



HAL
open science

Evolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies.

Jacques Ranger, Vincent Badeau, Étienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey, Claude Nys, J.P. Party, Marie-Pierre M.-P. Turpault, Erwinn Ulrich

► To cite this version:

Jacques Ranger, Vincent Badeau, Étienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey, Claude Nys, et al.. Evolution constatée des sols forestiers au cours des dernières décennies.. *Revue forestière française*, 2000, 52 (sp), pp.49-70. 10.4267/2042/5406 . hal-03443379

HAL Id: hal-03443379

<https://hal.science/hal-03443379>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVOLUTION CONSTATÉE DES SOLS FORESTIERS AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES

J. RANGER – V. BADEAU – E. DAMBRINE – J.-L. DUPOUEY
C. NYS – J.-P. PARTY – M.-P. TURPAULT – E. ULRICH

La fertilité des sols est une ressource non renouvelable qu'il convient avant tout de protéger car sa restauration et, *a fortiori*, son amélioration sont complexes et coûteuses. Les contraintes écologiques et économiques propres à la production soutenue et durable de matériau bois conduisent à s'intéresser particulièrement à l'évolution des sols.

L'objectif de cet article est de faire la synthèse des observations réalisées sur l'évolution récente des sols forestiers et d'en tirer des conclusions pour l'aménagement des forêts, dans l'optique d'une gestion durable. Celle-ci s'entend ici comme le maintien de la capacité des sols à produire de la biomasse au cours des générations forestières successives, tout en conservant les paramètres de l'environnement, qualité des sols et des eaux de surface ainsi que des biotopes et biocénoses qui leur sont associées, biodiversité.

Des scénarios très divers vont se présenter, depuis les forêts mises en réserve et pratiquement pas cultivées, jusqu'aux forêts gérées très intensivement. Le maintien de la production sur les sols très pauvres est très précaire, mais celui des plantations semi-intensives, réalisées en grande partie sur d'anciennes terres agricoles, l'est tout autant, car la baisse de potentialité semble pouvoir y être rapide.

LES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS FORESTIERS FRANÇAIS

Les réseaux systématiques d'observation, tels que le réseau européen de surveillance de la santé des forêts, fournissent une occasion unique pour faire un inventaire détaillé des caractéristiques des sols forestiers. Ils permettent également de comparer ces derniers aux sols agricoles (Badeau *et al.*, 1999).

Par leur origine, les sols forestiers ne sont pas très différents des sols agricoles. Cependant, à l'intérieur d'une petite région donnée, ce sont les sols les plus pauvres chimiquement ou ceux dont les propriétés physiques sont les plus défavorables (caillouteux, argileux, etc.) qui ont été réservés à la forêt. Contrairement aux sols agricoles, ils n'ont pas été enrichis par l'homme (fertilisation minérale ou organique, chaulage). Les sols forestiers ne sont pas ou peu travaillés, ce qui se traduit par une différenciation en horizons et une accumulation importante de matière organique dans les horizons

superficiels. La matière organique joue un rôle complexe qu'il serait faux de ne juger que favorable : par exemple, les couches holograniques (supérieures) des sols acides peuvent gêner la régénération naturelle (Le Tacon *et al.*, 1976). Les humus bruts se caractérisent par la production d'acides organiques aptes à dégrader les horizons superficiels du sol (Slak et Suran, 1982) et l'accumulation de litière s'accompagne le plus souvent d'une réduction de la biodiversité.

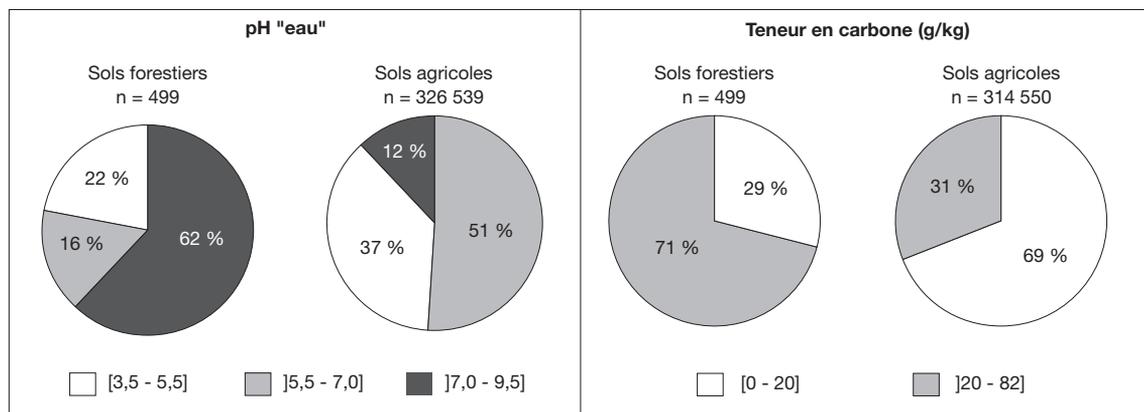
Bien plus, les sols forestiers ont servi dans de nombreux cas de source d'éléments nutritifs, se traduisant dans les pratiques telles que l'essartage (récolte du sous-bois) et le soutrage (récolte des litières, voire des humus) par un transfert de fertilité des forêts vers les sols agricoles. Les sols de très anciennes forêts sont donc le plus souvent des sols relativement plus pauvres que les sols agricoles comparables. Par contre, les sols forestiers issus de déprises agricoles se trouvent enrichis en phosphore (P) et calcium (Ca) par le résidu de fumures souvent organiques et leur fonctionnement est relativement spécifique par rapport aux sols des forêts immémoriales (Koerner *et al.*, 1997). C'est le cas en particulier de l'azote (N) : les anciennes terres agricoles des Vosges présentent une nitrification plus élevée que les sols analogues qui n'ont jamais été mis en culture (Jussy, 1998) ; c'est le cas aussi du phosphore auquel son cycle biologique confère une certaine permanence dans l'écosystème.

On peut donc penser que la production des plantations réalisées sur d'anciennes terres agricoles (dont beaucoup ont été subventionnées par le Fonds forestier national) ne représente pas le potentiel réel du sol, mais celui lié pour partie au reliquat de l'enrichissement agricole. Il faudra tenir compte de ce phénomène qui pourrait conduire, dans les nouvelles générations, à un ré-équilibre de la production dépendant du niveau de fertilité auquel reviendra le sol forestier.

Les statistiques portant sur la comparaison entre les sols agricoles et forestiers montrent les grandes tendances suivantes (Badeau *et al.*, 1999) :

- concernant les classes de sols : les sols bruns, les sols hydromorphes, les podzols et les rankers sont plus représentés en forêt qu'en terrain agricole ; à l'inverse, les sols alluviaux et les sols lessivés sont plus représentés dans les terrains agricoles ; les autres classes ne montrent pas de différence réellement significative ;
- les sols forestiers sont nettement plus acides (1,5 unité pH de moins sur la médiane), contiennent significativement plus de matière organique et présentent une capacité d'échange cationique plus faible quand ils sont acides et plus élevée quand ils sont basiques (figure 1, ci-dessous).

Figure 1 **SOLS FORESTIERS FRANÇAIS (réseau systématique 16 x 16 km) ET SOLS AGRICOLES (données ENSA)**



LES ÉVOLUTIONS CONSTATÉES AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES

L'acidification des sols

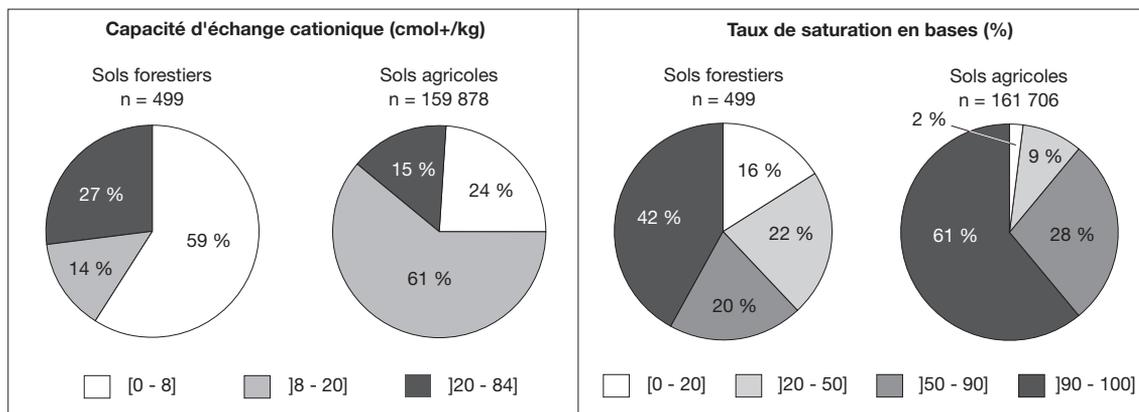
L'acidification du sol doit s'entendre comme la perte des réserves totales caractérisant le pouvoir tampon du sol : elle se répercute éventuellement sur la capacité d'échange cationique (CEC) et son degré de saturation en bases échangeables (S/T) (proportion de calcium, magnésium et potassium sur les sites disponibles, le reste étant occupé par des cations acides, aluminium et hydrogène) ainsi que sur le pH du sol. La baisse de pH et ses corollaires concernant la CEC et le taux S/T de saturation du sol, qui a lieu quand un système tampon est épuisé, ont les conséquences les plus immédiates et les plus importantes sur la biologie de l'écosystème (il y a plusieurs systèmes tampons, les carbonates, les silicates, le complexe d'échange, la matière organique, l'aluminium puis le fer, dont certains peuvent d'ailleurs fonctionner dans une même gamme de pH) (Bonneau *et al.*, 1987). En effet, la flore et la faune réagissent fortement à ce paramètre, directement ou indirectement.

L'approche diachronique, dans laquelle certaines zones ou certains sites observatoires de sols forestiers sont ré-échantillonnés à différentes dates, sur le moyen, et surtout sur le long terme, constitue la seule approche directe permettant de déceler ces évolutions de la chimie et de la physico-chimie des sols. Des contraintes importantes concernant la représentativité de l'échantillonnage, l'absence de biais spatial et temporel lors des prélèvements successifs et l'homogénéité des méthodes analytiques employées, pèsent sur cette méthode. Les observatoires permanents, suivis pour des critères multiples, sont les plus intéressants pour interpréter les tendances observées : ce sont l'Observatoire de la Qualité des Sols (OQS) (qui n'existe plus actuellement mais dont les sites seront repris dans une nouvelle structure d'observation ; Bonneau, 1997), le Réseau National de suivi des ÉCOsystèmes FORestiers (Rénécofor) (Ulrich, 1995), ou encore les observatoires ponctuels de recherche (Poszwa *et al.*, 1998).

En réalité, il existe peu de situations étudiées, et la généralisation reste problématique, car la représentativité spatiale des données n'est pas garantie dans ces observatoires implantés de manière non systématique (Badeau et Ulrich, 1998). La situation s'améliorera quand les sites du réseau Rénécofor auront subi plusieurs échantillonnages successifs.

Les résultats montrent que la désaturation est observée dans plusieurs sites au cours des dernières décennies, et qu'elle se situe le plus fréquemment dans les horizons supérieurs des sols acides.

INRA - Rennes). Comparaison de quelques propriétés dans la couche minérale 0-20 cm (Badeau *et al.*, 1999)



C'est le cas pour les sols des hêtraies de montagne et de plaine du Nord-Est de la France (Thimonnier, 1994 ; Dupouey *et al.*, 1998), les sols sur grès des Vosges (Lefèvre, 1997), les sols de la forêt d'Aubure (Dambrine *et al.*, 1998) et les sols de Coat-an-Noz (Bretagne) (Nys, 1997). Les sols du site du Donon (Vosges), échantillonnés à 10 ans d'intervalle, ne font apparaître que des fluctuations de la couche hologranique, qui a contribué à des pertes d'éléments, alors que la couche organominérale sous-jacente ne montre pas de modifications significatives (Bonneau, 1997). Ces résultats mettent en évidence les difficultés et les limites d'un ré-échantillonnage unique et l'intérêt des observatoires suivis régulièrement sur le long terme, éliminant les fluctuations qui ne peuvent correspondre qu'à des épiphénomènes, difficiles à replacer dans une tendance significative (Richter *et al.*, 1994). Il n'existe malheureusement que peu d'études de référence sur l'évolution des sols au cours des révolutions forestières (Page, 1968).

L'acidification des sols forestiers a des origines très diverses qui tendent cependant souvent à se cumuler en sol acide. Elle prend une importance maximale dans les écosystèmes traités extensivement, et *a fortiori* semi-intensivement, quand les récoltes et le traitement des rémanents conduisent à des exportations élevées, sans restitution d'éléments minéraux par fertilisation. Ces causes sont les suivantes :

- l'évolution naturelle d'écosystèmes sans intrants artificiels (production d'acides organiques par les humus, respiration des organismes responsables de la présence d'acide carbonique dans les solutions du sol, drainage de cations basiques, découplages ⁽¹⁾ dans les cycles liés aux fluctuations climatiques ou à des phénomènes momentanés de mortalité, d'attaques parasitaires, d'incendies, etc.) ;

- les variations inter-annuelles d'origine climatique ou biologique, conduisant à des fluctuations du stock organique et/ou à des découplages du bilan de protons (en particulier au niveau des prélèvements / restitution / minéralisation), qui interviennent de manière non négligeable dans le fonctionnement à long terme des sols ;

- la production, la récolte de matière sèche et le traitement des rémanents (déséquilibre naturel anions-cations dans le prélèvement des végétaux ; exportation de cations "basiques" hors de l'écosystème) ;

- les apports atmosphériques acides ou générateurs d'acidité (action directe ou indirecte telle que celle de l'apport d'ammonium quand ce dernier se transforme en nitrate et n'est pas totalement absorbé, laissant de l'acide nitrique dans le sol). D'après les données des réseaux Mera (MESures des Retombées Atmosphériques, École des Mines de Douai) et Cataenat (sous-réseau du réseau Rénécofor qui mesure les apports atmosphériques), plus de la moitié des précipitations récoltées sur l'ensemble des sites d'observation sont acides, c'est-à-dire plus acides que l'acidité considérée comme naturelle, dont le rôle est en soi important (l'équilibre avec CO₂ atmosphérique donne un pH de l'ordre de 5,5 à 5,6) (Ulrich *et al.*, 1998) ;

- le changement d'utilisation des sols, conduisant à des modifications de la minéralisation de la matière organique (le flux de minéralisation et la nitrification associés induisent des excédents d'éléments par rapport aux besoins des végétaux, entraînant des pertes par drainage).

"L'eutrophisation" des sols

Ce terme est employé par analogie avec l'augmentation du contenu en azote et phosphore des lacs, qui se traduit par un développement important de la biomasse (végétale voire animale) par rapport à un milieu habituellement pauvre (oligotrophe).

(1) Les découplages dans les processus s'entendent ici comme des anomalies perturbant des phénomènes qui, en fonctionnement normal, se compensent, au moins en terme de bilan : c'est typiquement le cas d'un flux instantané (flush) de minéralisation d'azote qui a lieu lors de la réhumectation du sol après une période sèche et chaude assez longue. L'offre instantanée du sol dépasse alors la demande des végétaux et conduit à une nitrification résiduelle se traduisant par une acidification, dans un contexte général d'équilibre.

Les apports atmosphériques, même faibles, se traduisent par des entrées significatives d'éléments dans les écosystèmes. Ces entrées concernent l'azote, le soufre et les cations, dont le rôle fertilisant est indiscutable. Les données du réseau Cataenat et des sites-ateliers de recherche, où sont mesurés ces apports, conduisent aux valeurs du tableau I (p. 54). Ces données concernent les apports par la pluie et les dépôts secs quantifiés à partir des mesures de pluviollessivats. Pour l'azote, le prélèvement direct au niveau des houppiers a été estimé à partir des données de la littérature. D'une manière générale, les valeurs extrêmes correspondent à des zones singulières et les moyennes ou médianes sont les plus intéressantes. Pour N, les valeurs extrêmes correspondent à des zones très propres ou très polluées ; pour Ca, les chiffres les plus élevés correspondent aux mesures effectuées sous le vent des sols agricoles calcaires ou dans les sites recevant des précipitations sahariennes contenant calcite et gypse (cas du Mont Lozère, Didon-Lescot, 1996). Les cartes obtenues à partir du sous-réseau Cataenat de Rénécofor commencent à fournir des indicateurs spatiaux fiables (figure 2, ci-dessous).

Il est important de préciser que les proportions entre éléments varient en fonction de l'origine des apports, créant par là-même des équilibres variés entre éléments, ce qui n'est pas sans incidence sur la nutrition des végétaux. Par exemple, l'équilibre Ca/N est très différent pour une pluie "saharienne" (donnant une pellicule rougeâtre en raison de sa richesse en oxyde de fer, mais contenant

Figure 2

CARTE DES DÉPÔTS ATMOSPHÉRIQUES EN FRANCE
Valeurs moyennes du réseau Cataenat entre 1993 et 1996 (données en kg/ha/an)
 (Ulrich *et al.*, 1998)

Le rapport Apports hors couvert / Apports sous couvert est donné pour des placettes repérées par leur essence principale et le numéro de département

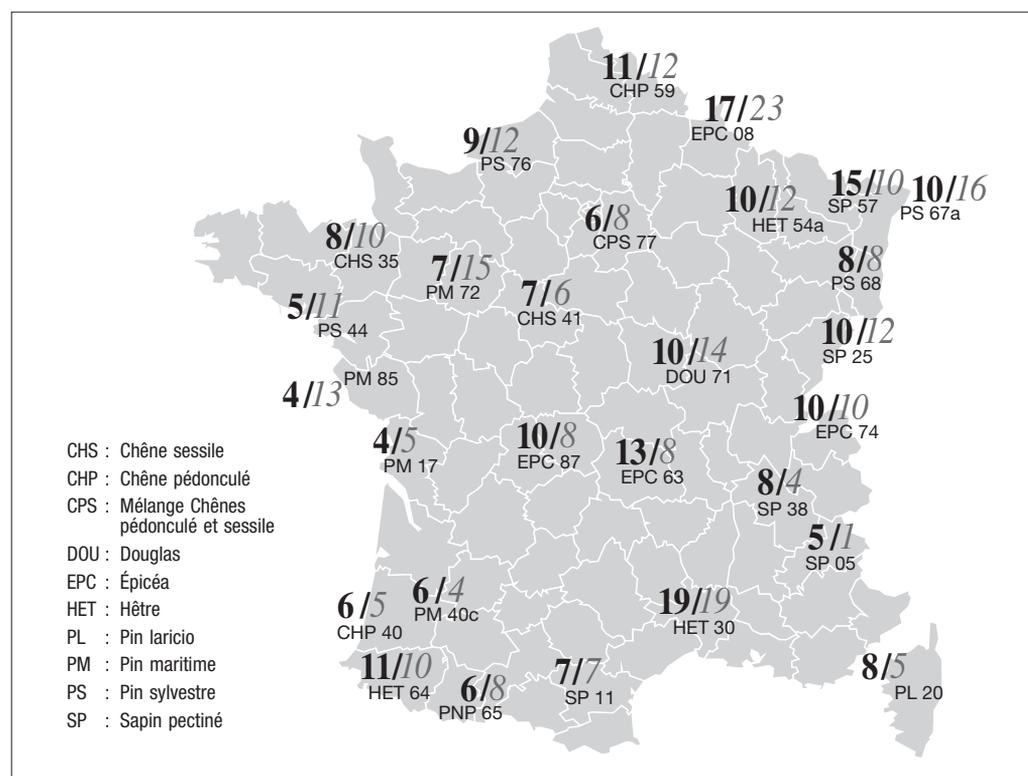


Tableau I

**Apports atmosphériques hors et sous couvert
mesurés dans le réseau Rénécofor entre 1993 et 1996
ou issus des données de diverses mesures entre 1966 et 1990**
(Ulrich et Williot, 1993; Ulrich *et al.*, 1999)

	Apports hors couvert		Apports totaux sous couvert		
	Valeur moyenne	Amplitude	Valeur moyenne	Amplitude	Dépôt atmosphérique total au sol ⁽¹⁾
Azote nitrique	4	2-8	5	0-12 ⁽²⁾ (1-33) ⁽³⁾	
Azote ammoniacal	5	2-11	5	0-10 (1-33)	
Azote	9		10		15
Soufre	7	4-19	12	6-37 (10-95)	12
Sodium	12	2-49	23	2-136 (4-62)	23
Potassium	2	1-3	22	11-37 (5-74)	3
Calcium	7	2-18	12	6-24 (4-48)	10
Magnésium	2	0-7	4	1-19 (1-13)	2

(1) calcul approximatif; (2) données de Rénécofor; (3) autres données.

également de nombreux minéraux dont de la calcite) et pour un embrun marin (ayant approximativement la composition de l'eau de mer). La solubilité de l'élément apporté est bien entendu également très importante et on conçoit la différence d'intérêt entre un apport particulaire et un apport d'élément en solution.

Le devenir de ces apports dépend de leur intensité, de l'état de richesse du sol qui les reçoit, de leur forme chimique, et de la demande de la végétation. Si la fertilité des sols est faible et si les apports sont limités, ces derniers vont être, dans leur grande majorité, retenus par le sol puis absorbés par la végétation. Si les apports sont élevés, quelle que soit la fertilité du sol, une partie d'entre eux est absorbée, une partie est stockée dans le sol (selon leur solubilité, la capacité de stockage et le degré de saturation du sol) et une partie est perdue par drainage. Ces dernières pertes sont particulièrement importantes pendant la saison humide, quand le sol est saturé en eau, que le drainage est important et que les végétaux sont en phase de dormance (cas de l'hiver en climat tempéré). La figure 3 (p. 55) montre la corrélation entre les pertes par drainage et les apports atmosphériques (Dise *et al.*, 1998) : le seuil moyen de saturation en azote du sol se situe aux environs de 15 kg/ha/an d'apport dans les pluviocultures, mais les fluctuations sont importantes en fonction des situations.

Si un élément est apporté de manière importante, par exemple l'azote, il entraîne une augmentation de production (l'azote est en général un facteur limitant primaire) et par conséquent une augmentation de l'absorption des autres éléments dont certains peuvent devenir limitants secondaires de la

Figure 3
**RELATION ENTRE
 LES APPORTS ATMOSPHÉRIQUES
 ET LES PERTES PAR DRAINAGE
 D'AZOTE MINÉRAL**
 (les sites où NH_4 domine
 sont figurés par des triangles)
 (Dise *et al.*, 1998)

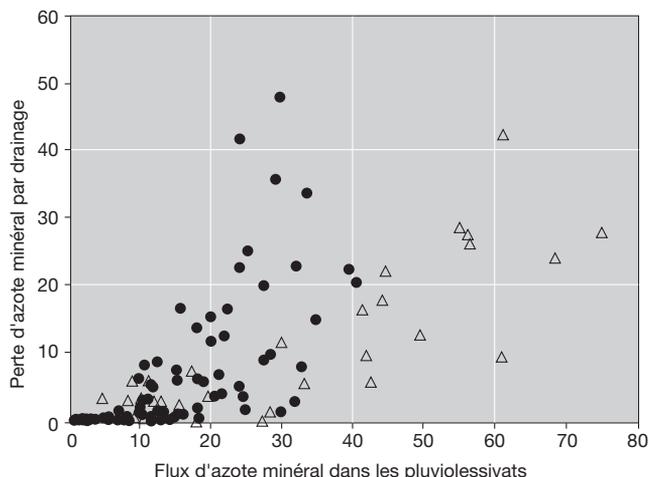
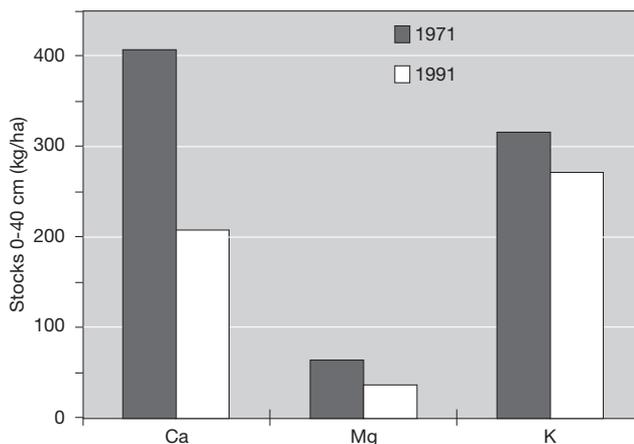


Figure 4
**ÉVOLUTION DES STOCKS DE CATIONS
 DANS LES HÊTRAIES ADULTES
 SUR SOLS ACIDES
 DU NORD-EST DE LA FRANCE
 AU COURS DE LA PÉRIODE 1971-1991**
 (28 placettes, stocks mesurés
 dans la couche 0-40 cm de profondeur)



production (selon la loi agromique bien connue du ou des facteurs limitants secondaires). Cette notion de déséquilibre est très importante et Nys *et al.* (1987) ont provoqué le dépérissement d'un peuplement d'Épicéa commun dans les Ardennes, en apportant une fertilisation élevée mono-élément d'azote ; l'acidification du sol a également contribué dans ce cas au dépérissement. Une forte interaction peut aussi se manifester avec l'alimentation en eau (Becker, 1992).

Les travaux menés sur les chênaies et hêtraies du Nord-Est par Dupouey *et al.* (1998) montrent que l'azote apporté par les dépôts atmosphériques se stocke pour partie dans les sols, probablement par des processus d'organisation liés à la microflore et à l'amélioration de la nutrition azotée de la végétation, conduisant à des restitutions par les litières plus riches en N. Cette augmentation du stock d'azote du sol se traduit sur la composition des communautés végétales où la proportion d'espèces nitrophiles a augmenté significativement depuis les années 1970 (Dupouey *et al.*, 1999). Parallèlement, une désaturation du complexe adsorbant des sols est observée (pertes significatives de cations nutritifs basiques et augmentation de l'aluminium échangeable) (figure 4, ci-dessus).

On peut aisément prévoir un problème de déséquilibre nutritif potentiel, si ces deux phénomènes continuent d'évoluer dans le même sens.

L'évolution de la fertilité minérale des sols jugée par les bilans entrées-sorties

• Rappel de quelques définitions

Il faut faire la différence entre, d'une part, la fertilité minérale actuelle ou instantanée d'un sol, définie à partir des analyses de sol ⁽²⁾, qualitativement (détermination des seules concentrations) voire moins fréquemment quantitativement (détermination des stocks) et, d'autre part, la fertilité à moyen et long terme définie comme le stock total d'éléments dans un sol, sans référence à une disponibilité pour la végétation. Le flux entre ces deux compartiments détermine la capacité du sol à reconstituer sa fertilité actuelle, suite aux exportations d'éléments hors de l'écosystème. Ce flux d'éléments est issu de l'altération des minéraux du sol, par des mécanismes physiques (division et augmentation des surfaces), chimiques (par dissolution liée surtout à la neutralisation des acides) et biologiques (mécanismes liés à l'activité biologique qui engendre des acides faibles ou forts, complexes ou non), et de la minéralisation de la matière organique. Il constitue, avec les apports atmosphériques, les seules entrées des écosystèmes traités extensivement.

La fertilité minérale d'un sol forestier n'est pas une donnée statique, mais résulte d'une somme de mécanismes dans lesquels la plante intervient largement : c'est le cycle biologique ou biogéochimique, dont l'état de fonctionnement détermine la perpétuation de la vie sur la planète (Ranger et Bonneau, 1984). Il s'agit, d'une part, du prélèvement d'éléments dans les réserves disponibles du sol et, d'autre part, des restitutions d'éléments par la matière morte (litière de feuilles, branches et racines), qui ramènent dans la partie superficielle du sol des éléments puisés sur tout le profil d'enracinement des végétaux. Ces éléments, principalement sous forme organique, redeviendront disponibles pour la végétation après la phase cruciale de minéralisation, contrôlée par des processus biologiques. Ce mécanisme est particulièrement important en sol acide pour les cations "basiques" (en particulier le calcium qui ne forme pas, en sol acide, de composés secondaires après libération à partir des minéraux primaires), sinon ceux-ci auraient disparu des horizons supérieurs du sol où se localise majoritairement l'enracinement des arbres.

Les observations quantitatives réalisées sur les écosystèmes montrent que la fertilité minérale d'un sol forestier résulte plus de la capacité de l'écosystème à recycler ses éléments qu'à une valeur absolue, souvent faible, des stocks biodisponibles existants. L'expérience récente, qui a consisté à couper les retours de potassium par les pluviostivats, a conduit immédiatement à des carences potassiques (Gundersen *et al.*, 1998). Cette fertilité présente donc un caractère vulnérable, dans la mesure où la quantité d'éléments mise en jeu est susceptible de décroître rapidement si les pratiques sylvicoles sont inadaptées à un écosystème à faibles intrants (exportations fortes directes ou indirectes, liées à des pratiques telles que l'andainage, qui consiste à regrouper les rémanents sur des lignes, ou l'incinération de rémanents). En effet, la capacité de restauration de la fertilité actuelle du sol est toujours limitée en sol acide.

• Établissement des bilans de fertilité minérale

Le bilan de fertilité représente la méthode de référence, qui permet de déterminer si la fertilité du sol est en cours ou non de dégradation, avant que les manifestations néfastes ne puissent être observées. Cette méthode consiste à faire le bilan des entrées et des sorties de l'écosystème. Ces flux doivent auparavant être identifiés et quantifiés sur une période de temps significative du cycle

(2) La fertilité actuelle d'un sol représente les éléments facilement disponibles pour la végétation, souvent appelés éléments assimilables ou biodisponibles et extraits par des réactifs en général peu agressifs. En termes physico-chimiques, ce sont l'azote minéral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$), le phosphore minéral ou organique labile, orthophosphates fixés sur des sites d'échange anionique ou faiblement adsorbés sur la phase solide organique ou minérale, les éléments fixés en site échangeable cationique (cations "basiques", Ca, Mg, K, Mn, Na).

Les changements climatiques et la situation de la forêt française

de développement des peuplements. C'est une difficulté importante pour les écosystèmes forestiers où la longévité des essences est grande (Ranger et Turpault, 1999).

Les principaux termes du bilan sont les suivants (Ranger et Bonneau, 1984) :

Entrées = apports atmosphériques totaux, altération des minéraux du sol, fixation d'azote atmosphérique, fertilisants ou amendements s'ils existent,

Sorties = exportations par les récoltes, pertes par drainage pendant la révolution et lors des récoltes, volatilisation d'azote (dénitrification).

Le bilan est en général réalisé sur les éléments biodisponibles pour les végétaux et pour des pas de temps allant de la saison à la révolution forestière complète. Les observations sont réalisées sur une période de 3 à 10 ans, pour les principaux stades de développement du peuplement, n'incluant pas toujours la phase de récolte et de régénération ; le bilan moyen annuel pour la révolution complète résulte d'une extrapolation des données précédentes.

Tableau II **Sites où ont été calculés des bilans de fertilité
(INRA Cycles biogéochimiques Nancy)**

Essence	Site	Milieu	Référence
Pin laricio de Corse 15 ans (témoin + fertilisé) . . .	Forêt de Moulières (86)	altitude: sol: brun lessivé dégradé sur limon et argiles à silex pluviométrie: 1 000 mm	Ranger, 1981
Feuillus mélangés/ Épicéa commun (45 ans) . . .	Forêt de Château- Regnault (08)	altitude: sol: brun acide pluviométrie: 1 000 mm	Nys, 1987
Épicéa commun (75 ans) (T, amendement, amendement + fertilisation) .	Col du Bonhomme (88)	altitude: 1 100 m sol: podzolique sur granite du Valtin pluviométrie: 1 000 mm	Ranger <i>et al.</i> , 1994
Épicéa commun (85 ans) . . .	Gemaingoutte (88)	altitude: sol: brun acide sur granito-gneiss pluviométrie: 1 000 mm	Mohamed et Ranger, 1994
Épicéa commun (15, 40, 85 ans); Hêtre (125 ans)	Forêt d'Aubure (67)	altitude: 1 100 m sol: brun acide à podzolique sur granite du Brézouard pluviométrie: 1 400 mm	Dambrine <i>et al.</i> , 1995
Douglas (20, 40, 60 ans) . . .	Massif des Aiguillettes (Vauxrenard Beaujolais - 69)	altitude: 750 m sol: brun acide sur tuf volcanique pluviométrie: 1 000 mm	Marques <i>et al.</i> , 1997
Hêtre 10, 25, 85 (témoin + fertilisé) et 145 ans	Forêt de Fougères (35)	altitude: 180 m sol: brun acide à lessivé dégradé pluviométrie: 890 mm	Nys <i>et al.</i> (en cours)

Tableau III Exemples de résultats de bilans entrées-sorties établis ponctuellement pour un stade de développement (données en kg/ha/an)

	N	K	Ca	Mg
Château-Regnault (Ardennes) (Nys, 1987)				
- Feuillus mélangés	-1,9	+ 7,7	+ 3,4	-0,1
- Épicéa commun	+2,6	+2,0	+1,3	+0,3
Gemaingoutte (Vosges) (Ranger <i>et al.</i> , 1994)				
- Épicéa	-6,3	+27,8	-4,7	-2,0
Col du Bonhomme (Vosges) (Mohamed <i>et al.</i> , 1992)				
- Épicéa témoin	-6,1	+12,7	-0,6	-1,6
- Épicéa amendé (CaMg)	-7,5	+14,7	-6,8	-10,3
- Épicéa amendé + fertilisé	-14,9	+8,7	-9,7	-18,0

	Aubure 15 ans				Aubure 35 ans				Aubure 85 ans			
	N	Ca	Mg	K	N	Ca	Mg	K	N	Ca	Mg	K
Entrées												
Dépôt atmosphérique ..	13,0	4,0	1,0	2,0	11,7	6,4	1,4	2,9	18,2	8,3	1,6	3,3
Altération		0,2	0,85	6		0,2	0,85	6		0,2	0,85	6
Total 1	13,0	4,2	1,85	8,0	11,7	6,6	2,25	8,9	18,2	8,5	2,45	9,3
Sorties												
Biomasse	5,9	4,7	0,6	4,7	10,2	10,7	1,2	7,5	3,3	3,7	0,4	1,7
Drainage	1,8	10,5	1,8	9,6	4	2,6	1,3	6,6	22,4	11,5	2,3	11
Total 2	7,7	15,2	2,4	14,3	14,2	13,3	2,5	14,1	25,7	15,2	2,7	12,7
Bilan 1-2	5,3	-11,0	-0,6	-6,3	-2,5	-6,7	-0,3	-5,2	-7,5	-6,7	-0,3	-3,4
	Vauxrenard 25 ans				Vauxrenard 45 ans				Vauxrenard 65 ans			
	N	Ca	Mg	K	N	Ca	Mg	K	N	Ca	Mg	K
Entrées												
Dépôt atmosphérique ..	17,0	4,0	0,7	2,5	20,6	5,7	1,0	3,5	19,5	7,3	1,3	4,4
Altération		0,9	1,0	7,5		0,9	1,0	7,5		0,9	1,0	7,5
Total 1	17,0	4,9	1,7	10,0	20,6	6,6	2,0	11,0	19,5	8,2	2,3	11,9
Sorties												
Biomasse	4,7	1,7	0,5	6	9,2	5,6	0,8	6,9	6,2	5,8	0,4	7,1
Drainage	38,9	21,7	9,1	22,7	25,2	10,2	5,1	7,7	6,3	5,1	1,9	4,9
Total 2	43,6	23,4	9,6	28,7	34,2	15,8	5,9	14,6	12,5	10,9	2,3	12,0
Bilan 1-2	-26,6	-18,5	-9,2	-18,7	-13,6	-9,2	-3,9	-3,6	7,0	-2,7	0	-0,1

Les résultats permettent de tirer des conclusions sur les pratiques sylvicoles compatibles avec la pérennité de la fertilité des sols forestiers et, le cas échéant, de fournir les données nécessaires à la restauration de cette fertilité.

Compte tenu de la longévité des peuplements forestiers, des chronoséquences sont le plus souvent utilisées pour simuler la dynamique de la fertilité au cours des phases de développement des peuplements. La méthodologie doit être appropriée pour intégrer les variations spatiales et temporelles et conduire à des bilans fiables. Malheureusement, la lourdeur de cette approche ne permet pas d'avoir accès à cette information pour tous les écosystèmes. Il faut donc avoir recours à des diagnostics établis à partir de données partielles, le plus souvent qualitatives, qui peuvent être utilisées comme indicateurs, après calibration dans des réseaux d'observation du type Rénécofor ou réseau européen.

• *Résultats*

Les résultats proviennent en France d'un nombre limité de sites d'observation, dont la majorité n'a pas fait l'objet d'une approche permettant de déterminer la dynamique de l'écosystème. La majorité de ces travaux a porté sur des essences résineuses, parfois comparées à des feuillus, dans des situations de sols acides, là où les problèmes potentiels de baisse de fertilité sont susceptibles de se produire : production non négligeable, réserves limitées, traitement semi-intensif (tableau II, p. 57). Des travaux sont en cours de réalisation sur le Hêtre.

Malgré des incertitudes existant encore dans la quantification de certains flux, les résultats montrent que les bilans instantanés (établis pour un stade de développement à partir d'observations portant sur quelques années) sont souvent déséquilibrés pour les éléments majeurs comme N, Ca et Mg, traduisant une baisse de la fertilité des sols (à court et long terme) et une acidification, dans ces situations (tableau III, p. 58 et tableau IV, ci-contre, lignes bilans autres que pour la révolution forestière complète). L'interprétation du bilan sans autre connaissance du site est très délicate, car des causes différentes peuvent conduire au même résultat. La signification d'un éventuel déficit dépend bien entendu de la valeur absolue de la réserve du sol.

Les bilans moyens, calculés par extrapolation des précédents pour la révolution forestière pour les sites d'Aubure (Vosges) et de Vauxrenard (Monts du Beaujolais), permettent de quantifier les pertes totales associées aux aménagements forestiers (il faudrait prendre en compte les phases de coupe et régénération) (tableau IV, ci-contre). Cette donnée n'est toujours pas plus explicative, mais permet de quantifier les pertes éventuelles en vue des restitutions dans le cadre d'une gestion durable.

Aubure révolution				
	N	Ca	Mg	K
	14,6	6,8	1,4	2,9
		0,2	0,85	6
	14,6	7,0	2,25	8,9
	4,7	5,2	0,6	2,6
	12,7	6,8	1,8	8,7
	17,4	12,0	2,4	11,3
	-2,8	-5,0	-0,2	-2,4
Vauxrenard révolution				
	N	Ca	Mg	K
	19,0	5,7	1,0	3,5
		0,9	1,0	7,5
	19,0	6,6	2,0	11,0
	6,7	4,4	0,6	3,3
	23,5	12,3	5,4	11,8
	30,2	16,7	6,0	15,1
	-11,2	-10,1	-4,0	-4,1

Tableau IV
Bilans entrées-sorties calculés sur des chronoséquences pour la pessière d'Aubure (Vosges) et la douglasaie de Vauxrenard (Beaujolais)
 (données en kg/ha/an)

Ces résultats sont très intéressants mais ne permettent pas de conclure quant à la capacité de restauration de la fertilité actuelle du sol. En effet, la capacité du sol à soutenir une production dépend plus de sa fertilité actuelle que de sa fertilité totale, qui n'intéresse que le long terme. L'important va donc être de déterminer si les pertes sont significatives par rapport à des stocks et quelles sont les conditions sylvicoles qui sont susceptibles de permettre à l'écosystème de retrouver sa fertilité actuelle.

Les exemples des forêts d'Aubure et de Vauxrenard démontrent bien l'intérêt de l'approche par chronoséquences, malgré les limites qui ont été soulignées. Les résultats figurant au tableau IV (p. 58) montrent que les bilans moyens, établis sur la révolution complète, sont négatifs : la fertilité totale des sols a diminué dans les deux cas. L'observation de la dynamique des bilans au cours de la révolution forestière montre des nuances importantes entre les deux situations :

— à Aubure, le déficit du bilan est constant tout au long de la révolution, mais pour des raisons très différentes entre un peuplement de 40 ans et celui de 85 ans : dans le jeune peuplement, la production est élevée, la consommation d'éléments nutritifs forte, le drainage limité. L'inverse se produit dans le peuplement âgé, où la production diminue et où le drainage augmente notablement. Les déficits montrent au total une valeur identique dans les deux situations, toujours significative par rapport aux réserves faibles de ce sol acide.

— à Vauxrenard, le caractère négatif du déficit du bilan diminue fortement avec l'âge du peuplement, tendant à s'annuler (sauf pour Ca) dans le peuplement le plus âgé.

Dans le cas d'Aubure, la gestion durable passe par des restitutions obligatoires d'éléments nutritifs par amendement et fertilisation. À Vauxrenard, une révolution de 80 ans associée à la récolte des troncs seuls et un traitement conservatif des rémanents ne devraient pas entraîner de conséquences trop néfastes sur la fertilité du sol pour la génération suivante, la fertilité actuelle du sol étant susceptible de se reconstituer. Les déficits moyens étant élevés, une partie des réserves du sol a cependant disparu et la fertilité totale du sol a baissé. La première génération de Douglas a bénéficié d'un reliquat de fertilité lié au passé agricole de ce site. La déstabilisation de la matière organique, caractérisée par une nitrification très intense, est responsable des pertes par drainage. Cette partie des réserves a définitivement disparu et ne peut se régénérer. On ne sait pas non plus si la neutralisation de l'acidité n'a pas entamé une réserve minérale altérable elle-même disparue. Il est donc peu probable que la productivité du site se maintienne à son niveau actuel, sans pour cela entraîner une baisse catastrophique. Il est impossible de dire à l'heure actuelle quelle est la réaction du Douglas à la baisse éventuelle d'éléments biodisponibles. La perte de calcium est préoccupante, compte tenu du rôle de cet élément sur la stabilité de la structure du sol et sur l'activation des processus biologiques.

Quelle que soit la qualité des observations, les résultats sont uniquement valables pour le site sur lequel ils ont été obtenus, ce qui ne signifie pas que toute extrapolation soit impossible, mais qu'elle nécessite une validation. Les réseaux d'observation, et en particulier les sites de niveaux III du réseau Rénécofor, seront très utiles à cet égard. L'extrapolation des bilans Entrées-Sorties pouvant se faire en utilisant :

- le réseau Cataenat pour les apports atmosphériques (Ulrich *et al.*, 1998) ;
- les relations spécifiques biomasse/minéralomasse pour les exportations lors des récoltes (Augusto *et al.*, 2000) ;
- les pertes par drainage calculées à partir des bilans hydriques (Granier *et al.*, 1999) et des analyses de solutions du sol (Ulrich *et al.*, 1998) ;
- le flux d'éléments issus de l'altération après calibration pour les sols du réseau.

Les résultats obtenus sur des sites en nombre suffisant (sites de recherche et réseau Rénécofor) devraient permettre d'établir des relations statistiques autorisant, d'une part, des extrapolations

régionales à l'aide de Systèmes d'Informations géographiques à l'instar de ce qui a été réalisé pour la cartographie des charges critiques (Dambrine *et al.*, 1993 ; Party *et al.*, 1997 ; Thomas, 1998 ; Party, 1999) et, d'autre part, l'identification d'indicateurs simples de gestion durable de la fertilité minérale des écosystèmes forestiers (pH, S/T, Ca_{ech}, P_{ass}, etc.).

La matière organique des sols et son évolution

La matière organique des sols est un compartiment dont les fonctions sont multiples : support de fertilité minérale, en particulier au niveau de l'azote, support de l'activité biologique, agent important de l'agrégation du sol, anion retenant une bonne partie des cations échangeables dans les horizons supérieurs organiques du sol, etc. Ce compartiment est susceptible d'évoluer rapidement en fonction du changement d'occupation des sols (Trouvé, 1991 ; Arrouays *et al.*, 1994).

La fonction environnementale du carbone des sols a été récemment mise en avant : les sols pourraient amplifier ou limiter l'effet de serre, en stockant ou déstockant des quantités significatives de carbone sous l'effet des changements climatiques, de l'état de santé des peuplements ou des dépôts atmosphériques. On s'intéresse donc depuis peu aux évolutions du "puits" de carbone des sols. En France, la variabilité spatiale du stock de carbone des sols forestiers est mieux connue depuis les études de Nys *et al.* (1995) à partir des bases de données d'analyses de sols forestiers, des synthèses réalisées sur le réseau européen 16 x 16 km (Badeau, 1998) et sur le réseau Rénécofor (Ponette *et al.*, 1997).

Les effets de l'essence dominante et, dans une moindre mesure, du type de sol sont les plus significatifs (tableau V, ci-dessous). Il faut cependant noter que la part de variabilité totale expliquée par ces facteurs demeure faible. Il reste encore beaucoup de précisions à apporter sur les effets du climat et du vieillissement des peuplements, où seules quelques séquences ont été étudiées, provenant des sites-ateliers de recherche (figure 5, p. 62).

Tableau V

Variation du stock de carbone des sols forestiers en fonction du type de sol et de l'essence

Essences	Stock de carbone organique total du sol (t/ha)					
	Rendzines et sols bruns calcaires	Sols bruns calciques	Sols bruns	Sols bruns acides	Podzols, sols lessivés	Sols hydro-morphes
Épicéa commun . .	94	146	136	119	89	90
Sapin pectiné	90	150	165	124	68	64
Douglas			100	139	83	52
Mélèze	119		129	86	66	48
Pin maritime	102		103	136	114	136
Pin sylvestre	101	52	117	123	110	153
Chêne pédonculé .	99	89	100	75	44	78
Chêne sessile	56	114	101	116	128	96
Hêtre	128	114	105	131	85	95

Figure 5

**ÉVOLUTION DE LA RÉPARTITION DU STOCK DE CARBONE
DANS LA VÉGÉTATION, L'HUMUS ET LE SOL AU COURS DE LA ROTATION FORESTIÈRE**

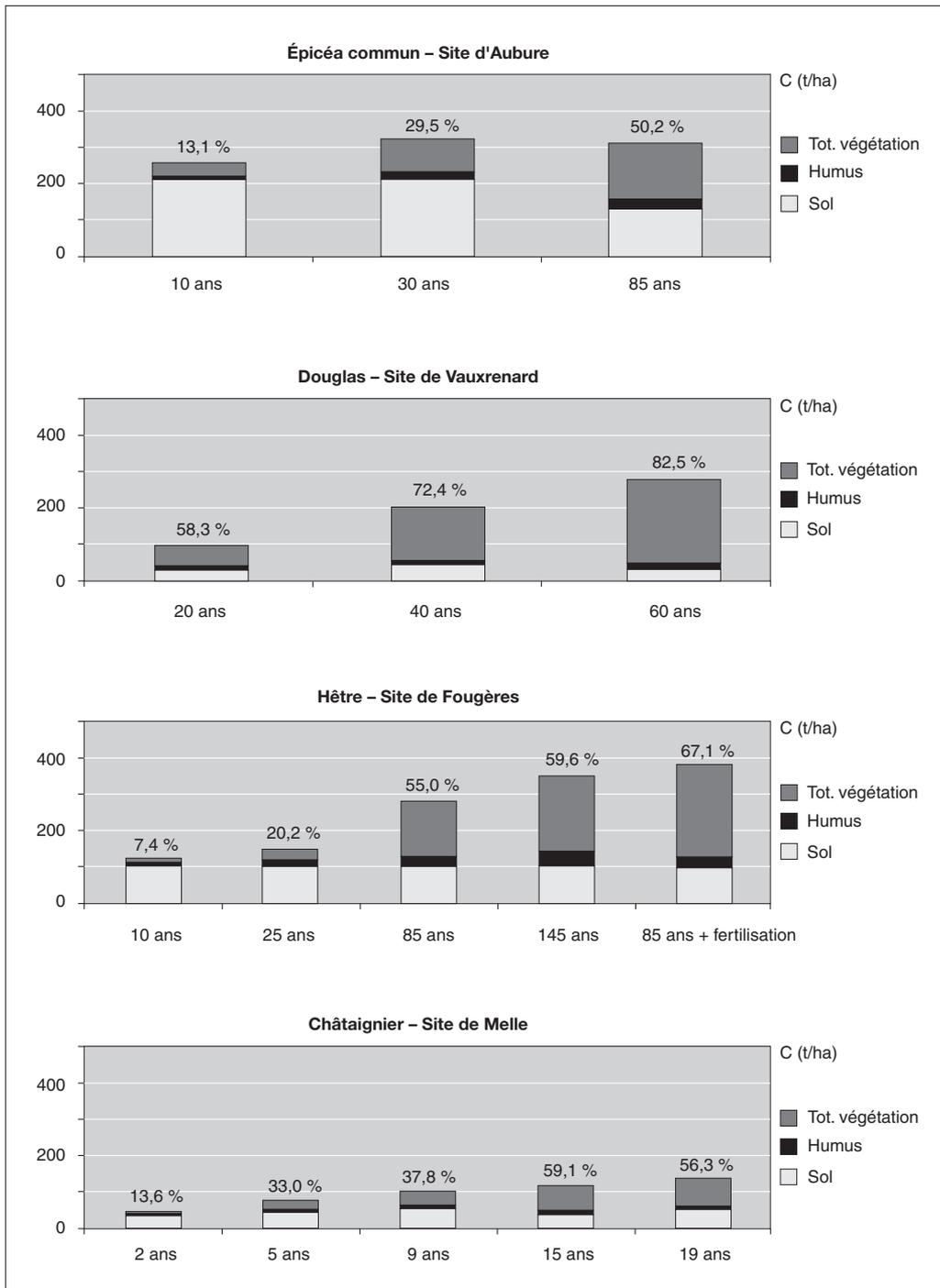
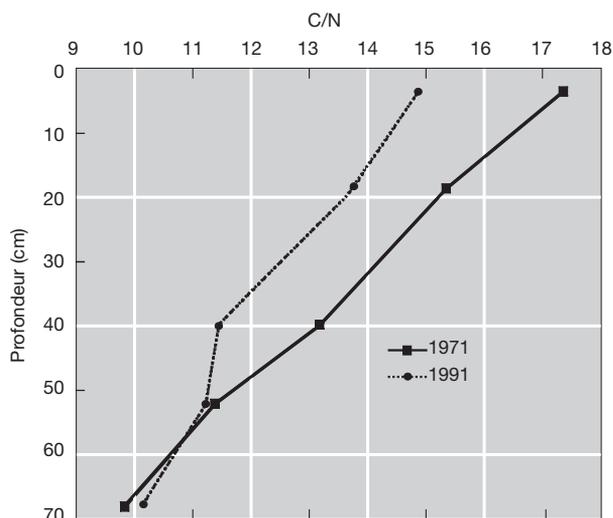


Figure 6
**ÉVOLUTION DU RAPPORT C/N
 ENTRE 1971 ET 1991
 DANS LES HÊTRAIES ADULTES
 DU NORD-EST DE LA FRANCE**
 (moyenne de 90 placettes)



À plus petite échelle, on ne connaît que depuis peu le stock total de carbone des sols du territoire français. Calculé par deux méthodes différentes (Dupouey *et al.*, 1999 et dans ce numéro ; Arrouays *et al.*, 1999), les valeurs obtenues sont proches de 860 MtC pour l'ensemble de la forêt française, soit 70 tC/ha dans la couche 0-30 cm et 9 tC/ha dans la litière. Seule la couche 0-30 cm est prise en compte, car on n'observe pas de variations significatives au-delà, sur des périodes de temps de quelques décennies ou du siècle, même en cas de variations drastiques de l'environnement ; le stock des horizons profonds du sol n'est pas négligeable, en particulier quand celui-ci tend à migrer, comme dans les podzols, les sols andiques ou les sols à caractère isohumique, par exemple.

Le stock de carbone dans un écosystème forestier où le peuplement est adulte montre que le carbone contenu dans la biomasse végétale est du même ordre de grandeur, voire supérieur à celui du sol (James, 1995). La sylviculture peut donc influencer largement sur le stock de carbone des écosystèmes, directement par les récoltes et indirectement par les perturbations du stock de carbone des horizons superficiels des sols, lors des coupes à blanc par exemple.

Les évolutions de ce stock à moyen ou long terme sont quasiment inconnues. Seules deux études de ré-échantillonnage existent en France : les sols des hêtraies du Nord-Est (Dupouey *et al.*, 1998) et l'Observatoire de la Qualité des Sols du Donon (Bonneau *et al.*, 1997).

Les évolutions constatées du stock de carbone au cours des dernières décennies sont peu nombreuses. Les travaux sur ce thème sont ceux de Bonneau (1997) au Donon et ceux du ré-échantillonnage des sols des hêtraies du Nord-Est (Dupouey *et al.*, 1998).

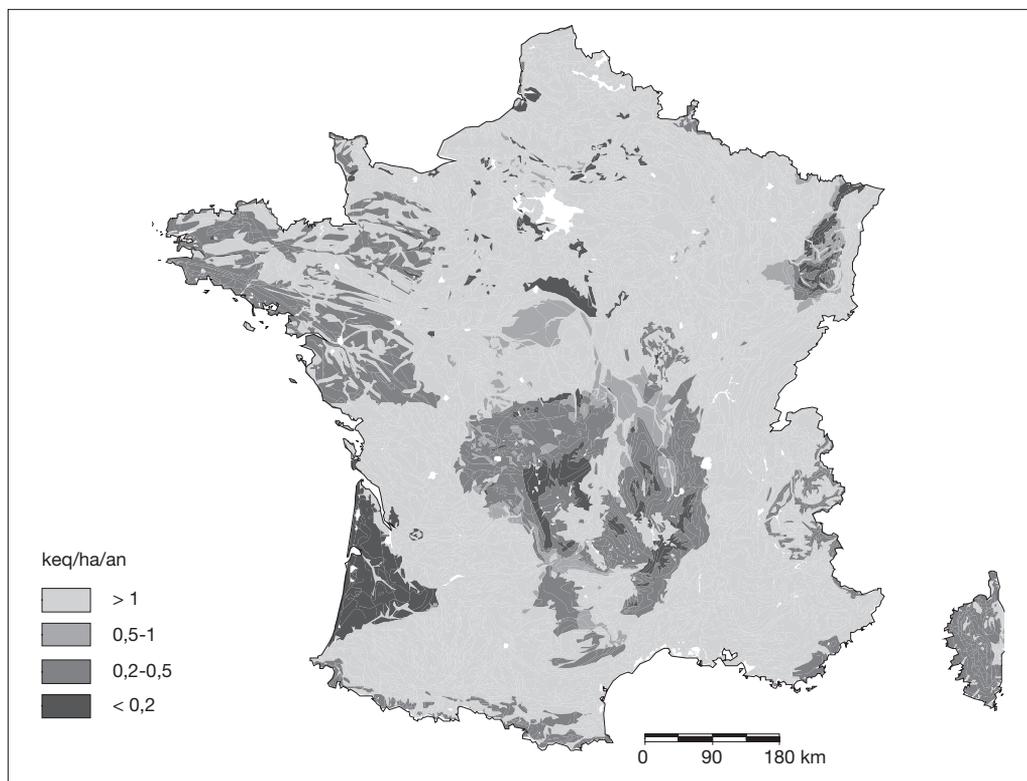
Au Donon, l'évolution observée concerne la couche hologranique dont la fluctuation est importante au cours de la dernière décennie. Cette modification serait liée aux températures élevées au cours de la fin des années 1980, produisant une "fonte" des humus (diminution de 20 % du stock entre 1986 et 1996), dont le carbone est pour partie transféré vers les horizons sous-jacents. Le changement de sylviculture produit également ce genre d'effet.

Dans les sols des hêtraies du Nord-Est, l'évolution du stock de carbone n'est pas significative. Par contre, le stock d'azote augmentant, la qualité de la matière organique s'améliore, avec un rapport C/N qui diminue fortement (Dupouey *et al.*, 1998) (figure 6, ci-dessus).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Les sols forestiers ont en général une fertilité limitée et non renouvelable. Une bonne partie d'entre eux (62 %) sont acides avec un pH inférieur à 5,5. Une carte de susceptibilité des sols forestiers à l'acidification a récemment été publiée par Party (1999) dans le cadre de ses travaux sur les "charges critiques" acides tolérables par les sols (figure 7, ci-dessous). Ces résultats confirment la fragilité des sols développés sur des roches mères pauvres en minéraux altérables de type sables quartzeux, formations à silex, schistes et grès siliceux, granites acides et quelques gneiss. Les régions sensibles sont : les Landes de Gascogne, le grès du bassin Parisien et des Vosges, les roches cristallines et cristallophilliennes acides des Ardennes, de Bretagne, du Massif central, des Vosges. La notion de "charge critique tolérable" peut être généralisée à l'ensemble des contraintes appliquées aux réserves minérales des sols, entre autres celles liées aux interventions sylvicoles. Les données du réseau Rénécofor montrent l'impact d'essences telles que le Pin sylvestre et l'Épicéa (Party, 1999) notamment lorsqu'elles sont implantées en dehors de leur aire écologique d'origine, en n'oubliant pas que ces essences sont souvent plantées sur des sols acides puisqu'elles tolèrent relativement bien cette acidité.
- Leur productivité dépend d'une quantité limitée d'éléments qui circulent rapidement dans l'écosystème. Les essences forestières sont adaptées à cette situation et développent des stratégies

Figure 7
CARTE DE SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ACIDIFICATION
(d'après Party, 1999)



très efficaces de recyclage d'éléments, tant dans la plante elle-même que dans l'écosystème dans son entier.

- Les bilans de fertilité établis, certes, dans des cas de figure spécifiques, mais pouvant être extrapolés aux sols les plus acides, montrent que le système extensif a ses limites. En effet, les sols les plus acides sont ceux dont le complexe adsorbant est désaturé de manière chronique : le flux d'éléments issu de l'altération est pauvre en cations basiques ne pouvant assurer la saturation du sol. Ce sont donc des sols dont la gestion doit être particulièrement exigeante quant au maintien de la fertilité minérale, car les bilans seront très rapidement déséquilibrés avec une augmentation des contraintes sylvicoles.
- Les évolutions récentes montrent que les sols forestiers sont susceptibles d'évoluer rapidement par acidification, désaturation, modification de leur statut organique. Ces évolutions sont le résultat de contraintes diverses : la production, le climat de pollution diffuse, les changements d'occupation des sols, voire les changements climatiques, mais aucun élément ne permet encore de prouver que ce dernier paramètre a réellement une influence en ce moment.
- La gestion durable d'un écosystème, dans le domaine de la fertilité minérale, doit prendre en compte les contraintes environnementales : pour chaque écosystème, il existe une longueur de révolution dite écologique, qui permet l'équilibre "naturel" du bilan de fertilité, sans restitutions (Kimmins, 1974). Cet équilibre porte sur la fertilité actuelle et non sur la fertilité totale du sol, qui ne peut que décroître lentement.

Il est ainsi théoriquement possible de déterminer, pour chaque écosystème, les paramètres sylvicoles qui permettent de ne pas entamer la capacité du sol à produire la biomasse : choix des essences, traitements, longueur de la révolution, intensité de la récolte, mode de récolte et de régénération. La difficulté réside dans la prise en compte d'un environnement changeant, dans la mesure où l'on ne connaît pas les relations précises pour chaque essence entre le statut minéral du sol et la réponse de l'essence.

En première approximation, le stock d'éléments disponibles du sol en différents éléments nutritifs permet de fixer le degré d'intensification à ne pas dépasser. Ces données ne sont qu'indicatives et doivent être améliorées (Bonneau et Ranger, 1999). La relation entre la demande au sol et l'intensification de la sylviculture est nettement mise en évidence dans l'exemple de la figure 8 (ci-contre).

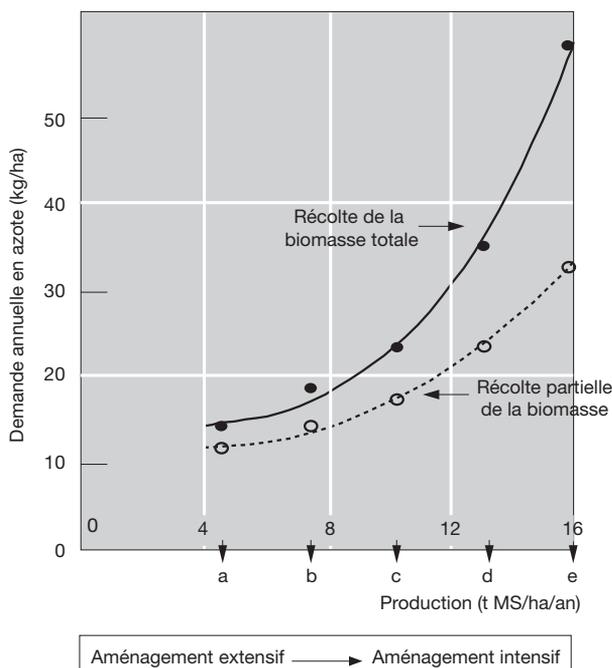


Figure 8
RELATION ENTRE L'INTENSITÉ DE LA SYLVICULTURE ET LA DEMANDE EN AZOTE DU PEUPEMENT
 (Switzer et Nelson, 1973)

• Les contraintes liées aux apports externes s'ajoutent de manière positive (apports "fertilisants") ou négative (apports acidifiants). Les apports atmosphériques azotés peuvent concourir à l'augmentation de la croissance des peuplements, dans la mesure où aucun facteur limitant ne s'exprime. Cette fertilisation peut participer à l'augmentation générale de la production constatée ces dernières années (Becker *et al.*, 1995 ; Spiecker *et al.*, 1996). Si tel est le cas, et quand les apports de cations sont limités, les écosystèmes acides peuvent à la fois se désaturer, accumuler l'azote pour partie et produire plus de biomasse. Il est clair qu'il ne s'agirait dans ces conditions que d'un phénomène initial dans une tendance générale qui conduirait à une baisse de la productivité à plus ou moins long terme.

Jacques RANGER - Étienne DAMBRINE
Claude NYS - Marie-Pierre TURPAULT
Équipe Cycles biogéochimiques
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Vincent BADEAU
Antenne Département Santé des Forêts
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Jean-Luc DUPOUEY
Équipe Phytoécologie
INRA Centre de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX

Erwin ULRICH
Département des Recherches techniques
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU

Jean-Paul PARTY
SOL-CONSEIL
2, rue de Roppenheim
F-67000 STRASBOURG

BIBLIOGRAPHIE

- ARROUAYS (D.), KICIN (J.-L.), PÉLISSIER (Ph.), VION (I.). — Évolution des stocks de carbone des sols après déforestation. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 1, n° 2, 1994, pp. 29-38.
- ARROUAYS (D.), DESLAIS (W.), DAROUSSIN (J.), BALESSENT (J.), GAILLARD (J.), DUPOUEY (J.-L.), NYS (C.), BADEAU (V.), BELKACEM (S.). — Stock de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, numéro spécial "Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural" (séance du 19 mai 1999), vol. 85, n° 6, 1999, pp. 278-292.
- AUGUSTO (L.), RANGER (J.), PONETTE (Q.), RAPP (M.). — Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 57, n° 4, 2000, pp. 313-324.
- BADEAU (V.). — Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers : bilan des opérations de terrain et premiers résultats. — *Les Cahiers du DSF* (Département Santé des Forêts du Ministère de l'Agriculture - DERF), vol. 5, 1998, p. 211 + annexes.
- BADEAU (V.), DAMBRINE (E.), WALTER (C.). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 6, n° 3, 1999, pp. 165-180.
- BADEAU (V.), ULRICH (E.). — Pourquoi les sols du réseau intensif Renécofor sont-ils nettement plus acides que ceux du réseau de surveillance systématique (16 x 16 km). — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (DERF). — *Les Cahiers du DSF*, n° 1-1998 (La santé des forêts, France, en 1997), pp. 81-83.
- BECKER (M.). — Radial growth of mature silver firs (*Abies alba* Mill.) fertilized in 1969. Interaction of climate and competition. In : Tree rings and environment. Proceedings of the International Dendrochronological Symposium, Ystad, South Sweden, 3-9 September 1990 / T.S. Bartholin, B.E. Berglund, D. Eckstein, F.H. Schweingruber Eds. — Lund University, Department of Quaternary Geology, 1992. — pp. 17-21.
- BECKER (M.), BERT (G.D.), BOUCHON (J.), DUPOUEY (J.-L.), PICARD (J.-F.), ULRICH (E.). — Long-term changes in forest productivity in northeastern France : the dendroecological approach. In : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1995. — pp. 143-156.
- BONNEAU (M.). — Observatoire de la qualité des sols du Donon : observations après 10 années. In : Évolution de la fertilité des sols forestiers. Rapport scientifique final rapport contrat CEE DG VI 9560 FR 0040. — 1997.
- BONNEAU (M.), DAMBRINE (E.), NYS (C.), RANGER (J.). — L'Acidification des sols. — *Bulletin d'Écologie*, vol. 18, n° 3, 1987, pp. 127-136.
- BONNEAU (M.), RANGER (J.). — Évolution de la fertilité chimique des sols forestiers. Recommandations pour une gestion durable. — *La Forêt privée*, n° 247, 1999, pp. 51-64.
- DAMBRINE (E.), BONNEAU (M.), RANGER (J.), MOHAMED AHAMED (D.), NYS (C.), GRAS (F.). — Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). pp. 233-258. In : Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1995. — 461 p.
- DAMBRINE (E.), POLLIER (B.), POSZWA (A.), RANGER (J.), PROBST (A.), VIVILLE (D.), BIRON (P.), GRANIER (A.). — Evidence of current soil acidification in spruce stands (Strengbach catchment, Vosges mountains, North-Eastern France). — *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 105, 1998, pp. 43-52.
- DAMBRINE (E.), PROBST (A.), PARTY (J.-P.). — Détermination des "charges critiques" de polluants atmosphériques pour les écosystèmes naturels, en particulier forestiers. Bases théoriques. Projet d'application au cas des Vosges. — *Pollution atmosphérique*, n° spécial "Pollution de l'air et charges critiques", juin 1993, pp. 21-28.
- DIDON-LESCOT (J.-F.). — Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement, sur l'eau et sur les réserves minérales du sol. — Université d'Orléans, 1996. — 161 p. + annexes (Thèse).
- DISE (N.B.), MATZNER (E.), GUNDERSEN (P.). — Synthesis of nitrogen pools and fluxes from european forest ecosystems. — *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 105, 1998, pp. 143-154.
- DUPOUEY (J.-L.), THIMONIER (A.), LÉBOURGEOIS (F.), BECKER (M.), PICARD (J.-F.), TIMBAL (J.). — Changements de la végétation dans les forêts du Nord-Est de la France entre 1970 et 1990. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2 spécial "Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers. Avancées récentes et conséquences sylvicoles", 1999, pp. 219-230.
- DUPOUEY (J.-L.), THIMONIER (A.), LEFÈVRE (Y.), LE TACON (F.), BONNEAU (M.), DAMBRINE (E.), POSZWA (A.), LANDMANN (G.). — Désaturation et enrichissement en azote des sols forestiers du Nord-Est de la France au cours des dernières décennies. — *Revue forestière française*, vol. L, n° 5, 1998, pp. 391-401.
- GRANIER (A.), BRÉDA (N.), BIRON (P.), VILLETTE (S.). — A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. — *Ecological Modelling*, n° 116, 1999, pp. 269-283.
- GUNDERSEN (P.), BOXMAN (A.W.), LAMERSDORF (N.), MOLDAN (F.), ANDERSEN (B.R.). — Experimental manipulation of forest ecosystems : lessons from large roof experiments. — *Forest Ecology and Management*, vol. 101, 1998, pp. 339-352.

- JAMES (I.). — Variation du taux de carbone dans le peuplement, le sol et les solutions. Impact sur le cycle du carbone dans l'écosystème forestier. — Université de Paris XI – Orsay, 1995. — 31 p. + annexes (DEA "Écologie générale et Production végétale" option Écologie fonctionnelle).
- JUSSY (J.-H.). — Minéralisation de l'azote, nitrification et prélèvements radiculaires dans différents écosystèmes forestiers sur sols acides. Effets de l'essence, du stade de développement du peuplement et de l'usage ancien des sols des Vosges. — Université Henri-Poincaré - Nancy I, 1998. — 150 p.
- KIMMINS (J.-P.). — Sustained yield, timber monitoring, and the concept of ecological rotation : a British Columbian view. — *Forest Chronicle*, Feb. 1974, pp. 27-31.
- KOERNER (W.), DUPOUEY (J.-L.), DAMBRINE (E.), BENOÎT (M.). — Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. — *J. Écol.*, vol. 85, 1997, pp. 351-358.
- LE TACON (F.), OSWALD (H.), PERRIN (R.), PICARD (J.-F.), VINCENT (J.-P.). — Les Causes de l'échec de la régénération de Hêtre à la suite de la faînée de 1974. — *Revue forestière française*, vol. XXVIII, n° 6, 1976, pp. 427-446.
- LEFÈVRE (Y.). — Essai de mise en évidence d'une évolution récente du pH et de la teneur en cations basiques de quelques sols forestiers des Vosges (Nord-Est de la France). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 54, 1997, pp. 483-492.
- MARQUES (R.), RANGER (J.), VILLETTE (S.), GRANIER (A.). — Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaujolais Mounts (France). 2 : Quantitative approach. — *Forest Ecology and Management*, vol. 92, 1997, pp. 167-197.
- MOHAMED AHAMED (D.). — Rôle du facteur édaphique dans le fonctionnement biogéochimique de deux pessières vosgiennes : effet d'un amendement calci-magnésien. — Université de Nancy I, 1992. — 136 p. (Thèse).
- MOHAMED AHAMED (D.), RANGER (J.). — The biogeochemical cycle in a healthy and highly productive Norway spruce (*Picea abies*) ecosystem in the Vosges (France). — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 24, 1994, pp. 839-849.
- NYS (C.). — Évolution de la fertilité des sols forestiers sur le site expérimental de Coat-an-Noz : modifications après 20 années. In : Évolution de la fertilité des sols forestiers. Rapport scientifique final rapport contrat CEE DG VI 9560 FR 0040. — 1997.
- NYS (C.). — Fertilisation, dépérissement et production de l'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dans les Ardennes. — *Revue forestière française*, vol. XLI, n° 4, 1989, pp. 336-347.
- NYS (C.). — Fonctionnement du sol et d'un écosystème forestier : étude des modifications dues à la substitution d'une plantation d'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) à une forêt feuillue mélangée des Ardennes. — Université de Nancy I, 1987. — 207 p. (Thèse d'État).
- NYS (C.), DUPOUEY (J.-L.), BALESDENT (J.). — Cycle du carbone dans l'écosystème forestier : impact du milieu et de la sylviculture sur les immobilisations et les flux. pp. 49-56. In : Agriculture et gaz à effet de serre. — *Dossier de l'Environnement de l'INRA Paris*, n° 10, 1995, 98 p.
- NYS (C.), ADRIAN (M.), GELHAYE (L.), GELHAYE (D.). — Essai de fertilisation sur Épicéa commun à la Croix-Scaille (Ardennes). — INRA Nancy – Station Sols forestiers, 1987. — 12 p. (Document interne).
- PAGE (G.). — Some effects of conifer crops on soil properties. — *Commonwealth Forestry Review*, vol. 47, 1968, pp. 52-62.
- PARTY (J.-P.). — Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Taux d'altération sur petits bassins versants silicatés. Application au calcul des charges critiques d'acidité. — Université de Strasbourg, 1999. — 249 p. (Thèse de Doctorat).
- PARTY (J.-P.), PROBST (A.), FEVRIER (C.), DAMBRINE (E.), KING (D.), THOMAS (A.L.). — Les Charges critiques en France. — Rapport scientifique Ademe, 1997. — 59 p.
- PONETTE (Q.), ULRICH (E.), BRÊTHES (A.), BONNEAU (M.), LANIER (M.). — RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : ONF – Département des Recherches techniques, 1997. — 427 p.
- POSZWA (A.), DAMBRINE (E.), POLLIER (B.), FICHTER (J.). — Mise en évidence *in situ* de l'acidification d'un sol forestier. — *Écologie*, vol. 29, n° 1-2, 1998, pp. 333-340.
- RANGER (J.). — Étude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux peuplements de Pin laricio de Corse dont l'un a été fertilisé à la plantation. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, n° 1, 1981, pp. 127-158.
- RANGER (J.), BONNEAU (M.). — Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. — *Revue forestière française*, vol. XXXVI, n° 2, 1984, pp. 93-112.
- RANGER (J.), MOHAMED AHAMED (D.), GELHAYE (D.). — Effet d'un amendement calco-magnésien associé ou non à une fertilisation sur le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans une plantation d'Épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dépérisante dans les Vosges. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 51, 1994, pp. 455-475.
- 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.

Les changements climatiques et la situation de la forêt française

- RICHTER (D.D.), MARKEWITZ (D.), WELLS (C.G.), ALLEN (H.L.), APRIL (R.), HEINE (P.R.), URREGO (B.). — Soil chemical changes during three decades in an old-field loblolly pine (*Pinus taeda* L.) ecosystem. — *Ecology*, vol. 75, n° 5, 1994, pp. 1463-1473.
- SLAK (M.-F.), SURAN (J.-C.). — Influence du traitement sylvicole "futaie ou taillis-sous-futaie" sur la richesse minérale du sol : approche expérimentale. — Nancy : ENGREF, 1982. — 30 p. (Rapport de fin d'études).
- SPIECKER (H.), MIELIKÄINEN (K.), KÖHL (M.), SKOVSGAARD (J.P.) Eds. — Growth trends in European forests. — Berlin : Springer, 1996. — 372 p.
- SWITZER (G.L.), NELSON (L.E.), SMITH (W.H.). — Effet des raccourcissements des révolutions et de la récolte de la biomasse sur la fertilité des sols. In : Colloque "Utilisation des engrais en forêt". — Paris : INRA, 1973. — pp. 355-381.
- THIMONIER (A.). — Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990 : rôles possibles des apports atmosphériques. — Université Orsay Paris XI, 1994. — 117 p. (Thèse).
- THOMAS (A.L.). — Analyse spatiale de la sensibilité à l'acidification des écosystèmes du massif gréseux vosgien. — ENGREF ; INRA Orléans, 1998. — 135 p. (Thèse de Doctorat).
- TROUVÉ (C.), MARIOTTI (A.), SCHWARTZ (D.), GUILLET (B.). — Étude par le traçage naturel du $\delta^{13}\text{C}$ de la dynamique de renouvellement des matières organiques des sols de savane après plantation de Pins et d'Eucalyptus au Congo. — *Cahiers de l'ORSTOM série Pédologie*, vol. XXVI, n° 4, 1991, pp. 357-364.
- ULRICH (E.). — Le Réseau Rénécofor : objectifs et réalisation. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 2, 1995, pp. 107-124.
- ULRICH (E.), LANIER (M.), COMBES (C.). — Rénécofor. Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous-réseau Cataenat). Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1998. — 135 p. (ISBN 2-84207-134-4).

ÉVOLUTION CONSTATÉE DES SOLS FORESTIERS AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES (Résumé)

Les travaux pluridisciplinaires menés depuis plusieurs années mettent en évidence la relative fragilité des sols forestiers. Leur fertilité est souvent limitée et une bonne partie d'entre eux est acide voire très acide, leur conférant une susceptibilité particulière à l'acidification.

Les aménagements visant à la production de matériau-bois doivent prendre en compte les contraintes écologiques de la production. Le sol est une ressource non renouvelable, susceptible de se dégrader rapidement. Chaque écosystème possède une résilience propre qui définit les limites de la contrainte sylvicole, dans un contexte général en constante évolution (climat, apports atmosphériques) : cette notion reste cependant encore théorique.

OBSERVED CHANGES IN FOREST SOILS IN RECENT DECADES (Abstract)

Multidisciplinary investigations conducted over several years have highlighted the relative vulnerability of forest soils. Their fertility is often limited and many are acid or highly acid which makes them particularly susceptible to acidification.

When implementing schemes for the purpose of producing timber, proper consideration should be given to the ecological constraints of production. Soil is a non-renewable resource that can be rapidly deteriorated. Each ecosystem has its own resilience that defines the limits of the silvicultural constraints in an overall context that is constantly changing (climate, atmospheric deposition) - this concept however still remains theoretical.
