

FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS : CONCEPTS DE BASE

ARNAUD LEGOUT – KARNA HANSSON – GRÉGORI VAN DER HEIJDEN – JEAN-PAUL LACLAU –
LAURENT AUGUSTO – JACQUES RANGER

La notion de fertilité est ancienne et de nombreuses définitions sont disponibles dans la littérature. Une définition est donnée dans le premier dictionnaire de l'Académie française (1694) : « Qualité de ce qui est fertile ; *La bonne culture est ce qui contribue le plus à la fertilité de la terre* ». Une précision est ensuite apportée au XVIII^e siècle dans le *Dictionnaire critique de la langue française* (1787) : « REM. Fertilité, ne se dit que de la terre et des plantes : pour les animaux on doit dire fécondité ». Au début du XIX^e siècle, les premiers travaux scientifiques sur la fertilité ont permis de caractériser les propriétés du sol et de mesurer la nutrition hydrique et minérale des cultures, en vue d'augmenter les rendements. La fertilité est alors entendue au sens de la « richesse chimique » du sol en différents éléments minéraux nécessaires à la croissance des végétaux : les macro-éléments (N, P, K, Ca, Mg, S...) et les oligo-éléments (Cu, Zn, Fe...). La fertilité « naturelle » du sol est ici vue comme la potentialité d'un sol à fournir ces éléments minéraux et peut être complétée par une fertilité « artificielle » liée à l'apport de fertilisant. Barbier (1955) propose, quant à lui, deux visions de la fertilité ; celle-ci peut être caractérisée par une production (la fertilité dépendrait alors des qualités propres au sol mais aussi des techniques culturales utilisées) ou par une aptitude à produire où la fertilité désignerait une capacité virtuelle de production, non extériorisée par une culture et qui viserait à caractériser le seul potentiel du sol, sans prendre en compte les techniques culturales. L'ensemble de ces travaux, qui ont trait au domaine de l'agronomie, illustre parfaitement la complexité du concept de fertilité des sols.

Le concept de fertilité s'est également enrichi au cours du XX^e siècle d'une vision pédologique. La fertilité (au sens de capacité d'un sol à fournir une production abondante) est alors subdivisée en trois composantes étroitement liées : physique (qui comporte par exemple la profondeur de sol), biologique (on peut citer la présence de certains organismes comme les vers de terre) et chimique (notamment la teneur en nutriments disponibles pour les plantes), le tout en interaction avec des activités humaines (agriculture, pollution atmosphérique...). L'application de cette vision sur le terrain reste néanmoins difficile et l'évaluation de la fertilité en agronomie se cantonne bien souvent à la seule composante chimique ; un bilan dont l'objectif est de compenser le déficit du réservoir sol pour une culture donnée est alors calculé. Les normes de fertilité définies par Bonneau (1995) pour les écosystèmes forestiers s'appuient sur ce concept où le sol est considéré comme un réservoir de nutriments disponibles pour les végétaux ; le pool de nutriments disponibles est quantifié à un instant donné puis comparé à des normes de nutrition établies par essence.

La définition de la fertilité héritée du contexte agronomique plutôt adaptée aux milieux riches ou enrichis n'a cependant qu'un intérêt limité pour les sols forestiers. Ces sols sont généralement pauvres chimiquement, parfois très pauvres, colonisés par des plantes pérennes adaptées à ce contexte dans un ensemble de processus décrits sous le vocable de cycles biogéochimiques des éléments (Ranger et Turpault, 1999).

TABLEAU I **Caractéristiques des 11 sites expérimentaux utilisés dans cette étude**
 Plusieurs placettes, d'âge ou d'essence différents, peuvent composer un même site.
 En grisé, les sites hors France (Brésil et Congo)

Site	Abréviation	Localisation	Altitude (m)	Précipitation annuelle moyenne (mm/an)	Température annuelle moyenne (°C)	
Abreschviller, Vosges	Abr	48°38'N 7°05'E	400	1 250	8,5	
Monthermé, Ardennes	Ard	49°52'N 4°48'E	390	1 100	8	
Aubure 1, Vosges	Au1	48°12'N 7°11'E	1 080	1 400	8,5	
Aubure 2, Vosges	Au2	48°12'N 7°11'E	1 080	1 400	8,5	
Bonhomme, Vosges	Bon	48°10'N 7°01'E	1 100	1 544	5	
Breuil, Morvan	Bre	46°30'N 4°38'E	650	1 280	9	
Fougères, Bretagne	Fou	48°23'N 1°8'W	175	868	12,9	
Gemaingoutte, Vosges	Gem	48°15'N 7°5'E	650	1 120	8,5	
Vauxrenard, Beaujolais	Vau	46°10'N 4°38'E	770	1 000	7	
Itatinga, São Paulo, Brésil	Ita	23°02'S 48°38'W	850	1 370	19,2	
Kondi, Pointe-Noire, Congo	Kon	4°33'S 11°54'E	100	1 200	25	

L'objectif de cet article est :

- d'illustrer les limites de l'utilisation du concept agronomique (sol = réservoir de nutriments disponibles pour les plantes) pour caractériser la fertilité chimique des écosystèmes forestiers ;
- de proposer les bases d'un nouveau concept rendant compte de la spécificité de la fertilité chimique des sols forestiers en comparaison avec les sols agricoles.

DONNÉES MOBILISÉES ET MÉTHODES MISES EN ŒUVRE

Pour redéfinir le concept de fertilité chimique, nous nous appuyons sur une base de données constituée de résultats acquis sur 11 sites expérimentaux forestiers (9 en France, 1 au Congo et 1 au Brésil) mis en place depuis les années 1970 et détaillés dans le tableau I (ci-dessus). Cette base de

Essences	Année d'implantation du peuplement	Années d'échantillonnage	Roche mère	Type de sol (WRB)
<i>Abies alba</i> Mill.	1940	1994 ; 1998 ; 2007	Grès	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Picea abies</i> (L.) Karst ; <i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.	1831 ; 1931	1977 ; 1997	Phyllite	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	1900 ; 1958 ; 1978	1985 ; 1991 ; 1994 ; 1996	Granite	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Fagus sylvatica</i> L.	1850	1985 ; 1991 ; 1994	Granite	<i>Podzolic cambisol</i>
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	1918	1988	Granite	<i>Podzolic cambisol</i>
<i>Abies nordmanniana</i> Spach ; <i>Fagus sylvatica</i> L. ; <i>Picea abies</i> (L.) Karst. ; <i>Pinus nigra</i> Arnold ; <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco ; <i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.	1826 ; 1976	1974 ; 2001	Granite	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Fagus sylvatica</i> L.	1851 ; 1915 ; 1971 ; 1988	1996 ; 2001 ; 2003	Granite	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	1904	1988 ; 1991	Gneiss	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	1950 ; 1970	1993	Tuf volcanique des Vosges	<i>Dystric cambisol</i>
<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	1998 ; 2004	2003 ; 2005 ; 2007	Sables détritiques	<i>Ferralsol</i>
Eucalyptus hybride (inconnu)	1992 ; 1998 ; 2005	1998 ; 2000 ; 2001 ; 2006	Sables continentaux	<i>Ferralic Arenosols</i>

données ne comporte pas de sites développés sur matériau calcaire et les pH_{eau} des horizons de surface sont inférieurs à 5.

De nombreuses mesures ont été réalisées sur ces différents sites expérimentaux : analyses chimiques et physiques des sols, de litière au sol, de biomasse arborée pour quantifier les stocks dans les compartiments, et mesures de flux de nutriments entre les différents compartiments de l'écosystème :

— les analyses de sol réalisées sur différents horizons (« couches de sol ») utilisées sont les suivantes : pH_{eau} , C, N, cations échangeables (K, Ca, Mg, Na) et P assimilable⁽¹⁾. La densité apparente (ou masse volumique) et l'épaisseur des horizons permet ensuite de calculer des stocks de

(1) C = Carbone, N = Azote, K = Potassium, Ca = Calcium, Mg = Magnésium, Na = Sodium, P = Phosphore.

nutriments disponibles pour les plantes dans les sols, c'est-à-dire facilement mobilisables (cations échangeables K, Ca, Mg, Na et P assimilable) ;

- les analyses chimiques de litière au sol permettent notamment de connaître sa concentration en éléments totaux (K, Ca, Mg, P...). La quantité de litière au sol (matière sèche) à l'hectare permet ensuite de calculer des stocks de nutriments dans cette litière au sol. Ces stocks ne sont pas intégrés aux stocks de nutriments « disponibles » car le passage sous une forme minérale (minéralisation) est nécessaire pour satisfaire les besoins des plantes. Ces stocks, dont le temps de résidence est en général faible (inférieur à 20 ans), constituent un capital de nutriments qui pourra à terme retourner au sol et profiter au peuplement ;

- les analyses chimiques de différents compartiments d'arbre (feuilles, branches, bois et écorce de tronc, racines) et leur poids sec permettent d'estimer des stocks de nutriments dans la biomasse arborée. La variation de ces stocks entre deux dates permet d'évaluer le prélèvement net par les arbres (immobilisation nette annuelle dans la biomasse aérienne) ;

- les mesures de poids sec de chute de litière par unité de surface et leur analyse chimique permettent d'estimer le retour au sol annuel de litière. Ces flux ont été mesurés sur des périodes de plusieurs années sur les sites pour intégrer les variations annuelles.

LIMITES DES APPROCHES CLASSIQUES POUR CARACTÉRISER LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS

Différents indicateurs ne conduisent pas à une même évaluation de la fertilité chimique

Différents indicateurs relatifs aux propriétés physicochimiques des sols sont utilisés dans la littérature pour rendre compte de la fertilité chimique. Nous nous focaliserons ici sur quelques-uns de ces indicateurs et comparerons leurs valeurs pour les onze sites d'étude : C/N, pH_{eau} , cations échangeables et phosphore assimilable du sol.

Le tableau II (p. 417) représente les classements obtenus pour chaque indicateur sur les onze sites (1 = le plus fertile et 11 = le moins fertile, en considérant un site comme fertile si le pH_{eau} ou les teneurs en cations échangeables ou phosphore assimilable sont élevés, ou si le C/N du sol est faible). Le classement de fertilité chimique des écosystèmes étudiés diffère selon l'indicateur considéré. Les conclusions sont similaires si l'on s'intéresse à d'autres couches de sols (0-70 cm par exemple). Par ailleurs, pour un indicateur donné, il existe parfois plusieurs méthodes d'obtention conduisant à des valeurs différentes (P assimilable par exemple, qui peut être mesuré par différentes méthodes : Duchaufour, Olsen...). Ce manque de standardisation limite d'autant l'intérêt de ces indicateurs. Nous n'établirons pas ici de jugement sur la qualité de chacun, mais cette comparaison met en évidence la difficulté d'identifier un indicateur facilement mesurable et fiable rendant correctement compte de la fertilité chimique.

Les stocks de nutriments disponibles dans les sols ne sont pas toujours de bons indicateurs de la fertilité chimique

Comme mentionné en introduction, la fertilité chimique des écosystèmes forestiers est encore souvent évaluée au travers des stocks de nutriments disponibles dans les sols. Cette approche, classiquement utilisée en agronomie, considère le sol comme un réservoir (= stock) de nutriments disponibles pour les végétaux. Les stocks sont évalués à un instant donné et égaux au produit d'une concentration en un élément chimique (g d'un élément par kg de sol sec) et d'un poids de sol à l'hectare (volume de sol sur une épaisseur définie, multiplié par une masse volumique). Cette approche a plusieurs limites que nous explicitons ci-après.

TABLEAU II

**Classement des sites d'étude
selon différents indicateurs relatifs aux propriétés
physicochimiques de la couche de sol 0-10 cm,
retenues pour rendre compte de la fertilité chimique**

1 = le plus fertile et 11 = le moins fertile. En grisé, les sites hors France (Brésil et Congo).

Site	H ₀ /H _{max} *	pH _{eau}	C/N	Ca**	K**	Mg**	Ca + K + Mg + Na**	P ₂ O ₅ ***
Abr	1,00	4	9	8	9	9	8	9
Gem	1,00	8	5	2	7	2	2	10
Vau	0,97	3	1	1	4	4	3	1
Kon	0,89	1	10	11	10	11	10	8
Bre	0,80	5	8	9	8	8	9	5
Ita	0,80	2	4	10	11	10	11	6
Fou	0,74	6	11	3	2	1	1	4
Ard	0,69	7	2	4	6	3	4	7
Au1	0,64	10	3	7	1	5	6	3
Bon	0,61	11	7	5	3	6	5	11
Au2	0,60	9	6	6	5	7	7	2

* Indice de productivité : ratio entre la hauteur dominante du peuplement à un âge donné et la hauteur dominante moyenne régionale pour des peuplements de même âge.

** Stock de cation échangeable.

*** Stock de phosphore assimilable (méthode Duchaufour).

• *Incertitude sur la taille du réservoir à considérer*

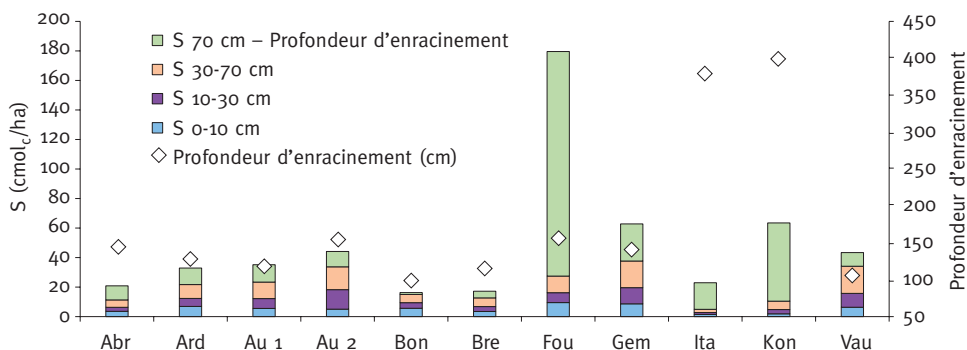
La couche de sol utilisée pour le calcul est généralement définie comme la « zone explorée par les racines fines de diamètre inférieur à 2 mm ». La bonne connaissance de la profondeur d'enracinement et sa répartition nécessite des mesures lourdes *in situ* et ne prend pas en considération la spécialisation éventuelle des racines (pour le prélèvement d'eau et de nutriments...). À défaut de mesure, le calcul est souvent réalisé pour la couche de sol 0-70 cm (Bonneau, 1995), bien que la profondeur d'enracinement soit fonction de nombreux paramètres : autécologie de l'essence étudiée, propriétés physicochimiques des sols, profondeur du sol, obstacles empêchant la croissance racinaire (nappe d'eau, pierrosité élevée...). La figure 1 (p. 418) présente les stocks de cations échangeables (Ca + K + Mg + Na) pour différentes couches de sol des onze sites expérimentaux. La profondeur d'enracinement mesurée sur le terrain varie fortement entre les différents sites et les stocks de cations nutritifs dans les sols sont très différents en fonction des couches de sol considérées. Sur ces onze sites, les stocks dans la couche 0-70 cm sont par exemple très différents des stocks dans la couche 0-profondeur d'enracinement. Le choix de l'épaisseur de sol à considérer pour le calcul des stocks est donc primordial.

Par ailleurs, le calcul du stock suppose que les racines peuvent bénéficier de la totalité du stock disponible dans un horizon donné. Cette hypothèse forte est difficilement vérifiable et la quantité de racines présentes dans un horizon donné pourrait conditionner la quantité d'éléments facilement mobilisables par la plante. La mycorhization des racines peut aussi avoir un rôle majeur pour le prélèvement d'ions peu mobiles dans le sol en augmentant fortement le facteur de colonisation.

FIGURE 1

**STOCKS DE CATIONS ÉCHANGÉABLES S (Ca + K + Mg + Na)
POUR DIFFÉRENTES COUCHES DE SOLS (axe de gauche)
ET PROFONDEUR D'ENRACINEMENT (axe de droite)
SUR LES ONZE SITES EXPÉRIMENTAUX**

La profondeur d'enracinement correspond ici à la profondeur pour laquelle 95 % de la masse de racines fines est trouvée.



- *Absence de prise en compte de l'autécologie des essences*

Dans l'approche classique de la fertilité chimique, les besoins réels des essences ne sont pas considérés. La fertilité est évaluée au travers d'un réservoir d'éléments potentiellement disponibles pour la plante, sans intégrer les besoins réels spécifiques à chaque essence, leur stratégie de prélèvement en particulier en fonction des milieux (contenu et équilibre entre éléments) et de l'humidité du sol (essence tolérante, évitante...) et la colonisation variable du réservoir sol par les racines et les mycorhizes.

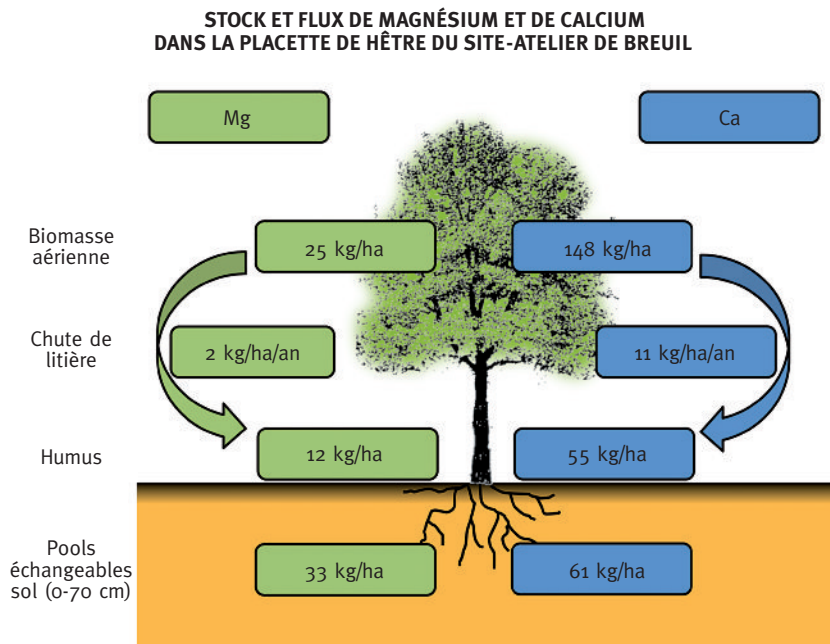
- *Absence de relation entre la production de biomasse et le réservoir de nutriments à disposition*

Dans certains contextes, la production des écosystèmes forestiers est importante alors que les stocks de nutriments disponibles dans les sols sont très faibles. Le tableau II (p. 417) présente un indice de productivité (Ho/Hmax) qui correspond au ratio entre la hauteur dominante du peuplement étudié à un âge donné et la moyenne régionale de la hauteur dominante pour des peuplements de même âge. Lorsque l'on compare cet indice de productivité au classement de fertilité obtenu en considérant le stock de cations nutritifs (Ca + Mg + K + Na) disponibles dans les sols, aucune relation claire n'apparaît : les écosystèmes les plus productifs n'ont pas les stocks les plus élevés et inversement. Lorsque les stocks disponibles dans les sols sont faibles, le concept de fertilité vu comme un réservoir n'explique donc pas correctement la production.

La figure 2 (p. 419) permet d'illustrer l'importance du prélèvement net de calcium et magnésium au regard des stocks dans le système sol-plante. Pour cet écosystème, le stock de Ca échangeable du sol est du même ordre de grandeur que le stock dans les humus et environ trois fois plus faible que le stock dans la biomasse aérienne. Le stock de Mg échangeable est quant à lui du même ordre de grandeur que le stock dans la biomasse aérienne. La chute annuelle de litière représente 11 kg/ha/an de Ca et 2 kg/ha/an de Mg, c'est-à-dire environ deux fois le prélèvement net annuel (5,6 kg/ha/an de Ca et 1,2 kg/ha/an de Mg). Ces chiffres illustrent l'importance du cycle biologique (restitution par les litières), qui contribue à la recharge du réservoir sol nécessaire à la croissance des peuplements ou à la nutrition directe des arbres, sans passer par ce réservoir. Le même constat

est réalisé sur bon nombre d'écosystèmes développés sur sols très pauvres chimiquement : à titre d'exemple, une expérimentation menée sur un écosystème tropical développé sur sol très pauvre (Nzila *et al.*, 2002) démontre que le retrait des rémanents entraîne, dans les trois ans qui suivent, une forte perte de croissance des peuplements d'Eucalyptus. Le cycle biologique est donc un des piliers de la nutrition pour ces écosystèmes, la rupture de ce cycle provoquant une perte de croissance d'autant plus forte et immédiate que le sol est pauvre.

FIGURE 2



VERS LA REDÉFINITION DU CONCEPT DE FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS

Une redéfinition du concept de fertilité chimique est fondamentale pour la compréhension du fonctionnement et l'identification de l'origine du dysfonctionnement des écosystèmes forestiers. Le concept agronomique de la fertilité, principalement basé sur des stocks de nutriments disponibles dans les sols, n'intègre pas la circulation d'éléments et le recyclage propre aux cycles biogéochimiques. Ce concept agronomique doit être complété par deux notions importantes : le seuil inférieur d'activation de la composante biologique des cycles et le volant d'éléments aptes à assurer par recyclage le fonctionnement agrobiogéochimique du sol.

Le concept de fertilité chimique des sols forestiers doit alors prendre en compte :

- **la fertilité actuelle**, qui intègre :
 - la réserve disponible en nutriments dans les sols (très variable, de très faible en sol très pauvre à élevée en sol riche),
 - les flux actifs d'éléments en quantité limitée (provenant du sol, des restitutions par les litières, des apports atmosphériques, des transferts internes à la plante et éventuellement des apports par amendement ou fertilisation),

– ainsi que les attributs du sol permettant de retenir ces éléments (teneur en matière organique et en argiles), conduisant ou non à un système très conservatif limitant les pertes de nutriments.

• **la fertilité chimique à long terme**, qui intègre :

- la capacité du sol à maintenir voire à restaurer sa fertilité dans un contexte de milieu et de gestion donné,
- le flux d'éléments issus de l'altération des minéraux porteurs de nutriments, de la décomposition des litières, et des apports atmosphériques.

Ces notions ne décrivent cependant qu'un potentiel ou une capacité à produire qui sera exploité en fonction de contraintes à considérer pour appréhender correctement le concept de fertilité chimique, notamment :

- les contraintes hydriques (excès ou déficit),
- les besoins réels des essences (fonction de leur autécologie, leur vitesse de développement, leur production),
- la colonisation du sol par les racines en fonction des contraintes physiques (compaction, hypoxie, hydromorphie...) et la stratégie de prélèvement des essences (prélèvement d'eau plus ou moins liée à la matrice de sol⁽²⁾, évolution temporelle de la localisation verticale du prélèvement dans le profil...).

Ce concept revisité de fertilité chimique peut être mis en relation avec une typologie de fonctionnement des écosystèmes forestiers basée sur l'importance des différentes composantes des cycles biogéochimiques, BIO et GEO. Lorsque la composante *géochimique* du cycle est prépondérante (apports par altération des minéraux du sol ou apports atmosphériques, voire remontées capillaires de nappes profondes), celle-ci apporte suffisamment de nutriments au système sol-plante pour assurer sa croissance, le réservoir sol participant ici grandement à la nutrition du peuplement. À l'inverse, lorsque la composante *géochimique* du cycle n'apporte que peu de nutriments au système sol-plante, les composantes *biologique* (restitutions par les litières, récréation⁽³⁾...) ou *biochimique* (transferts internes à la plante) des cycles deviennent prépondérantes dans la nutrition du peuplement. L'importance de ces deux composantes est d'autant plus forte que la réserve en nutriments dans les sols est faible : la nutrition du peuplement pourrait d'ailleurs court-circuiter le réservoir sol dans certains contextes d'extrême pauvreté chimique des sols.

La gestion sylvicole doit prendre en considération cette typologie de fonctionnement puisqu'elle agit directement sur le cycle biologique notamment par le biais des exportations de biomasse. Dans un contexte actuel de demande accrue en bois énergie, on comprend, sur la base de cette typologie, que la gestion des rémanents⁽⁴⁾ est cruciale, particulièrement lorsque la nutrition des peuplements repose majoritairement sur la composante biologique des cycles.

INTERACTION ENTRE LA FERTILITÉ CHIMIQUE ET LA RÉSERVE EN EAU

Nous avons mentionné précédemment que de nombreuses contraintes devaient être considérées dans le concept de fertilité chimique des sols. Nous illustrerons succinctement ce propos en considérant la relation entre cette fertilité et la disponibilité en eau dans le profil de sol. L'eau est le vecteur de circulation des éléments dans l'écosystème et, à ce titre, la disponibilité en eau participe au concept de biodisponibilité puisque les éléments sont prélevés en majorité dans la solution du sol (un sol riche chimiquement mais sec est un sol pauvre vis-à-vis des éléments biodisponibles).

(2) Plus l'eau est liée au sol, plus la porosité occupée est fine et plus l'eau sera difficile à extraire.

(3) Restitution au sol d'eau et de nutriments par les feuilles/aiguilles d'arbre.

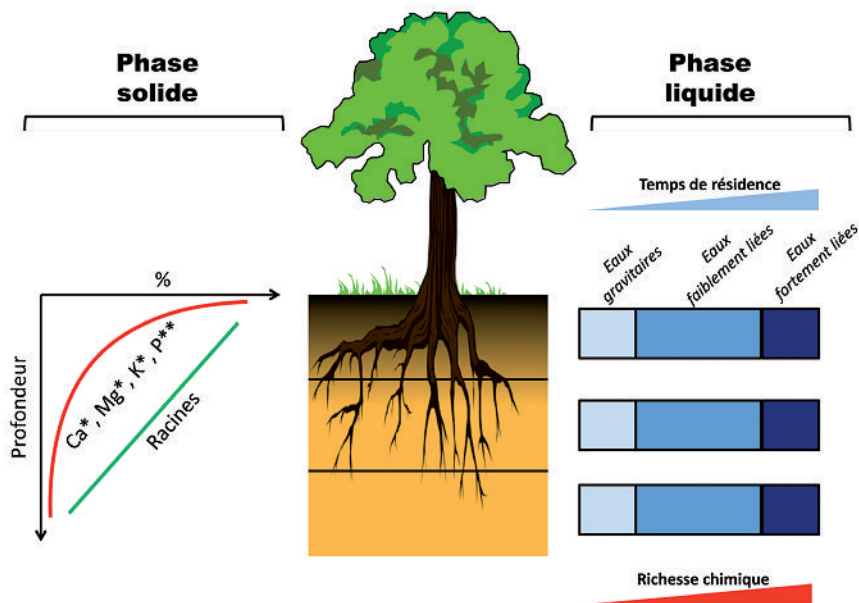
(4) Résidus laissés au sol (branches, feuilles...) lors d'une exploitation.

Si l'on s'intéresse à la fonction « réservoir en nutriments » du sol, ce réservoir doit être considéré à « géométrie variable », en fonction de la disponibilité en eau dans le profil de sol, elle-même dépendant de nombreuses variables comme le climat, le régime hydrique au sein du profil de sol, sa réserve utile, ou encore l'essence. Cette géométrie est variable dans l'espace (taille du réservoir à disposition, localisation de ce réservoir) mais aussi dans le temps (évolution au cours de l'année), ces variations pouvant impliquer un changement du réservoir effectivement à disposition. La figure 3 (ci-dessous) permet d'illustrer ces propos, en présentant un exemple de répartition des éléments en contexte de sol acide. La dessiccation du profil de sol pendant la saison de végétation entraînera une diminution du volume de sol où des nutriments peuvent être prélevés par les racines, ou encore un déplacement du prélèvement dans le profil de sol (de la surface vers la profondeur) : la taille et la localisation du réservoir pourront donc évoluer. Le réservoir pourra ainsi changer qualitativement : différences de richesse chimique des types d'eau à disposition, changements des ratios entre éléments, des associations symbiotiques en présence, etc. Les paramètres de la nutrition peuvent donc être modifiés et l'arbre peut réagir par des adaptations comme par exemple l'ascenseur hydraulique⁽⁵⁾, mais aussi plus couramment par un jeu subtil entre prélèvement d'eau et de nutriments dans le sol, et, remobilisation des réserves propres.

Dans un contexte de changement climatique et de potentiel changement de régime hydrique au sein des profils de sols, la localisation des prélèvements (eaux plus ou moins liées à la matrice, présentant des richesses chimiques différentes) et les variables qui contrôlent cette géométrie variable devront être identifiées dans les années à venir, en intégrant bien entendu la dimension temporelle.

FIGURE 3 EXEMPLE DE SCHÉMA DE DISTRIBUTION DES ÉLÉMENTS EN SOL ACIDE

* Cation échangeable, ** Phosphore assimilable



(5) Phénomène où les arbres prélèvent de l'eau en profondeur, la redistribuent en partie dans les horizons secs de surface, ce qui permet aux nutriments de passer en solution afin d'être prélevés par les arbres.

CONCLUSIONS

La fertilité chimique des sols forestiers est donc un concept complexe et n'est qu'une composante de la fertilité globale. Elle est en effet en interaction étroite avec les autres composantes (physique et biologique) de la fertilité que nous n'avons pas abordées ici.

La fertilité chimique des sols forestiers ne doit pas se limiter au concept agronomique de réservoir de nutriments disponibles dans les sols à un moment donné (aspect statique) ; il faut y ajouter la circulation d'éléments et le recyclage propre aux cycles biogéochimiques (aspect dynamique). Lorsque le sol est pauvre chimiquement, le concept de réservoir n'est en effet pas suffisant pour caractériser la fertilité chimique. L'importance du recyclage des éléments minéraux est alors d'autant plus grande que la réserve en nutriments dans les sols est faible.

Le maintien de la fertilité en forêt n'est pas une préoccupation récente (cf. ci-dessous, extrait du cours de Henry en 1894) mais il convient aujourd'hui, dans un contexte de demande accrue en bois énergie, d'adapter les pratiques sylvicoles aux capacités des écosystèmes. Le gestionnaire peut en effet intervenir sur de nombreuses variables pour permettre l'utilisation durable de la capacité à produire de l'écosystème, en particulier en jouant sur la longueur des révolutions, les compartiments de biomasse récoltés, les méthodes de récoltes et de traitement des rémanents (Augusto *et al.*, 2000 ; Ranger *et al.*, 2011). Lorsque le point de non-retour a été atteint et que la fertilité chimique de l'écosystème est trop fortement dégradée, le recours à l'amendement est une alternative permettant sa restauration et une amélioration globale du fonctionnement de l'écosystème (sols, peuplements, eaux de surface...). Cette pratique curative peut également être appliquée à des fins préventives pour maintenir un niveau de fertilité souhaité (compensation des pertes d'éléments liées à l'exploitation de biomasse ; mise à disposition des éléments en quantité suffisante pour satisfaire l'activité des organismes).

La perte provenant de l'exportation du bois, quoique faible, est réelle et amènerait à la longue l'appauvrissement des sols forestiers si elle n'était largement compensée, comme nous l'avons déjà dit, par le passage incessant d'une partie de la réserve du sol à l'état assimilable.

Si la provision de matières nutritives assimilables descend au-dessous d'un certain minimum, la production du sol diminue aussitôt.

On dit qu'un sol est épuisé quand il est privé d'un ou plusieurs des éléments nutritifs. Il est clair que l'épuisement arrive plus vite pour les matières qui n'existent dans le sol qu'à faible dose.

Extrait du cours *Sols forestiers* de E. Henry, professé à l'École nationale des Eaux et Forêts, 1894

Arnaud LEGOUT – Karna HANSSON – Gregory VAN DER HEIJDEN – Jacques RANGER
INRA – Centre de Nancy-Lorraine
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers
F-54280 CHAMPENOUX
(legout@nancy.inra.fr) (karna.hansson@nancy.inra.fr)
(gregory.vanderheijden@nancy.inra.fr) (ranger@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)

Laurent AUGUSTO
INRA – Centre de Bordeaux
UMR Transfert sol-plante
et Cycle des éléments minéraux
F-33883 VILLENAVE D'ORNON
(laugusto@bordeaux.inra.fr)

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du GIP Ecofor et de l'Office national des forêts. L'UR Biogéochimie des écosystèmes forestiers bénéficie du soutien du laboratoire d'excellence ARBRE (ANR-12-LABXARBRE-01).

BIBLIOGRAPHIE

- AUGUSTO (L.), RANGER (J.), BONNEAU (M.). — Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. — *Revue forestière française*, vol. LII, n° 6, 2000, pp. 507-518.
- BARBIER (M.G.). — Essai de définition de la fertilité de la terre. — *Économie rurale*, vol. 23, 1955, pp. 3-6.
- BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.
- NZILA (J.-D.), BOUILLET (J.-P.), LACLAU (J.-P.), RANGER (J.). — The effects of slash management on nutrient cycling and tree growth in Eucalyptus plantations in the Congo. — *Forest Ecology and Management*, vol. 171, n° 1-2, 2002, pp. 209-221.
- RANGER (J.), AUGUSTO (L.), BERTHELOT (A.), BOUCHON (J.), CACOT (E.), DAMBRINE (E.), GAVALAND (A.), LACLAU (J.-P.), LEGOUT (A.), NICOLAS (M.), NYS (C.), PONETTE (Q.), OTTORINI (J.-M.), SAINT-ANDRÉ (L.). — Sylviculture et protection des sols. — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 2, 2011, pp. 245-264.
- RANGER (J.), TURPAULT (M.-P.). — Input-output nutrient budgets as a diagnostic-tool for the sustainability of forest management. — *Forest Ecology and Management*, vol. 122, 1999, pp. 7-16.

FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS FORESTIERS : CONCEPTS DE BASE [Résumé]

Les diagnostics de fertilité chimique en forêt assimilent généralement le sol à un réservoir de nutriments disponibles pour les végétaux, quantifié à un instant donné puis comparé à des normes de nutrition établies par essence. Ce concept hérité de l'agronomie est régulièrement mis en défaut et de nombreux écosystèmes forestiers développés sur sols très pauvres chimiquement (notamment en Ca, Mg, K) affichent une production remarquable. L'objectif de cet article est d'illustrer les limites du concept « fertilité = réservoir sol » et de proposer les bases d'un nouveau concept rendant compte de la spécificité de la fertilité chimique des écosystèmes forestiers. Une base de données regroupant les résultats acquis sur 11 sites expérimentaux depuis les années 1970 a été utilisée. Les résultats démontrent que le concept de fertilité chimique des écosystèmes forestiers ne doit pas se limiter à la seule prise en compte des stocks de nutriments disponibles dans les sols mais doit également intégrer la circulation et le recyclage d'éléments propres aux cycles biogéochimiques.

CHEMICAL FERTILITY OF FOREST SOILS: BASIC CONCEPTS [Abstract]

The chemical fertility of a forest is generally defined as the pool of plant-available nutrients in the soil which is quantified at a given time and compared to nutrient requirements established for the different tree species. This concept inherited from agronomy is often unreliable and many forest ecosystems developed on chemically poor soils (particularly in Ca, Mg, K) are highly productive. The objective of this article is to illustrate the limits of the "fertility = soil reservoir" concept and to propose the basic principles of a new concept which takes into account the specificity of the chemical fertility of forest ecosystems. To support this new concept, a comprehensive database of results acquired since the 1970s from 11 experimental sites was used. The results demonstrate that the definition of the chemical fertility of forest ecosystems should not be limited to the pool of plant-available nutrients in the soil but must also integrate the cycling and recycling of nutrients characteristic of biogeochemical cycling.
