuellement.

Les isotopes stables : traceurs de sources ou de processus

Pour qu'un système isotopique soit un bon traceur de sources, celles-ci doivent avoir des compositions chimiques ou isotopiques très distinctes. Ainsi, la contribution de chaque source au mélange pourra être quantifiée dans les réservoirs. Par ailleurs, leur composition isotopique ne doit pas être modifiée lors de réactions bio-physicochimiques. Le strontium (Sr) est largement utilisé à cet égard pour étudier les processus à la surface de la terre, tels que l'altération des minéraux, la formation des sols, l'origine des cations et leur mobilité.

Certains traceurs, notamment les isotopes d'éléments légers (ex. : azote ^{15}N , carbone ^{13}C , magnésium ^{24}Mg , calcium ^{44}Ca , oxygène ^{18}O), subissent un fractionnement lors de réactions physicochimiques ou biologiques. L'un des isotopes, du fait de sa masse plus lourde ou plus légère, va être préférentiellement impliqué dans la réaction : la composition isotopique du produit issu de la réaction sera différente de celle du substrat de départ. Ces traceurs permettent de mettre en évidence des processus (prélèvements, translocations), des réactions chimiques, des interactions entre éléments, ou encore la dynamique de certains éléments.

Détermination de la composition isotopique d'un échantillon naturel

Les méthodes d'analyse ne seront pas développées en détail ici car chaque système isotopique implique un protocole spécifique⁽¹⁾. Cette approche nécessite toujours des déterminations très précises pour identifier des variations isotopiques très faibles entre les compartiments sols, eaux, arbres (tableau I, p.453).

(1) Pour quelques isotopes, consulter : http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-32_fr_web.pdf (pp. 107-136) ou <http://stableisotopefacility.ucdavis.edu/>.

TABLEAU I **Abondance des isotopes de quelques éléments couramment utilisés comme traceurs dans les études environnementales, rapports isotopiques recherchés (notation δ en référence à des standards internationaux spécifiques à chaque élément), et amplitudes de variations isotopiques naturelles connues à l'heure actuelle dans l'environnement**

Élément	Isotope léger		Isotope lourd		Composition isotopique	Amplitude (‰)
	Symbole	Abondance (%)	Symbole	Abondance (%)		
Carbone	¹² C	98,89	¹³ C	1,11	$\delta^{13}\text{C}$	
Azote	¹⁴ N	99,63	¹⁵ N	0,37	$\delta^{15}\text{N}$	
Hydrogène	¹ H	99,98	² H	0,01	$\delta^2\text{H}$	
Oxygène	¹⁶ O	99,76	¹⁸ O	0,2	$\delta^{18}\text{O}$	
Magnésium	²⁴ Mg	78,7	²⁶ Mg	11,17	$\delta^{26}\text{Mg}$	5
			²⁵ Mg	10,13	$\delta^{25}\text{Mg}$	
Calcium	⁴⁰ Ca	96,97	⁴⁴ Ca	2,06	$\delta^{44}\text{Ca}$	5
			⁴² Ca	0,64		
			⁴³ Ca	0,145		
			⁴⁶ Ca	33×10^{-4}		
			⁴⁸ Ca	0,18		
Strontium	⁸⁶ Sr	9,86	⁸⁷ Sr	7,02	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
			⁸⁵ Sr	0,56		
			⁸⁸ Sr	82,56		

La première étape consiste à échantillonner les différents compartiments de manière adéquate et représentative⁽²⁾. S'il s'agit de solides (sol, végétal), les échantillons doivent ensuite être minéralisés, puis purifiés afin de collecter les différents isotopes en phase gazeuse (cas des isotopes de C par exemple) ou liquide (cas des isotopes de Mg ou Ca par exemple).

Les liquides sont traités sur des résines échangeuses d'ions spécifiques, pour isoler l'élément dont on veut connaître la composition isotopique. Celle-ci est mesurée par spectrométrie de masse. Le principe consiste à détecter puis séparer les éléments selon leur masse et leur charge.

Une autre approche consiste à apporter une quantité connue de traceur(s) en excès dans un compartiment : cette méthode est dite « par enrichissement ». Elle permet de créer un fort gradient de composition isotopique, facilitant le suivi de la cinétique de transfert des éléments dans l'écosystème. Ces marquages peuvent se faire *in situ* ou *in vitro* pour étudier finement des processus. L'enrichissement ne nécessite pas une précision analytique aussi importante qu'en isotopie naturelle, au moins en phase initiale, mais la dilution liée à la redistribution sur le long terme dans l'écosystème nécessite des déterminations sophistiquées. De plus, le coût souvent élevé de l'enrichissement le cantonne à des systèmes expérimentaux élaborés.

(2) Pour des échantillons d'eau, consulter : http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-32_fr_web.pdf (pp. 107-136).

DYNAMIQUE DES ÉLÉMENTS DANS LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

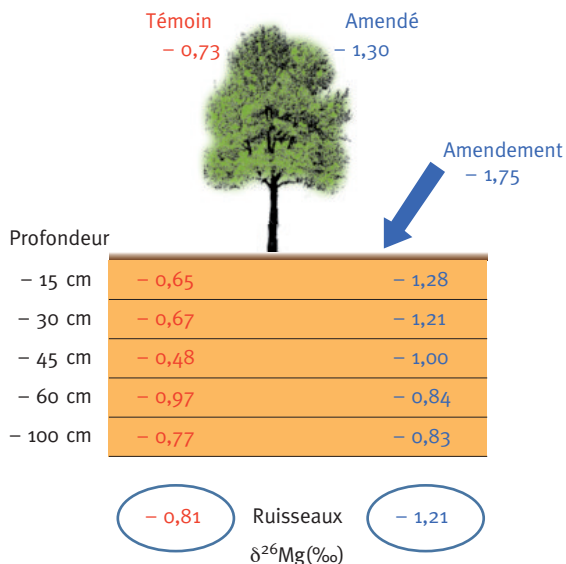
Acidification des sols et des eaux ; restauration possible par amendement

En 2003, des petits bassins versants forestiers (BVF) ont été amendés sur grès et granite dans les Vosges. Depuis cette date, l'évolution de la qualité des sols, des eaux, des peuplements, et des communautés animales, est suivie.

La figure 1 (ci-dessous) illustre quelques résultats obtenus dans le cadre de l'étude du cycle du Mg sur le BVF de Cornimont développé sur granite. Les variations isotopiques mesurées sur le BVF témoin ont permis d'identifier des processus clés occasionnant des fractionnements (Bolou-Bi *et al.*, soumis). Les produits d'amendement ont une signature isotopique très négative ($\delta^{26}\text{Mg}$ de $-1,75$ ‰) par rapport aux autres compartiments et sources de Mg. Sur le BVF amendé, les $\delta^{26}\text{Mg}$ très négatifs de certains compartiments, 7 ans après l'apport, prouvent que le produit est retrouvé sur le complexe d'échange des sols jusqu'à 45 cm de profondeur, dans les feuilles des arbres et également dans les eaux du ruisseau.

FIGURE 1

COMPOSITION ISOTOPIQUE EN Mg MESURÉE DANS LES SOLS, LES EAUX ET LES ARBRES (HÊTRES) DES BVF DE CORNIMONT, SUR GRANITE, 7 ANS APRÈS L'APPORT.
À gauche, BVF témoin, à droite BVF amendé (d'après Bolou-Bi *et al.*, soumis)



Les résultats corroborent les résultats des analyses « conventionnelles » qui ont montré une augmentation du pool échangeable dans les premiers horizons de sol, une augmentation des teneurs foliaires et des concentrations à l'exutoire du BVF. L'approche isotopique permet de démontrer que l'origine est bien le Mg provenant de la dissolution des produits d'amendement et non le déplacement de Mg ancien de l'écosystème.

Fonctionnement des sols sensibles aux tassements

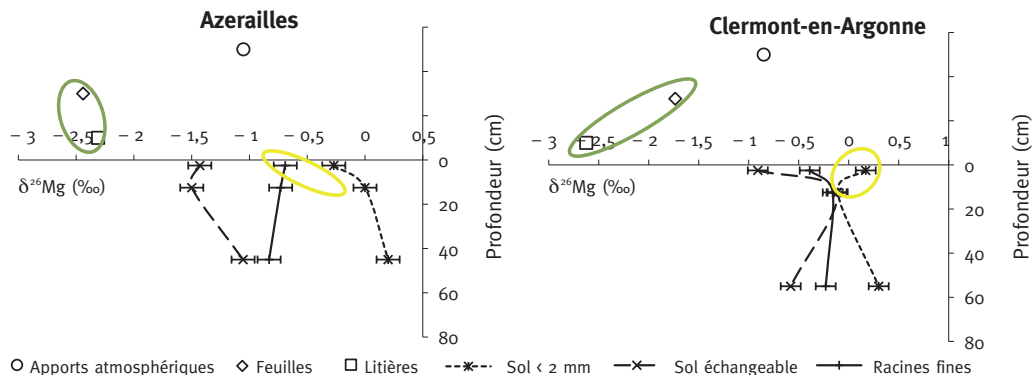
L'intensification de la sylviculture peut se traduire par une circulation accrue d'engins lourds, augmentant le risque de dégradation des sols sensibles à texture fine, abondants par exemple sur le Plateau lorrain. Les sols des deux sites expérimentaux lorrains (coopération INRA/ONF) sont analogues physiquement, avec des horizons limoneux reposant sur des horizons argileux. Ils sont tous deux riches en Ca et Mg en profondeur, mais les sols de Clermont-en-Argonne (Meuse) sont plus acides (pH < 4,5) en surface que ceux de Azerailles (Meurthe-et-Moselle) (pH > 4,5) (Ranger *et al.*, 2012).

Des analyses isotopiques ont été réalisées sur les différents compartiments, afin d'étudier les cycles de Ca et Mg, et de relier les propriétés chimiques des sols aux propriétés physiques, à la sensibilité des sols au tassement et à leur vitesse de restauration.

La figure 2 (ci-dessous) représente les variations isotopiques en Mg dans les sols et les végétaux. Dans les deux sites, il existe des variations similaires entre les compartiments, ce qui confirme l'existence de fractionnements significatifs dus à des processus biologiques ou physicochimiques. On note aussi un fractionnement isotopique entre les feuilles et les litières ($\delta^{26}\text{Mg}$ respectivement de $-1,7\text{‰}$ et $-2,6\text{‰}$) à Clermont-en-Argonne, suggérant une forte retranslocation de Mg avant leur chute qui résulterait de la faible disponibilité du Mg dans le sol.

L'approche multi-isotopes (Mg, Ca, Sr) en cours permettra d'estimer la fonctionnalité physique du système et son lien avec la fertilité, ainsi que l'impact des pratiques.

FIGURE 2 COMPOSITION ISOTOPIQUE EN Mg MESURÉE DANS LES SOLS, LES EAUX ET LES ARBRES DES SITES ATELIERS DE AZERAILLES (à gauche) ET DE CLERMONT-EN-ARGONNE (à droite)



Fonctionnement des écosystèmes forestiers sur roche acide

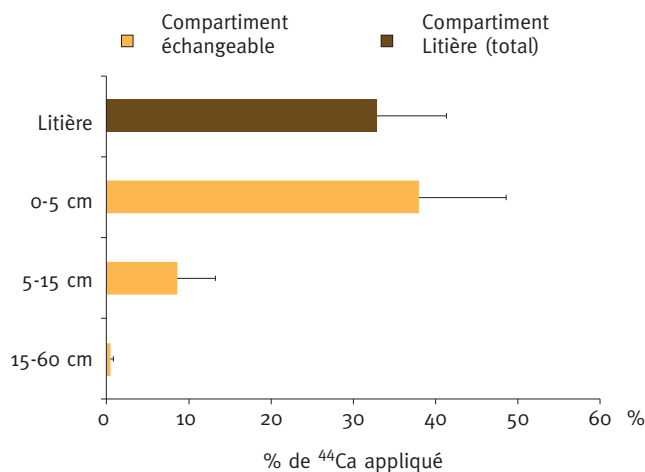
Pour mieux comprendre les cycles du calcium et du magnésium, une expérimentation de multi-traçage isotopique (^2H , ^{26}Mg , ^{44}Ca) a été conduite sur le site expérimental de la forêt de Breuil-Chenue (Nièvre), dans une plantation de Hêtre d'une trentaine d'années, sur un sol très pauvre en Ca et Mg. Les traceurs ont été apportés à la surface du sol en avril 2010 sous forme soluble et leur progression a ensuite été suivie dans l'écosystème.

La figure 3 (p.456) présente le transfert du traceur ^{44}Ca dans les sols. La rétention du Ca (et en moindre mesure du Mg) dans l'humus (couche OI) et dans les sols est forte, confirmant le rôle important de l'échangeur organique. L'utilisation de ces traceurs met en évidence la lenteur de la

redistribution de Mg et de Ca dans l'écosystème, de la litière vers les sols et des racines vers les canopées. Ce comportement est attribué en grande partie à l'affinité de ces ions pour les matières organiques. Ces travaux (Van der Heijden, 2013) ont confirmé le caractère très conservatif des cycles du Mg et Ca, les pertes par drainage après deux ans étant nulles. Les bilans réalisés sur l'écosystème deux ans après l'apport des traceurs bouclent pratiquement à 100 %.

Ces travaux montrent la puissance de l'approche « traçage isotopique » en complément des approches conventionnelles pour l'étude des cycles et de la fertilité minérale des écosystèmes forestiers.

FIGURE 3 POURCENTAGES DE ^{44}Ca RETROUVÉS DANS LA LITIÈRE ET SUR LE COMPLEXE D'ÉCHANGE DANS LES SOLS À DIFFÉRENTES PROFONDEURS, DEUX ANS APRÈS ENRICHISSEMENT



PROFONDEUR DE PRÉLÈVEMENT EN EAU ET EN NUTRIMENTS

Réchauffement climatique et réserve en eau dans les sols méditerranéens

Dans des peuplements de pins d'Alep à Chypre, les isotopes de l'oxygène ont été utilisés pour comprendre la réponse des arbres à la sécheresse et le lien avec la mortalité (Sarris *et al.*, 2013).

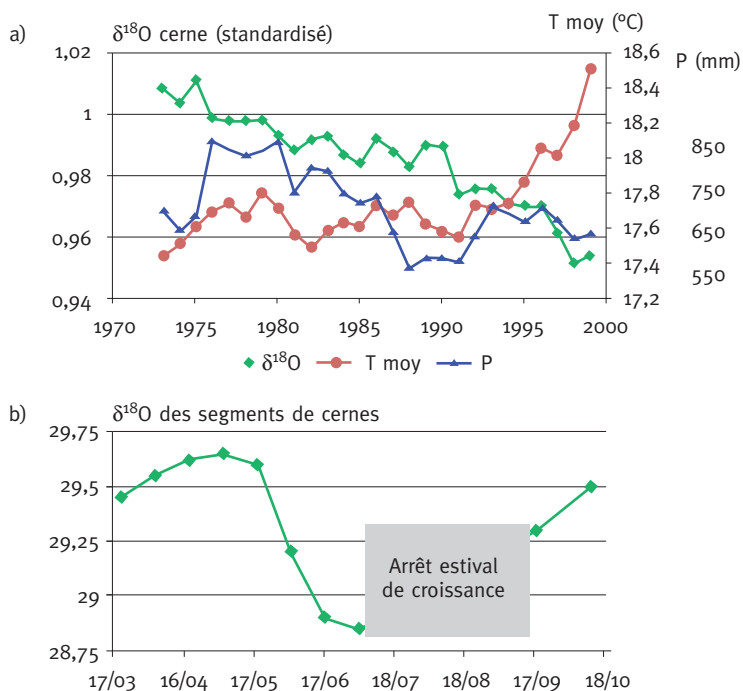
L'isotope ^{18}O de l'oxygène étant plus lourd que l'atome majoritaire (^{16}O), l'eau qui en contient demande plus d'énergie pour s'évaporer. La signature isotopique en oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) de l'eau de pluie est donc corrélée positivement aux températures. Celle mesurée dans les cernes d'arbre correspond à la composition isotopique de l'eau prélevée dans les sols au moment de la formation de ces cernes.

Une corrélation négative apparaît entre le $\delta^{18}\text{O}$ des cernes et les températures moyennes annuelles entre 1970 et 2000 (figure 4a, p.457). Elle contredit le lien habituel entre ^{18}O et températures, mais elle est parallèle à la baisse graduelle des précipitations au cours du temps. En région méditerranéenne, l'eau profonde, pauvre en ^{18}O , provient des précipitations d'hiver. Les précipitations de fin de printemps et d'été, enrichies en ^{18}O , sont rapidement utilisées par la végétation et évaporées, ne parvenant pas en profondeur. La tendance observée ici suggère que les arbres utilisent en moyenne de l'eau de plus en plus profonde, ou qu'ils forment leurs cernes plus tôt au printemps et plus tard en automne (décalage phénologique lié au réchauffement climatique).

D'après les variations isotopiques intra-annuelles dans les cernes, l'aridité du climat oblige les arbres, dès le mois de mai, à puiser dans des sources d'eau très profondes caractérisées par une signature pauvre en ^{18}O (figure 4b, ci-dessous). La hausse du signal ^{18}O entre septembre et octobre montre le retour progressif à l'utilisation d'eau plus superficielle en provenance des pluies d'automne.

Les études sur les largeurs de cernes dans différentes régions méditerranéennes (de Chypre à l'arrière-pays provençal, données non présentées) confirment ces résultats : lorsque l'aridité augmente, la croissance annuelle des cernes est corrélée au climat des 3 à 5 années précédentes, suggérant que l'eau disponible vient de couches de plus en plus profondes où le stock dépend des précipitations cumulées sur plusieurs années.

FIGURE 4 VARIATION DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE EN OXYGÈNE ($\delta^{18}\text{O}$) DANS LES CERNES DE PIN D'ALEP (d'après Sarris *et al.* 2013) : SUR LE GRAPHE DU HAUT (4a), ENTRE 1972 ET 2000, SUR CELUI DU BAS (4b), DANS DES MICRO-SEGMENTS DE CERNES CORRESPONDANT AU BOIS FORMÉ CHAQUE MOIS AU COURS D'UNE SAISON DE VÉGÉTATION



Profondeur de prélèvement en nutriments de plantations d'Eucalyptus au Brésil

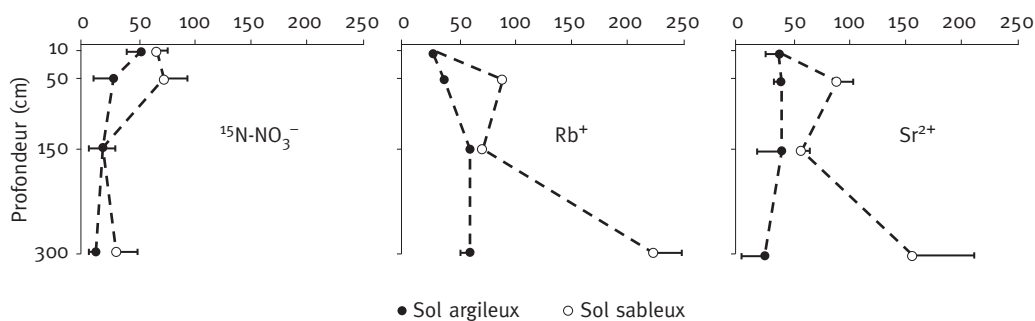
Une étude a été réalisée sur des plantations d'Eucalyptus pour améliorer la compréhension du rôle des racines profondes dans le prélèvement d'eau et d'éléments minéraux lixiviiés depuis la surface. Les fertilisations sont nécessaires pour maintenir les très fortes productions de ces plantations (voisines de $50 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$), et le nombre d'apports d'engrais nécessaire pour éviter les pertes par drainage profond est un enjeu économique important.

Des marquages ont été réalisés à deux saisons, sur deux types de sols à texture contrastée (20 % contre 40 % d'argile). Des solutions marquées par du nitrate enrichi en ^{15}N , du Rb (analogue du K)

et du Sr (analogue du Ca) ont été apportées dans les sols (*via* des tubes en polyéthylène) aux profondeurs de 10 cm, 50 cm, 150 cm ou 300 cm, en évitant tout risque de contamination des horizons supérieurs et en appliquant les traceurs à des distances d'au moins 30 mètres les uns des autres pour éliminer le risque de prélèvement de traceurs introduits à différentes profondeurs par les mêmes racines. Un indice d'activité racinaire a été calculé à partir de la concentration de chaque élément retrouvé dans les feuilles d'arbres des sites d'application, 70 jours après traitement, à chacune des profondeurs et cet indice a été rapporté à la longueur de racines au même niveau dans chaque type de sol (figure 5, ci-dessous).

FIGURE 5

ACTIVITÉ RACINAIRE SPÉCIFIQUE POTENTIELLE (ARSP, indicateur de la quantité de traceur absorbée à chaque profondeur par unité de longueur de racine) DANS UNE PLANTATION D'EUCALYPTUS EN FIN DE ROTATION AU BRÉSIL, 70 JOURS APRÈS APPLICATION DES TRACEURS (% cm/cm³)



Bien que ¹⁵N, Rb et Sr aient été placés simultanément au même endroit, on observe une aptitude plus forte, par unité de longueur de racine fine, à prélever le Rb en profondeur (ainsi que le Sr sur sol sableux) que pour les nitrates, dont le potentiel de prélèvement reste stable avec la profondeur. Ces résultats suggèrent une spécialisation fonctionnelle des racines pour prélever les cations en profondeur, comme cela a été montré sur des racines excisées de Chêne, Hêtre et Épicéa. La forte capacité de prélèvement des cations en profondeur par les racines profondes d'Eucalyptus montrée dans cette étude, en complément d'autres travaux quantifiant les pertes de nutriments par drainage (Laclau *et al.*, 2010), ont conduit à une réduction du nombre de fertilisations sur des centaines de milliers d'hectares de plantations d'Eucalyptus au Brésil.

Profondeur de prélèvement en nutriments dans un écosystème forestier boréal

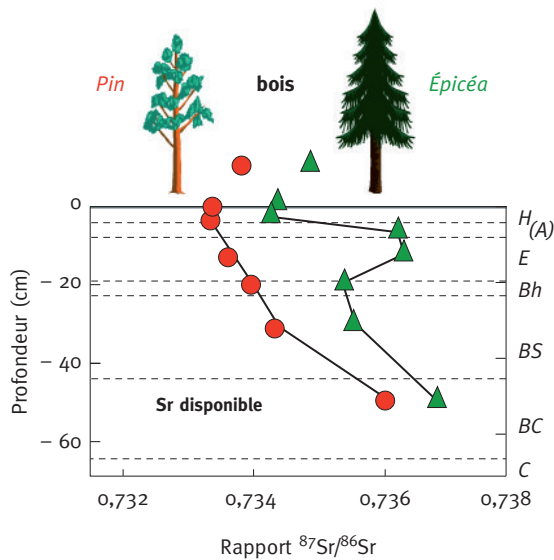
Le strontium (Sr) est un élément trace analogue du calcium et l'utilisation du rapport isotopique naturel ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (isotopes stables) peut permettre d'estimer les sources de Ca dans un écosystème. Dans un peuplement mélangé de Pin et Épicéa développé sur des podzols au nord de la Suède, les vieilles roches riches en K ont une signature ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr très élevée (≈ 0,75) alors que la signature de la pluie est significativement plus basse (≈ 0,71). Il s'établit alors un gradient isotopique qui augmente avec la profondeur dans les sols du fait de la contribution de plus en plus faible du Sr apporté en surface par les pluies. Dans cette étude (Poszwa *et al.*, 2004), des gradients distincts mesurés sous Pin et sous Épicéa (figure 6, p.459) ont pu être modélisés et expliqués par une restitution plus importante du Sr *via* les chutes annuelles d'aiguilles d'Épicéa (quantités de litière plus abondantes, et teneurs en Ca et Sr plus importantes que dans les aiguilles de pins), et par une altération spécifique sous Épicéa (présence d'un pic dans l'horizon E du podzol).

La composition isotopique en Sr de la végétation reflète celle du Sr prélevé dans le sol. Elle permet ainsi d'estimer la profondeur moyenne de prélèvement en Sr, donc en Ca, des arbres. Sur le site étudié, les pins prélèvent le Sr et le Ca en moyenne à 20 cm alors que les épicéas ont une profondeur moyenne de prélèvement autour de 10 cm.

Ces résultats démontrent que le prélèvement minéral des deux espèces reste relativement superficiel mais légèrement plus profond chez les pins. Ils complètent une étude précédente menée sur le même peuplement en utilisant les isotopes de l'oxygène et hydrogène qui avait déjà conclu à un prélèvement en eau plus profond chez le Pin.

FIGURE 6

COMPARAISON DE LA COMPOSITION ISOTOPIQUE DU STRONTIUM (ANALOGUE DU Ca) DANS LES SOLS ET LES ARBRES (PINS ET ÉPICÉAS) EN SUÈDE POUR ESTIMER LA PROFONDEUR DE PRÉLÈVEMENT MINÉRALE



PROCESSUS DANS LES SOLS

Devenir de l'azote issu des décompositions de litières

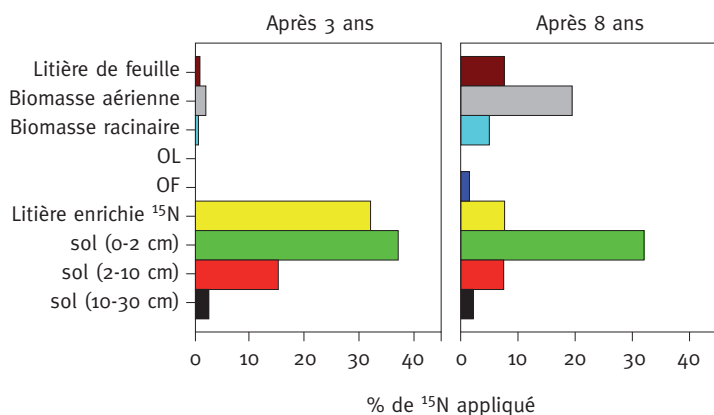
L'azote est un élément limitant la croissance arborée et la capacité des sols à séquestrer le carbone. Les litières constituant la principale source en azote pour les sols forestiers non fertilisés, le traçage isotopique de feuilles de Hêtre enrichies en ^{15}N a été utilisé pour mieux comprendre les devenir de l'azote dans une jeune hêtraie (Ebrach, Allemagne).

Les litières sont rapidement colonisées et transformées par les champignons et la faune du sol. En moins d'un an, les champignons assimilent près de 15 % de l'azote dérivé des litières, préférentiellement sous forme soluble. Dans la même période, la faune du sol herbivore et fongivore assimile également près de 15 % de l'azote soluble dérivé des litières. La figure 7 (p.460) illustre le mouvement de l'azote des litières dans le sol et les arbres au cours des 8 premières années après la chute des litières. Trois ans après la chute des feuilles, l'action conjointe de la faune du sol et des

processus de transfert se traduit par une assimilation faible (2-4 %) mais rapide par les arbres de l'azote (essentiellement sous forme minérale) et par le transfert rapide de 55 % de l'azote des litières dans les couches superficielles du sol (Zeller *et al.*, 2001). Ce dernier s'effectue principalement sous forme de fragments de litières, préférentiellement minéralisés par les micro-organismes du sol dont l'action accroît la biodisponibilité en azote pour les arbres. Huit ans après la chute des feuilles, 30 % de l'azote des litières est ré-assimilé par les arbres, principalement vers les parties aériennes. Parallèlement, les fragments de litières s'agrègent progressivement au contact des complexes organo-minéraux du sol (Hatton *et al.*, 2012). Le transfert de l'azote vers les agrégats prévient sa minéralisation par les micro-organismes en assurant sa rétention, et celle du carbone qui y est associé, dans le sol. Le suivi de l'azote dérivé des litières à l'échelle nanométrique souligne le rôle joué par les micro-organismes dans la formation et la rétention des matières organiques sous forme de complexes organo-minéraux stables à l'échelle décennale.

Le traçage isotopique a permis de quantifier les flux et les mécanismes d'échange de l'azote dans les différents compartiments d'écosystèmes forestiers contrastés. Sur le plus long terme, le traçage isotopique permettra l'élaboration de nouvelles pratiques de gestion pour optimiser la biodisponibilité en azote pour les arbres et la capacité des sols à séquestrer le carbone.

FIGURE 7 DISTRIBUTION D'UNE COHORTE DE ¹⁵N DANS LA FUTAIE RÉGULIÈRE DE JEUNES HÊTRES D'EBRACH (ALLEMAGNE), 3 ET 8 ANS APRÈS APPORT DE FEUILLES DE HÊTRE ENRICHIES EN ¹⁵N. LES NOUVELLES LITIÈRES DE FEUILLES SONT COLLECTÉES APRÈS MARQUAGE AU ¹⁵N ET REMPLACÉES PAR DES LITIÈRES NON ENRICHIES



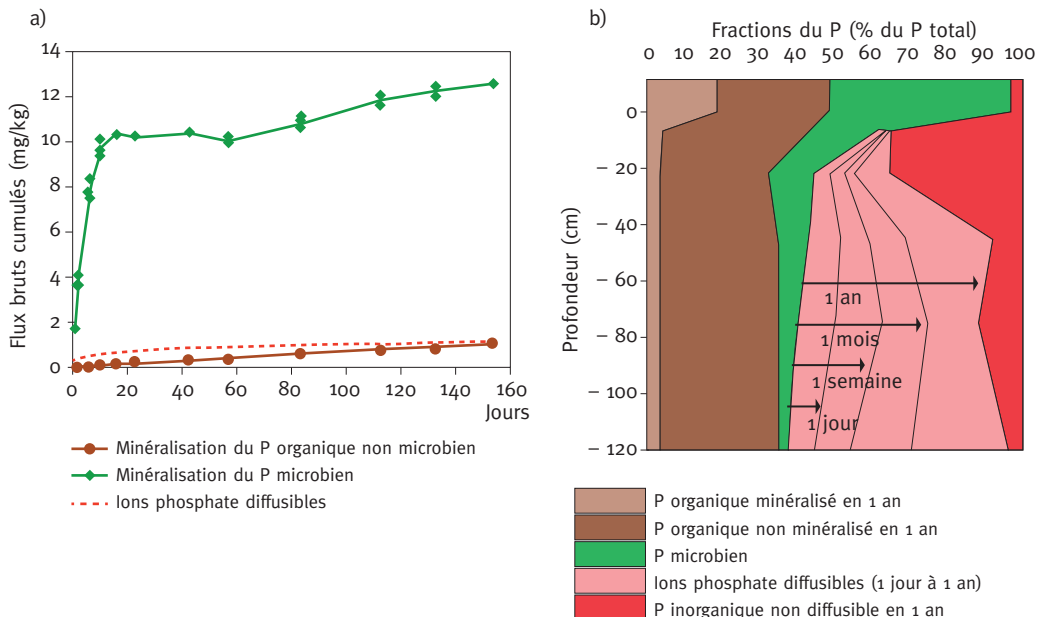
Disponibilité du phosphore dans les sols forestiers (exemple des sols landais)

Le phosphore (P) est un nutriment limitant la croissance des forêts. Cependant les processus gouvernant la disponibilité du P sont encore peu connus. Les travaux présentés à la figure 8 (p.461) utilisent un marquage isotopique au ³²P et ³³P pour évaluer les processus de disponibilité du P dans les sols des Landes de Gascogne très déficients en P, sous plantation de Pins (*Pinus pinaster* Sol.).

Les processus de disponibilité du P permettant le réapprovisionnement de la solution du sol en ions phosphate incluent des processus physicochimiques de diffusion dépendant des formes inorga-

niques du P et des processus microbiologiques (minéralisation du P organique non microbien et turn-over du P contenu dans les micro-organismes du sol).

FIGURE 8 **FLUX D'IONS PHOSPHATE À L'INTERFACE SOLIDE-SOLUTION**
DANS UN SOL MINÉRAL DE SURFACE (0-15 cm),
 quantifiés lors d'expériences en batch et incubations de sols
 avec traçage au ^{32}P ET ^{33}P (partie a).
 Contributions des différentes fractions organiques et inorganiques du P,
 en pourcentage du P total et en fonction de la profondeur du sol
 (exemple pour des sols des Landes de Gascogne sous plantations de Pins (landes sèches) ; partie b).



Un exemple de suivi des quantités d'ions phosphate diffusibles en fonction du temps, dans des suspensions de sol, est présenté à la figure 8a. La méthode permet de caractériser les réactions rapides et lentes (en lien avec la porosité des constituants solides). Ces réactions, caractérisées par traçage au ^{32}P et dilution isotopique, peuvent être prédites en fonction des propriétés physico-chimiques des sols (Achat *et al.*, 2011). Un exemple de suivi des flux de minéralisation du P organique et de re-minéralisation du P microbien, obtenu en combinant une incubation de sols en conditions contrôlées et un marquage au ^{33}P , est présenté à la figure 8a (Achat *et al.*, 2009). La figure 8b illustre l'importance relative des différents processus permettant de rendre disponible le P des sols. Dans le profil de sol étudié, le rôle des processus microbiologiques décroît avec la profondeur du sol, alors que la contribution des processus physicochimiques (diffusion) augmente.

Substitution de nutriments en plantations d'Eucalyptus

La fertilisation de plantations d'Eucalyptus au Congo, montrant une réponse à l'apport de potassium (K) beaucoup plus faible que d'autres régions où les stocks de K dans les sols étaient pourtant comparables, a conduit à formuler l'hypothèse que le sodium (Na) pouvait se substituer partiellement à K (la substitution est connue chez plusieurs végétaux). Un dispositif expérimental a

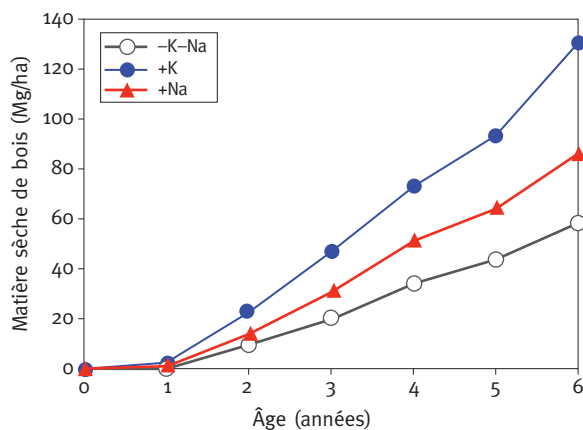
été installé au Brésil pour tester l'hypothèse que des dépôts atmosphériques riches en NaCl dans les régions côtières peuvent permettre la substitution partielle de K par Na chez les Eucalyptus et conduire à une augmentation de la production de bois (Almeida *et al.*, 2010). Un témoin sans apport de K ni de Na a été comparé avec des traitements recevant des apports soit de K, soit de Na, soit un mélange des deux. Tous les traitements étaient fertilisés avec les autres nutriments pour étudier l'effet spécifique de la nutrition en K et en Na.

Un effet positif de l'application de NaCl a été observé sur la croissance des arbres (figure 9, ci-dessous), avec une augmentation de plus de 30 tonnes de matière sèche de bois par ha à l'exploitation par rapport au traitement témoin. L'application de NaCl accroît l'incorporation de Na dans les organes aériens mais ne modifie pas l'accumulation de K. Une substitution partielle de K par Na dans la physiologie des arbres peut expliquer cette réponse (Battie-Laclau *et al.*, 2014). Ces résultats suggèrent que les fertilisants potassiques n'ont pas besoin d'être purifiés en Na. Ils expliquent aussi les bons rendements obtenus dans des plantations côtières ne bénéficiant pas d'apports de fertilisants, mais où les dépôts atmosphériques d'aérosols marins sont élevés. Des expérimentations sont en cours pour le remplacement de l'apport de KCl pur par un mélange de KCl et NaCl afin de bénéficier du faible coût du NaCl.

FIGURE 9

**PRODUCTION DE BIOMASSE DE BOIS
AU COURS D'UNE RÉVOLUTION FORESTIÈRE COMPLÈTE D'EUCALYPTUS AU BRÉSIL
(EXPLOITÉS 6 ANS APRÈS PLANTATION),**

en comparant un traitement témoin n'ayant reçu aucun apport de potassium ni de sodium (–K–Na), un traitement fertilisé avec du KCl et un traitement fertilisé avec du NaCl, sans apport de potassium



CONCLUSIONS

Ces travaux récents illustrent l'intérêt d'utiliser des traceurs géochimiques ou isotopiques pour améliorer les connaissances sur la biodisponibilité de l'eau et des éléments, la fertilité des sols et la nutrition des plantes. Selon le contexte et le(s) traceur(s) utilisé(s), ces approches permettent de définir les sources, d'estimer le temps de résidence de l'eau et des éléments, de tracer les flux de nutriments et d'identifier des processus régissant les cycles biogéochimiques.

Les différentes approches (traceurs géochimiques ou isotopiques, en abondance naturelle ou enrichie) présentées dans cet article ne peuvent néanmoins pas se substituer aux approches plus conventionnelles (mesures des flux, bilans de masse ou entrée-sortie...). Ces nouveaux outils sont puissants mais parfois très onéreux et lourds à mettre en œuvre ; ils doivent donc être utilisés lorsque les approches conventionnelles seules ne permettent pas de répondre aux objectifs fixés. Lorsque les sources de nutriments ou d'éléments minéraux d'intérêt possèdent des compositions géochimique ou isotopique naturelles suffisamment distinctes, il est possible d'utiliser ces variations. Cette approche dite en *abondance naturelle* ne donne cependant accès à des flux que dans des systèmes en équilibre, où les sources sont peu nombreuses, dans l'idéal deux, et dans la mesure où elle est servie par une mesure et une modélisation rigoureuse des flux de matière et de solution. Elle n'est pas univoque lorsque les sources possèdent des signatures proches ou multiples, ou lorsque les systèmes sont en déséquilibre. L'approche en *abondance enrichie* est complémentaire : elle consiste à enrichir isotopiquement un pool et à mesurer la dilution isotopique dans l'écosystème en fonction du temps. Cette approche est dorénavant très utilisée par la communauté scientifique pour l'azote, le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et se développe progressivement pour d'autres éléments comme Mg, Ca...

La combinaison d'approches en abondances naturelle et enrichie, et l'utilisation simultanée de différents systèmes isotopiques (C, N, O, Ca, Mg) ou géochimiques (Li, B), couplées à des expérimentations *ex situ* et *in situ*, permettra dans les années à venir de lever de nombreux verrous et de répondre au moins en partie aux questionnements développés en introduction. De futurs travaux programmés ou en cours de réflexion sont donnés à titre d'illustration. La signature en $\delta^{18}\text{O}$, utilisée pour caractériser la profondeur de prélèvement d'eau en région méditerranéenne, pourrait être utilisée plus largement pour tracer dans d'autres régions le décalage phénologique de la croissance dans le contexte des changements du climat. Les isotopes du Mg pourraient être très utiles comme traceurs de processus fonctionnels, par exemple la re-translocation interne du Mg des plantes en milieu carencé. Le suivi de litières enrichies en ^{13}C et ^{15}N (ou autres traceurs) permettra d'affiner notre compréhension des mécanismes de décomposition et de stabilisation du carbone dans les sols. Le traçage multi-éléments *in situ* dans les plantations d'Eucalyptus (^{13}C et ^{15}N) prévu dans un dispositif de réduction de pluie au Brésil permettra d'améliorer la compréhension des processus de stockage/remobilisation chez ces arbres et la partition des éléments entre les compartiments aériens ou souterrains, en fonction des conditions environnementales. Des études complémentaires sur la disponibilité du phosphore pourront être menées sur les relations entre les réactions caractérisées par dilution isotopique et les propriétés physicochimiques des sols afin de prédire la disponibilité du P.

L'outil isotopique présente donc un intérêt majeur dans le domaine de la compréhension du fonctionnement des sols, en identifiant les sources et la dynamique des éléments, base de connaissance indispensable pour gérer durablement toutes les fonctions des sols et des écosystèmes forestiers.

Anne POSZWA

LIEC UMR 7360 CNRS – UNIVERSITÉ DE LORRAINE
Boulevard des Aiguillettes
BP 70 239
F-54506 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY
(anne.poszwa@univ-lorraine.fr)

Arnaud LEGOUT

INRA Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
Route de l'Arboretum
F-54280 CHAMPENOUX
(legout@nancy.inra.fr)

Jean-Paul LACLAU
CIRAD
UMR Eco&Sols,
Écologie fonctionnelle & Biogéochimie des Sols
& Agro-écosystèmes
2 place Viala
F-34060 MONTPELLIER
(jean-paul.laclau@cirad.fr)

Michel VENNETIER
Irrstea
Unité Écosystèmes méditerranéens et risques
3275 route Cézanne
CS 40061
F-13182 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 5
(michel.vennetier@irstea.fr)

Pierre-Joseph HATTON
INRA Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
Route de l'Arboretum
F-54280 CHAMPENOUX
(pierre-joseph.hatton@nancy.inra.fr)

David Ludovick ACHAT
INRA
UMR 1391 ISPA
71 avenue Edouard Bourlaux
BP 81
F-33140 VILLENAVE-D'ORNON

et
Bordeaux Sciences Agro
UMR 1391 ISPA
F-33170 GRADIGNAN
(David.Achat@bordeaux.inra.fr)

Léa BEDEL
LIEC UMR 7360 CNRS – UNIVERSITÉ DE LORRAINE
Boulevard des Aiguillettes
BP 70 239
F-54506 VANDŒUVRE-LÈS-NANCY

et
INRA Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
Route de l'Arboretum
F-54280 CHAMPENOUX
(bedel.lea@gmail.com)

Jacques RANGER
INRA Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
Route de l'Arboretum
F-54280 CHAMPENOUX
(ranger@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ACHAT (D.L.), AUGUSTO (L.), MOREL (C.), BAKKER (M.R.). — Predicting available phosphate ions from physical-chemical soil properties in acidic sandy soils under pine forests. — *Journal of Soils and Sediments*, 11, 2011, pp. 452-466.
- ACHAT (D.L.), BAKKER (M.R.), MOREL (C.). — Process-based assessment of phosphorus availability in a low phosphorus sorbing forest soil using isotopic dilution methods. — *Soil Science Society of America Journal*, 73, 2009, pp. 2131-2142.
- ALMEIDA (J.C.R.), LACLAU (J.-P.), GONÇALVES (J.L.M.), RANGER (J.), SAINT-ANDRÉ (L.). — A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-deficient soils. — *Forest Ecology and Management*, 259, 2010, pp. 1786-1795.
- BATTIE-LACLAU (P.), BERI (C.), MIETTON (L.), MUNIZ (M.R.A.), ARENQUE (B.C.), PICCOLO (M.C.), JORDAN-MEILLE (L.), BOUILLET (J.-P.), NOUVELLON (Y.). — Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. — *Plant, Cell & Environment*, 37, 2014, pp. 70-81.
- BLOU-BI (E.), DAMBRINE (E.), NICOLAS (A.), POLLIÉ (B.), NYS (C.), LEGOUT (A.). — Mg isotope variations to trace liming input to terrestrial ecosystems: a case study in the Vosges mountains. — *Journal of Environmental Quality* (Submitted).
- BLOU-BI (E.B.), VIGIER (N.), POSZWA (A.), BOUDOT (J.-P.), DAMBRINE (E.). — Effects of biogeochemical processes on magnesium isotope variations in a forested catchment in the Vosges Mountains, France. — *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 87, 2012, pp. 341-355.

- HATTON (P.-J.), KLEBER (M.), ZELLER (B.), MONI (C.), PLANTE (A.F.), TOWNSEND (K.), GELHAYE (L.), LAJTHA (K.), DERRIEN (D.). — Transfer of litter-derived N to soil mineral-organic associations: Evidence from decadal N-15 tracer experiments. — *Organic Geochemistry*, 42, 2012, pp. 1489-1501.
- LACLAU (J.-P.), RANGER (J.), GONÇALVES (J.L.M.), MAQUÈRE (V.), KRUSCHE (A.V.), M'BOU (A.T.), NOUVELLON (Y.), SAINT-ANDRÉ (L.), BOUILLET (J.-P.), PICCOLO (C.M.), DELEPORTE (P.). — Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. — *Forest Ecology and Management*, 259, 2010, pp. 1771-1785.
- LEGOUT (A.), HANSSON (K.), VAN DER HEIJDEN (G.), LACLAU (J.-P.), AUGUSTO (L.), RANGER (J.). — Fertilité chimique des sols forestiers : concepts de base. — *Revue forestière française*, vol. LXVI, n° 4, 2014, pp. 413-424.
- POSZWA (A.), FERRY (B.), DAMBRINE (E.), POLLIER (B.), WICKMAN (T.), LOUBET (M.), BISHOP (K.). — Variation of Ca and Sr concentrations and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratio variation in boreal forest ecosystems: Role of biocycling and depth of root uptake. — *Biogeochemistry*, 67, 2004, pp. 1-20.
- RANGER (J.), GOUTAL-POUSSE (N.), BONNAUD (P.). — Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. — 2012. — 66 p.
- SARRIS (D.), SIEGWOLF (R.), KÖRNER (C.). — Inter- and intra-annual stable carbon and oxygen isotope signals in response to drought in Mediterranean pines. — *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 168, 2013, pp. 59-68.
- VAN DER HEIJDEN (G.). — Apport du multi-traçage isotopique (^{26}Mg , ^{44}Ca et ^2H) à la connaissance des flux d'éléments minéraux dans les écosystèmes forestiers. — Nancy : AgroParisTech, 2013. — 277 p. (Thèse de doctorat).
- ZELLER (B.), COLIN-BELGRAND (M.), DAMBRINE (E.), MARTIN (F.). — Fate of nitrogen released from N-15-labeled litter in European beech forests. — *Tree Physiology*, 21, 2001, pp. 153-162.

APPROCHE ISOTOPIQUE POUR TRACER LA DYNAMIQUE DE L'EAU ET DES NUTRIMENTS DANS LES SOLS FORESTIERS (Résumé)

La fertilité des sols forestiers est généralement estimée par l'étude des cycles de l'eau et des éléments nutritifs essentiels aux êtres vivants (cycles biogéochimiques). Parmi l'ensemble des méthodes d'étude de ces cycles, une approche innovante, complémentaire des études plus classiques, consiste à utiliser des traceurs géochimiques ou isotopiques. Les démarches expérimentales et résultats de quelques études récentes dans le domaine, utilisant des traceurs naturellement présents dans les écosystèmes (ex. ^{18}O , ^{13}C , ^{26}Mg) ou artificiellement apportés (ex. enrichissements en Sr, Rb, ^{15}N , ^{44}Ca , ^{26}Mg , ^{32}P) seront présentés. Ces résultats seront discutés pour faire un point sur la pertinence d'utilisation de ces outils pour définir les sources, avoir accès au temps de résidence de l'eau et des éléments, et tracer les flux de nutriments qu'ils soient d'origine organique ou minérale, internes ou externes à l'écosystème.

ISOTOPIIC APPROACH TO TRACE WATER AND NUTRIENT DYNAMICS IN FOREST SOILS (Abstract)

Forest soil fertility is generally estimated by studying the water and nutrient cycles essential to living organisms (*i.e.* biogeochemical cycles). Use of geochemical and/or isotopic tracers is an innovative, complementary approach to more traditional studies. Experimental procedures and results of some recent studies in forest ecosystems using natural tracers (*e.g.* ^{18}O , ^{13}C , ^{26}Mg) or artificially supplied tracers (*e.g.* enrichment in Sr, Rb, ^{15}N , ^{44}Ca , ^{26}Mg , ^{32}P) are presented. Results are discussed in terms of relevance for using these tools to identify sources, to estimate residence times of water and elements, and to trace nutrient fluxes, of both organic and mineral origins, that are internal or external to the ecosystem.
