

Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes

J.-H. Jussy₍₁₎, W. Kœrner₍₂₎, C. Moares₍₁₎, E. Dambrine₍₁₎, J.-L. Dupouey₍₃₎, B. Zeller₍₁₎
et M. Benoît₍₂₎

Collaboration technique P. Behr₍₂₎, B. Pollier₍₁₎ et S. Bienaimé₍₁₎

(1) (3) INRA - Centre de Nancy, équipe «Cycles Biogéochimiques»(1), équipe «Phytoécologie»(3), 54280 Champenoux, France
(2) INRA-SAD, BP 29, 88501 Mirecourt, France

RÉSUMÉ

Depuis le milieu du XIX^e siècle, la surface forestière a environ doublé en France (Kœrner, 1999). Ces nouvelles forêts croissent en majorité sur d'anciennes terres agricoles. Parallèlement, certaines anciennes forêts surexploitées ont également été reboisées. Dans le massif vosgien, il s'agit principalement dans les deux cas de plantations résineuses sur des sols acides.

Dans ces nouvelles forêts, nous avons étudié la composition chimique et isotopique (C, N, C/N, $\delta^{15}\text{N}$) de l'horizon A1 des sols, ainsi que la disponibilité de l'azote, mesurée par des incubations en laboratoire et estimée à travers la composition floristique des espèces de sous-bois (indice d'Ellenberg). Nous les avons ensuite comparées à celles des forêts immémoriales voisines, qui n'ont jamais été cultivées.

Deux études, couvrant deux types de paysages et deux échelles d'information, ont été effectuées.

La première portait sur seize anciennes fermes isolées dans la forêt et abandonnées entre 1898 et 1945. Quatre usages anciens des sols de ces fermes (pâturage, pré de fauche, champ, jardin) ont été identifiés sur les cadastres napoléoniens et sur le terrain, et comparés aux forêts résineuses immémoriales adjacentes. Les sols anciennement enrichis par la fertilisation organique (pré, champ, jardin) se distinguent de ceux non ou peu enrichis, voire appauvris (forêt, pâturage) par un rapport C/N plus bas, un $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé, une nitrification potentielle plus forte et une végétation plus nitrophile. Le $\delta^{15}\text{N}$ des sols et d'une espèce de sous-bois (*Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs) varie positivement en fonction de l'intensité des anciens usages et vraisemblablement surtout en fonction de l'intensité de la fumure organique. Une relation empirique permet de décrire le gain de nitrification par rapport à la forêt immémoriale en fonction de l'augmentation relative de $\delta^{15}\text{N}$ des sols.

La seconde étude portait sur un bassin versant d'altitude, dont une partie était pâturée au siècle dernier, et le reste consistait en forêt surexploitée (hêtraies, hêtraies-sapinières et sapinières). Les sols anciennement pâturés se distinguent de ceux des forêts immémoriales par un $\delta^{15}\text{N}$ plus élevé et une nitrification potentielle plus basse. La nitrification potentielle des sols des forêts immémoriales est plus élevée dans les hêtraies et hêtraies-sapinières actuelles que dans les peuplements résineux.

Il apparaît donc que le cycle de l'azote en forêt est très fortement influencé par les anciens usages des sols et que ce passé doit nécessairement être pris en compte pour interpréter les dynamiques actuelles. Des mesures indépendantes montrent que des flux de nitrate

importants sont drainés à la base de sols de nouvelles forêts plant es sur d'anciennes terres agricoles. Le drainage de nitrate appauvri en ^{15}N , probablement issu de la minéralisation d'une fraction de la matière organique accumulée pendant la période agricole, pourrait participer au maintien de fortes valeurs isotopiques dans les sols précédemment cultivés.

Mots clés

Usage ancien, forêts vosgiennes, cycle de l'azote, nitrification, histoire de la forêt, bassin versant, $\delta^{15}\text{N}$, drainage de nitrate.

SUMMARY

PAST SOIL USE EFFECT ON THE NITROGEN CYCLE IN VOSGIAN FORESTS

Since the middle of the XIXth century, the forested area in France has roughly doubled (K erner, 1999). These new forests grow essentially on previous cultivated lands. Concurrently, some ancient overexploited forests were also planted. In the Vosges mountains, these new plantations in both cases mainly consist of coniferous stands on acidic soils.

We have studied the chemical and isotopic content (C, N, C/N, $\delta^{15}\text{N}$) of soils A1 horizons and the nitrogen availability, measured by laboratory incubations and estimated by the Ellenberg index based on the plant species composition. The soils of these new forests and of ancient adjacent forests which were never cultivated were compared.

Two studies, covering two landscapes types and two scales of information were made.

First, sixteen previous farmlands, isolated in forest and abandoned between 1898 and 1945 were studied. Four types of past soil use (pasture, meadows, crops, garden) were identified from land cadastres (1814-1840) and in the field, and were compared to adjacent ancient coniferous forests. Soils previously manured (meadows, crops, garden) compared to those unmanured or poorly manured (forest and pasture) have a lower C/N ratio and higher $\delta^{15}\text{N}$, higher potential nitrification and a more nitrophilous vegetation. Soil and fern (*Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs) $\delta^{15}\text{N}$ values are the best tracers of the intensity of ancient land use. An empirical relationship relates the increase of nitrification in previously cultivated soils as compared to ancient forest soils in function of the relative $\delta^{15}\text{N}$ values of these soils.

Secondly, we have studied a high altitude catchment, partially grazed in the last century and surrounded by overexploited forests. Soil $\delta^{15}\text{N}$ was the highest in previously grazed soils. Potential nitrification was highest in the ancient beech and fir-beech stands and lowest in former pastures planted with spruce.

It appears that the nitrogen cycle in forests is strongly influenced by the past land use and latter must be taken into account in order to understand the present day dynamics. Other studies showed high nitrate leaching at the bottom of these recently forested soils. The leaching of nitrate isotopically depleted, probably originating from the mineralisation of the organic matter accumulated during the former agricultural land use, could explain the persistence of high isotopic values in previously cultivated soils.

Key-words

Past land use, Vosgian forests, nitrogen cycle, nitrification, forest history, catchment, $\delta^{15}\text{N}$, nitrate leaching.

RESUMEN

INFLUENCIA DEL USO ANTIGUO DEL SUELO SOBRE EL CICLO DEL NITRÓGENO EN LAS MONTAÑAS DE LOS VOSGOS (ESTE DE FRANCIA)

En Francia, desde mediados del siglo XIX, la superficie forestal se ha duplicado prácticamente (K erner, 1999). Esencialmente, los nuevos bosques ocupan antiguas tierras de cultivo, aunque algunas repoblaciones se han efectuado sobre bosques tradicionalmente sobre explotados. En la región de los Vosgos, se trata mayoritariamente de repoblaciones de coníferas, sobre todo p ceas, sobre suelos ácidos.

Se han comparado las propiedades químicas (C, N, C/N) y la abundancia natural en ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) del suelo del horizonte A1 de dichas plantaciones con respecto al de los bosques antiguos. Así mismo, se ha estudiado el efecto del uso antiguo del suelo sobre la disponibilidad del N, estimada a través de incubaciones en laboratorio y/o del índice de Ellenberg, basado en la composición florística de los estratos arbustivo y herbáceo.

Se han realizado dos estudios, que cubren dos tipos de paisaje y dos escalas de información:

En primer lugar, se han analizado dieciséis granjas dispersas que fueron abandonadas entre 1898 y 1945. A partir del catastro de Napoleón (1814-1840) y de la observación de campo, se han identificado cuatro usos antiguos del suelo (pasto, prado, cultivo, huerto) y se han comparado con los bosques antiguos tradicionales (tabla 1). Los suelos antiguamente abonados con estiércol (antiguos pra-

dos, cultivos y huertos) presentan una relación C/N más baja y valores más elevados de $\delta^{15}\text{N}$, y mayor nitrificación potencial que aquellos poco o nada enriquecidos o incluso empobrecidos (bosque, pasto, tabla 2, figura 1). Además, la vegetación de estas parcelas es menos nitrófila que en las parcelas anteriormente abonadas. El $\delta^{15}\text{N}$ del suelo y de una especie herbácea (*Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs) varía positivamente según la intensidad del uso antiguo y, aparentemente con mayor importancia, en función de la cantidad de estiércol incorporado. El incremento relativo de nitrificación de cada uso antiguo con respecto al bosque se relaciona empíricamente con el $\delta^{15}\text{N}$ relativo del suelo de ese mismo uso (figura 2).

En segundo lugar, se ha estudiado una cuenca, situada entre 800 y 1000 m de altitud, cuyas tierras en el siglo pasado se dedicaban en parte a pastos de montaña y el resto de la superficie estaba ocupado por bosques sobre explotados. Actualmente, las plantaciones de coníferas ocupan la mayor superficie, aunque subsisten parcelas del antiguo bosque (hayas, abetos y zonas mixtas). Los suelos de los antiguos pastos presentan los valores más elevados de $\delta^{15}\text{N}$ y la nitrificación potencial más baja (figuras 3, 4). La nitrificación potencial de los suelos de los actuales hayedos y bosques mixtos de hayas y abetos es mayor que en los bosques en los que las coníferas son dominantes.

En conclusión, parece existir una fuerte influencia del uso antiguo del suelo sobre el ciclo del nitrógeno en el bosque. Dicho uso debe ser tomado en cuenta en la interpretación de la dinámica actual. Otras medidas realizadas en el campo han revelado que, en las plantaciones situadas sobre las antiguas tierras agrícolas, existe una importante lixiviación del nitrato hacia los horizontes inferiores del suelo. Esta lixiviación de nitrato, empobrecida en ^{15}N y originado a partir de una fracción de materia orgánica acumulada durante el ciclo agrícola pasado, podría participar en el mantenimiento de los elevados valores de $\delta^{15}\text{N}$ en los suelos que fueron cultivados.

Palabras claves

Uso antiguo del suelo, bosques en los Vosgos, ciclo del nitrógeno, nitrificación, historia del bosque, cuenca, $\delta^{15}\text{N}$, lixiviación de nitrato.

Depuis la moitié du XIX^e siècle, la surface forestière en France a presque doublé, passant d'environ 9 millions d'hectares en 1830 à 15/16 millions d'hectares actuellement. Cette extension s'est faite essentiellement sur d'anciens terrains utilisés à des fins agricoles et pastorales (Cinotti, 1996). L'histoire des forêts du Massif Vosgien est à cet égard représentative des alternances de défrichements et de boisements en moyenne montagne (Janssen *et al.*, 1974, Guillet *et al.*, 1976, Janssen, 1987). En effet, il y a environ 2000 ans, les premiers pâturages de crêtes apparurent, et la céréaliculture commença à se développer. Au Moyen-Age, une partie des forêts a été exploitée pour fournir du bois aux mines (étalement, fonderie) et à l'industrie (verrière par exemple). L'extension des cultures et des pâtures sommitales (chaumes) atteignit un maximum au cours du XVIII^e siècle, succédant à des périodes d'abandon de terres agricoles dues aux épidémies de pestes et à la guerre de 30 ans. Parallèlement, dès la fin du XVII^e siècle, des Anabaptistes venus de Suisse réussirent une première intensification de l'agriculture en rationalisant la fertilisation animale. Il faut attendre le XIX^e siècle pour voir progresser les boisements, dont les tentatives précédentes, initiées par seigneurs et paroisses notamment, n'avaient pas donné de résultats tangibles. Les plantations de résineux, sapins (*Abies alba* Mill., Rameau *et al.*, 1989), pins (*Pinus sylvestris* L.), épicéas (*Picea abies* (L.) Karst.) se multiplièrent alors suite à l'exode rural et à l'industrialisation moderne et la surface forestière augmenta. De plus, cette augmentation fut favorisée

par la plus grande indépendance des populations vis-à-vis du bois quant aux constructions et au combustible (Fron, 1909) et par l'utilisation de plus en plus poussée du bois des colonies (Huffel, 1904).

Cet aperçu de l'occupation historique des sols vosgiens suggère qu'en France les sols forestiers ont de fortes chances d'avoir un jour été déboisés voire cultivés. Cependant, l'impact de ces anciennes pratiques anthropiques sur le fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers a été relativement peu étudié (Guillet *et al.*, 1976, Glatzel, 1991, Koerner, 1993, 1999, Hüttl et Schaaf, 1995). Notre objectif était l'étude de l'impact de l'usage agricole ancien des sols sur les propriétés actuelles des sols reboisés et plus spécialement sur la dynamique de l'azote. Notre étude est basée sur des comparaisons de mesures de C/N, d'abondance isotopique en ^{15}N (sol et végétation), d'affinité de la flore de sous-bois pour l'azote (Ellenberg *et al.*, 1992), de la disponibilité en azote minéral du sol, de minéralisation et nitrification potentielle entre anciens sols déboisés et sols forestiers anciens. Elle a été effectuée à deux échelles spatiales, couvrant la diversité du paysage vosgien, celle d'anciennes exploitations agricoles de petite taille, et celle d'un bassin versant d'altitude anciennement partiellement pâturé.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Choix des sites

La première partie de notre travail a porté sur un ensemble de seize anciennes fermes abandonnées dont la surface variait entre 4 et 22 hectares, situées à l'intérieur ou à proximité immédiate des forêts. Ces fermes ont été boisées en totalité entre 1880 et 1945 par des plantations de résineux (sapin ou plus fréquemment épicéa). Les dates de plantation ont été déterminées par carottage à la souche. Il s'agit d'anciennes exploitations de polyculture-élevage qui fonctionnaient en quasi autarcie. L'usage ancien des sols est décrit sur les anciens cadastres napoléoniens (établis entre 1814 et 1840 pour le premier, autour de 1938 pour le second). Cinq types d'anciennes occupations des sols ont été retenus : les anciens jardins, les anciens champs, les anciennes prairies de fauche (fertilisées et irriguées), les anciennes pâtures et les forêts anciennes. Ces dernières servent de références vis-à-vis des sols agricoles, bien qu'elles aient été souvent parcourues par le bétail et exploitées (bois de chauffage, ramassage de litière, voir Glatzel, 1991, Kœrner et Tabeaud, 1993, Hüttl et Schaaf, 1995).

Les anciens champs étaient généralement enrichis par des apports de fumier, mais aussi de fougères, de bruyères, voire de litière forestière, ayant servi par exemple de couches aux animaux. Les sols présentent souvent un ancien horizon Ap résultant du travail mécanique du sol.

Les anciens jardins sont situés à proximité des ruines des habitations (moins de 90 m) et étaient constitués d'une couche de terre apportée et déposée sur une couche de pierres, elle aussi allochtone et destinée à assurer le drainage. Un mur de pierres retenait le tout sur la pente. Là encore, ces sols étaient souvent enrichis, par des déchets ménagers par exemple.

Les prés de fauche étaient situés dans des zones inondables ou trop humides pour la culture, souvent en aval des fermes. Des rigoles, destinées à l'assainissement mais aussi à l'irrigation pouvaient ainsi y apporter des fertilisants organiques (purin). Il s'agit donc là encore de zones anciennement enrichies.

Contrairement aux autres anciennes parcelles agricoles, les anciennes pâtures (à proximité des fermes) ont parfois subi des exportations d'éléments minéraux (brotage). Le bétail n'occupait pas ces parcelles toute l'année, mais seulement d'avril à septembre (Thiriart, 1866). Bien souvent les petites parcelles cadastrées comme pâtures étaient en fait des voies de transit car il était alors moins cher de déclarer une pâture aux impôts qu'un chemin.

Les sites ont été choisis pour représenter le plus large éventail possible de variables écologiques : substrat géologique (grès, granite, gneiss), altitude (entre 500 et 900 m), pente, type de sol (de sols bruns à sols podzoliques). Les sites se distinguent uniquement par leur passé cultural et non par leur traitement sylvico-

le. À l'exception des forêts anciennes, les plantations étudiées sont des peuplements purs de première génération pour éviter les effets dus à des plantations antérieures. Le nombre de tiges à l'hectare et la surface terrière sont indépendants de l'utilisation ancienne des sols (Kœrner *et al.*, 1997).

La deuxième zone correspond au bassin versant du Strenbach, situé dans les Vosges alsaciennes en forêt communale d'Aubure à une altitude moyenne de 1000 m. L'histoire du massif forestier d'Aubure se confond avec celle du Massif Vosgien (Kœrner, 1993). Elle est marquée par des périodes de poussée démographique et en conséquence d'exploitation forestière et de défrichement intense. Les terres fertiles et proches du village furent transformées en terrains agricoles et les crêtes, plus éloignées, furent transformées en "chaumes" (pâturages de transhumance) dont l'extension fut maximale au XVI^e siècle. Les défrichements reprirent après la Guerre de Trente ans. Au XVIII^e siècle, la forêt du bassin versant était exploitée de manière intensive, au nord pour les mines de Sainte-Marie (bois d'étalement, charbon de bois utilisé pour faire fondre le minerai, Mühlenbeck, 1879) et au sud pour des pâtures sauvages et des coupes de bois illicites (Kahl, 1894, Jehin, 1990). De 1684 à 1787, des rapports écrits (ADHR E 1543) font ainsi état de l'intensité de la dégradation de la forêt, qui atteignit un maximum avant la Révolution. Ceci explique l'imprécision des sources historiques consultées quant aux limites des parcelles, à leur nature (les vides et les pâturages de crêtes sont souvent recensés comme forêts alors que le déboisement peut y être très poussé), et quant aux dates et aux essences de reboisement.

Les derniers grands défrichements, par brûlis, eurent lieu au milieu du XVIII^e siècle. Le reboisement de vides, jusque-là recensés en surface forestière, commença après 1827. Le cadastre napoléonien puis les aménagements forestiers successifs de 1878, 1894, 1936, 1958 et 1977 décrivent l'usage des parcelles actuellement forestières. Des projets de reboisement, parfois combattus par les habitants de la commune, eurent lieu en 1841, 1857 et 1862. Le reboisement en épicéa fut conseillé dès le premier aménagement de 1878, pour pallier les difficultés de régénération du sapin.

Le cycle des éléments minéraux dans le bassin versant a été étudié en détail depuis 1986 (Probst *et al.*, 1990, Le Goaster *et al.*, 1991, Dambrine *et al.*, 1995, Fichter, 1997). La roche mère est le granite du Brézouard, pauvre en Ca et Mg (El Gh'Mari, 1995), excepté un affleurement de gneiss plus riche en Fe et Mg situé au sommet du versant exposé au sud.

La surface de la forêt communale d'Aubure est de 319 ha, dont les deux tiers sont constitués par des peuplements purs d'épicéa (*Picea abies* L.) Karst.) (Le Goaster, 1989). La surface restante est composée de peuplements purs de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) ou de résineux, pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), sapin (*Abies alba* Mill.), Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) ou de peuplements mélangés (hêtraies-sapinières ou pessières-sapinières essentiellement).

Les sols, décrits par Lefèvre (1988), sont principalement des sols bruns acides sur le versant exposé au Sud. Ils sont plus podzolisés dans la partie inférieure du versant qui possède une pente plus forte, ainsi que sur le versant exposé au nord, où le microclimat est plus frais.

Sur l'ensemble du bassin versant, 59 peuplements forestiers furent échantillonnés, répartis de manière à couvrir un vaste éventail de conditions : type de sol, position topographique (versant nord ou sud, altitude), type de peuplement ancien et actuel (réparti en trois catégories : hêtraies, résineux ou peuplements mixtes de hêtre et sapin). Nous avons défini quatre types d'occupation ancienne en 1878 (ADHR 8AU/14428) : les parcelles forestières étaient décrites comme hêtraies ou hêtraies-sapinières (i) et sapinières (ii). Actuellement, certaines d'entre elles portent encore la ou les mêmes essences qu'en 1878, tandis que d'autres ont été reboisées en résineux, épicéa essentiellement. Les "chaumes" (iii) regroupent l'ensemble des pâtures (y compris pâturages communaux) et forêts ouvertes et fortement pâturées du bassin versant. Ce sont généralement de grandes parcelles ou des chemins de crêtes, éloignés des champs et des prés, où les bêtes restaient plus longtemps et où le ramassage d'excréments devait être peu poussé. La pression de pâture sur les crêtes était importante puisque le cheptel bovin au XIX^e siècle était 10 fois supérieur au cheptel actuel (Garnier, comm. pers.).

À titre de comparaison, deux pâtures actuelles sur d'anciennes terres cultivées en 1836 (iv) ont été échantillonnées à la lisière du bassin versant forestier.

Méthodes employées

Anciennes fermes

Dans toutes les anciennes fermes, nous avons effectué des relevés floristiques dans chaque parcelle agricole définie par un ancien usage. Le *tableau 1* montre que dans les anciennes fermes répertoriées, les pâtures étaient moins fréquentes que les prés et les champs.

Les relevés floristiques ont été effectués sur une surface de 400 m² par parcelle (Guinochet, 1973). Le coefficient N d'Ellenberg représentant la richesse trophique du milieu a été attribué à chaque espèce présente (Ellenberg *et al.*, 1992). Un

coefficient moyen par relevé a été calculé comme la moyenne des coefficients de chaque espèce sur l'ensemble du relevé.

Les frondes de *Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs, l'espèce herbacée la plus fréquemment représentée, ont été prélevées quand elle était présente. Au milieu de chaque placette, une fosse a été creusée (60 cm de profondeur) et le type de sol a été décrit. Des échantillons de l'horizon A1 ont été collectés, séchés à l'air et tamisés à 2 mm. L'azote total (méthode Kjeldahl), le carbone total (méthode Anne) et le pH (Bonneau et Souchier, 1994) ont été déterminés sur la fraction < 2 mm par le laboratoire INRA d'Arras. Des échantillons de sol et de fougères ont été finement broyés (< 50 µm) et leur concentration en ¹⁵N déterminée par le Service Central d'Analyse du CNRS de Vernaison (Rhône) à l'aide d'un spectromètre de masse. Les résultats ont été exprimés en unités δ, représentant des ‰ de déviation par rapport au standard international atmosphérique N₂, suivant la formule

$$\delta^{15}\text{N} = R_{\text{échantillon}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

avec $R = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ (Mariotti, 1982).

Les déterminations de la minéralisation potentielle nette de l'azote et de la nitrification potentielle nette ont été effectuées au laboratoire dans des conditions contrôlées sur 14 placettes de 4 sites. Deux sites se situent dans des conditions défavorables (La Feigne, sol ocre podzolique sur moraine avec une tendance à l'engorgement, et le Muesbach, podzol sur grès vosgien) et 2 sont situés dans des contextes géologiques plus favorables (La Cude et le Solem, sols bruns acides développés sur granite des crêtes et moraine). Après prélèvement en août 1997, les échantillons des horizons 0-15 cm et 15-30 cm ont été tamisés (4 mm) sur le terrain, répartis dans des boîtes plastiques à raison d'environ 1,5 kg de terre fine par boîte, et mis à incuber pendant 4 semaines à 30 °C. L'humidité a été déterminée par séchage d'un sous-échantillon à 105 °C. Elle a été maintenue constante au long des incubations à l'aide d'une couverture par un parafilm (American National CanTM) perméable à l'air. L'azote minéral avant et après incubation a été déterminé par une extraction au KCl 1 N (3 répétitions par horizon, rapport poids humide/volume : 40/200). N-NO₃⁻ et N-NH₄⁺ ont été analysés par colorimétrie automatique des extraits KCl (autoanalyseur TRAACS 2000).

Tableau 1 - Nombre de placettes échantillonnées suivant le type de mesure et d'utilisation ancienne.

Table 1 - Number of parcels sampled by type of measurement and past land use.

	Ancienne forêt	Ancienne pâture	Ancien champ	Ancien pré	Ancien jardin
Relevé de végétation	27	12	39	12	6
N total sol	19	6	23	19	6
C/N	14	6	22	15	3
δ ¹⁵ N sol et <i>D. carthusiana</i>	19	6	23	19	6
Nitrification potentielle	4	1	4	2	3

Bassin Versant d'Aubure

Dans le bassin versant d'Aubure, des échantillons de sol ont été prélevés en octobre 1998 dans l'horizon 0-10 cm de chacun des 59 peuplements et des 2 pâtures étudiés, en excluant la couche L+F. Chaque échantillon était constitué de 3 répétitions prélevées à quelques mètres de distance l'une de l'autre. Le sol a été tamisé sur le terrain à 4 mm. Les différentes analyses ont été menées au laboratoire INRA-CRF de Nancy. Le carbone total a été mesuré après broyage par détection infrarouge après combustion de 30 mg (Shimadzu-TOC 5050). La teneur en azote total et le $\delta^{15}\text{N}$ du sol ont été déterminés par spectrométrie de masse sur 10 mg de sol finement broyés. La minéralisation et la nitrification potentielle nette ont été déterminées au laboratoire suivant les conditions décrites ci-dessus, mais menées à 15 °C.

RÉSULTATS

Anciennes fermes

Les utilisations agricoles anciennes ont une influence significative sur la plupart des caractères du sol et de la végétation étudiés (tableau 2).

Le coefficient N d'Ellenberg attribué aux anciens champs et aux anciens prés est significativement supérieur à celui des forêts anciennes. Celui des anciennes pâtures serait intermédiaire et celui des anciens jardins encore supérieur, mais le faible nombre de relevés comportant plus de 10 espèces nous a incités à les retirer de l'analyse statistique. Notons que l'on obtient le même classement avec le coefficient d'Ellenberg R pour l'acidité (Kœrner, 1999) : l'acidité augmente quand la richesse trophique diminue. Les anciens jardins se caractérisent par une fréquence importante d'espèces nitrophiles comme *Galeopsis tetrahit* L., *Geum urbanum* L., *Impatiens parviflora* DC., *Mycelis muralis* (L.) Dum., *Rubus idaeus* L., *Silene dioica* (L.) Clairv., *Stachys sylvati-*

ca L., *Urtica dioica* L. En revanche, les espèces acidophiles (*Luzula luzuloides* (Lam.) Dandy & Willm., *Vaccinium myrtillus* L.) sont plus fréquentes sur les forêts anciennes et les anciennes pâtures et certaines Bryophytes (*Eurhynchium striatum* (Hedw.) Schimp., *Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst., *Thuidium tamarascinum* (Hedw.) B., S. & G.) ne se trouvent que dans les forêts anciennes. Le nombre d'espèces (toutes strates confondues) est le plus élevé dans les anciens prés et les anciens champs et le plus faible dans les forêts anciennes.

La teneur en azote total du sol s'échelonne en moyenne entre 0,35 et 0,65 g.kg⁻¹ et est indépendante de l'utilisation ancienne. En revanche, le rapport C/N est significativement plus faible dans les anciens jardins et significativement plus élevé dans les anciennes pâtures. Cette différence se maintient en profondeur (Kœrner *et al.*, 1997).

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ du sol et de la fougère augmentent significativement suivant l'ordre forêt-pâtture-champ-pré-jardin, correspondant à un gradient d'intensification agricole. Les variations des $\delta^{15}\text{N}$ du sol et de la fougère sont corrélées (Kœrner *et al.*, 1999), le $\delta^{15}\text{N}$ de la fougère étant généralement inférieur de 4 à 5 unités à celui du sol.

La concentration moyenne en azote minéral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) des sols avant incubation n'est pas différente entre les différentes parcelles des fermes de la Cude, du Solem et de la Feigne. Les concentrations en azote minéral du sol des parcelles de la ferme du Muesbach sont plus faibles (P < 0,001). Après incubation, les concentrations ont augmenté dans chacune des 14 placettes étudiées, mais restent plus faibles au Muesbach (figure 1). Nous n'observons pas d'effet de l'utilisation passée sur les capacités minéralisatrices des sols : les anciens champs possèdent des capacités minéralisatrices supérieures dans 3 des 4 sites, mais l'ancienne forêt de la Feigne possède la plus haute capacité minéralisatrice, tandis que les anciens jardins et l'ancienne pâture du Muesbach possèdent les plus faibles capacités.

Tableau 2 - Coefficient N d'Ellenberg de la végétation, N, C/N et $\delta^{15}\text{N}$ du sol, et $\delta^{15}\text{N}$ de *Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs en fonction de l'utilisation ancienne.

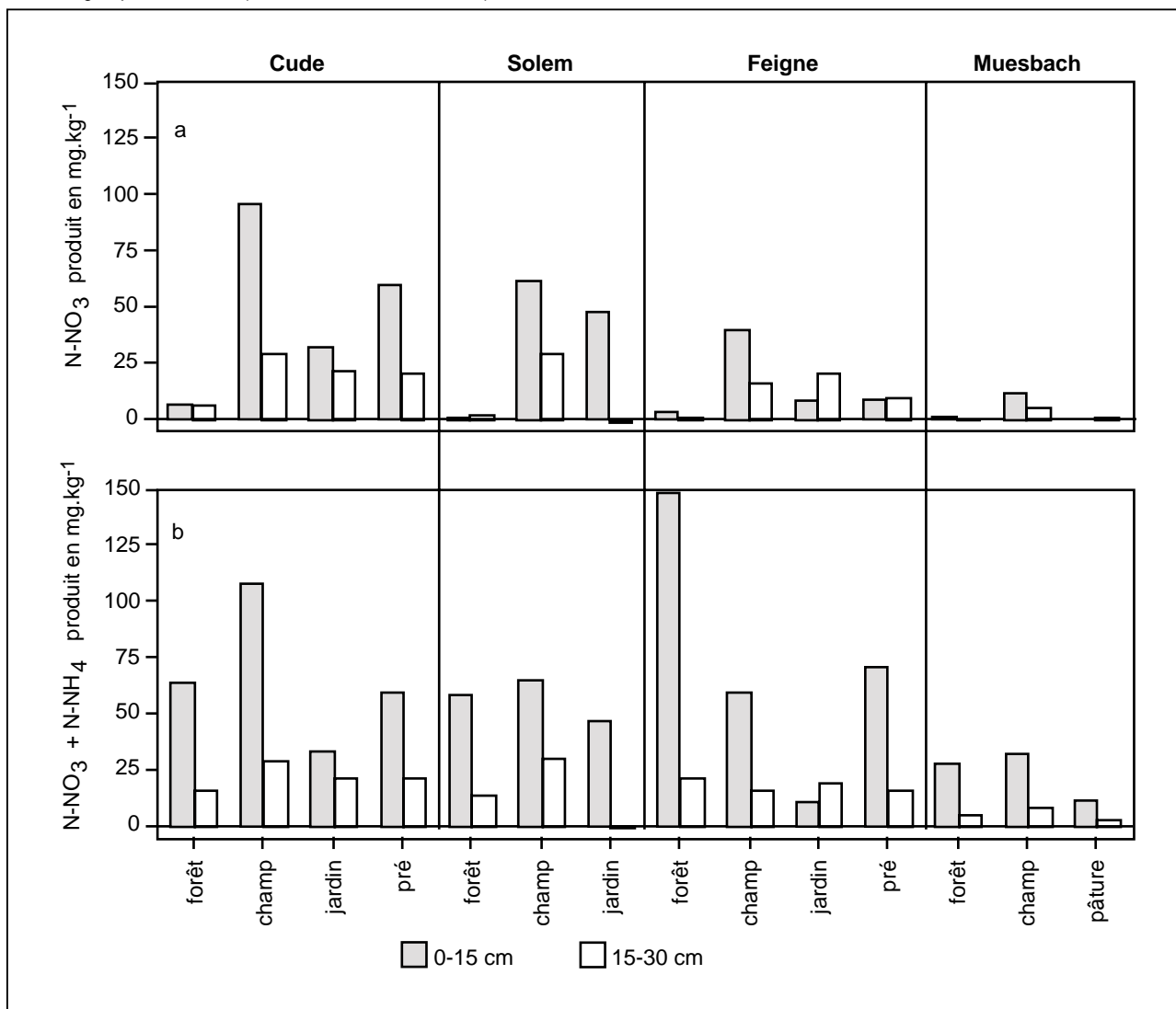
Table 2 - N Ellenberg's coefficient, soil N, C/N and $\delta^{15}\text{N}$, and *Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs $\delta^{15}\text{N}$ by past land use.

	Ancienne forêt	Ancienne pâture	Ancien champ	Ancien pré	Ancien jardin
Nombre d'espèces	21c	24	29b	34a	29
N Ellenberg	4,3a	4,7	4,9b	4,8b	5,7
N total sol (g.kg ⁻¹)	0,50a	0,64a	0,48a	0,55a	0,35a
C/N	17,9ab	19,4a	16,4ab	15,4ab	14,0b
$\delta^{15}\text{N}$ sol (‰)	0,03a	1,38ab	1,63b	2,53bc	3,82c
$\delta^{15}\text{N}$ <i>D. carthusiana</i> (‰)	-4,44a	-3,44ab	-2,72bc	-2,55bc	-2,20c

Les valeurs suivies d'une même lettre dans une ligne donnée ne diffèrent pas significativement suivant un test de Bonferroni (P < 0,05). Pour les valeurs du coefficient N d'Ellenberg et pour le nombre d'espèces, les anciennes pâtures et les anciens jardins ont été retirés de l'analyse statistique (trop peu de relevés avec plus de 10 espèces).

Figure 1 - Nitrification potentielle (a) et minéralisation potentielle de l'azote (b) des sols de 4 fermes vosgiennes (Cude, Solem, Feigne, Muesbach) en fonction de l'utilisation agricole ou forestière ancienne des parcelles (incubation : 4 semaines à 30 °C).

Figure 1 - Potential nitrification (a) and nitrogen mineralisation (b) from the soil of 4 vosgian farms (Cude, Solem, Feigne, Muesbach) according to past land use (incubation : 4 weeks, 30 °C).



Avant et après incubation, les concentrations en nitrate du sol des anciennes forêts (*figure 1*) et le pourcentage de nitrate par rapport à l'azote minéral du sol [$N-NO_3^- / (N-NO_3^- + N-NH_4^+)$ en %] sont toujours très faibles. La nitrification potentielle est spécialement élevée dans les anciennes parcelles agricoles étudiées, à l'exception de la pâture du Muesbach. La différence entre forêts anciennes et anciennes parcelles agricoles est plus accentuée dans les sols bruns des deux sites sur des substrats géologiques plus riches, la Cude et le Solem.

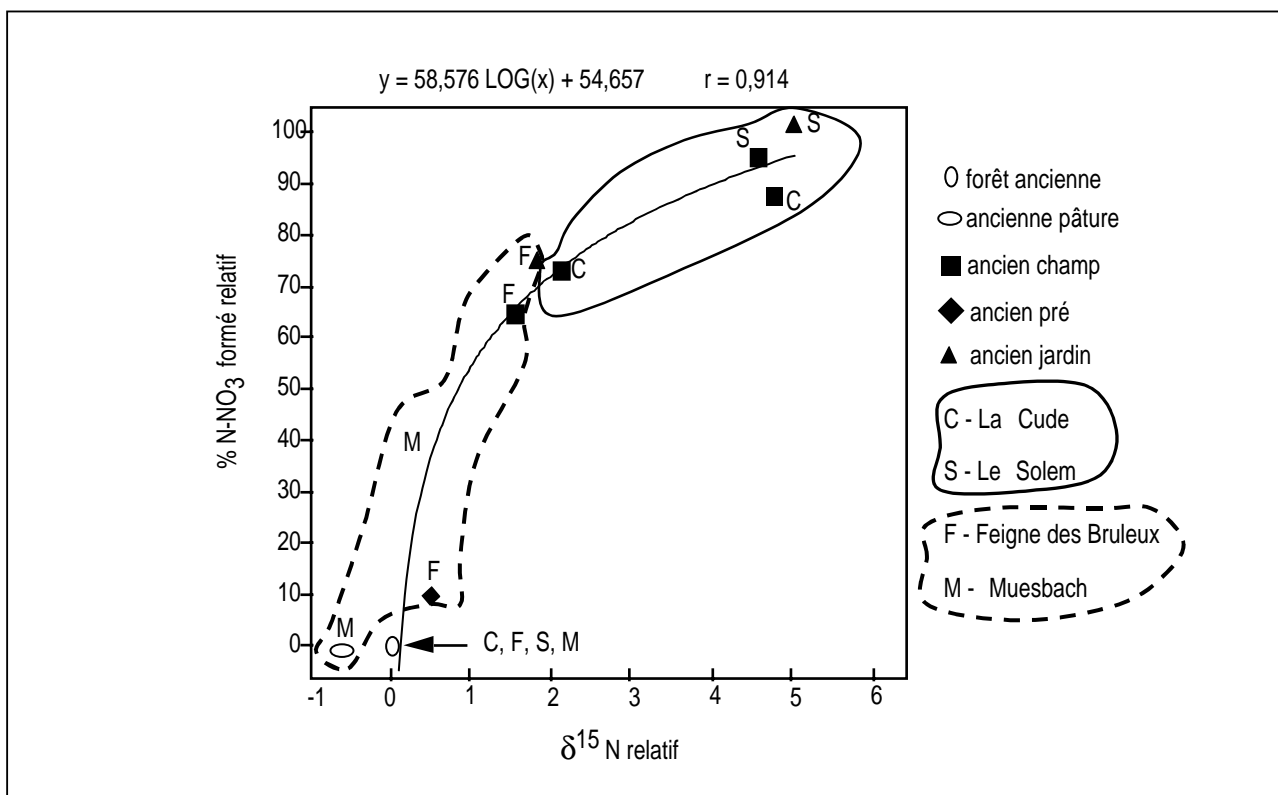
La minéralisation et la nitrification de l'horizon 15-30 montrent des variations en fonction de l'usage ancien similaires à celles de

l'horizon supérieur bien que l'intensité diminue fortement avec la profondeur.

Dans les 14 placettes étudiées, nous n'avons pas observé de relation entre nitrification potentielle et $\delta^{15}N$ du sol. Par contre, en valeurs relatives aux forêts anciennes, nous observons une corrélation forte entre $\delta^{15}N$ du sol et nitrification potentielle nette (*figure 2*).

Bassin versant d'Aubure

Les propriétés des sols sont représentées sur la *figure 3*, en fonction de leur usage ancien et de la végétation actuelle. Les

Figure 2 - Relation entre nitrification et $\delta^{15}\text{N}$ du sol.**Figure 2** - Relationship between nitrification and soil $\delta^{15}\text{N}$.

$$\% \text{N-NO}_3 \text{ formé relatif} = [100 * \text{N-NO}_3 / (\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4)]_{\text{champ, pré, jardin, pâture ou forêt d'un site}} - [100 * \text{N-NO}_3 / (\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4)]_{\text{forêt du même site}}$$

$$\delta^{15}\text{N relatif} = \delta^{15}\text{N champ, pré, pâture, jardin ou forêt d'un site} - \delta^{15}\text{N forêt du même site}$$

teneurs en carbone et en azote des sols varient fortement sur l'ensemble du bassin versant et semblent indépendantes de l'usage ancien des sols. Le rapport C/N des sols des pessières varie peu en fonction de la végétation antérieure. Il est plus élevé dans les sols sur ancienne sapinière, mais la différence n'est pas significative. En revanche, le $\delta^{15}\text{N}$ du sol s'avère là encore être un bon marqueur de l'usage ancien. Le $\delta^{15}\text{N}$ des sols des terres anciennement cultivées et actuellement pâturées est le plus élevé et leur C/N est le plus bas. Le $\delta^{15}\text{N}$ des sols des pessières sur ancienne "chaume" est significativement supérieur à celui des sols de forêts anciennes quel que soit leur usage actuel. Dans le groupe des forêts anciennes qui n'ont pas changé d'usage, le $\delta^{15}\text{N}$ décroît suivant l'ordre ancienne hêtraie > ancienne hêtraie-sapinière > ancienne sapinière, mais ces variations ne sont pas statistiquement significatives.

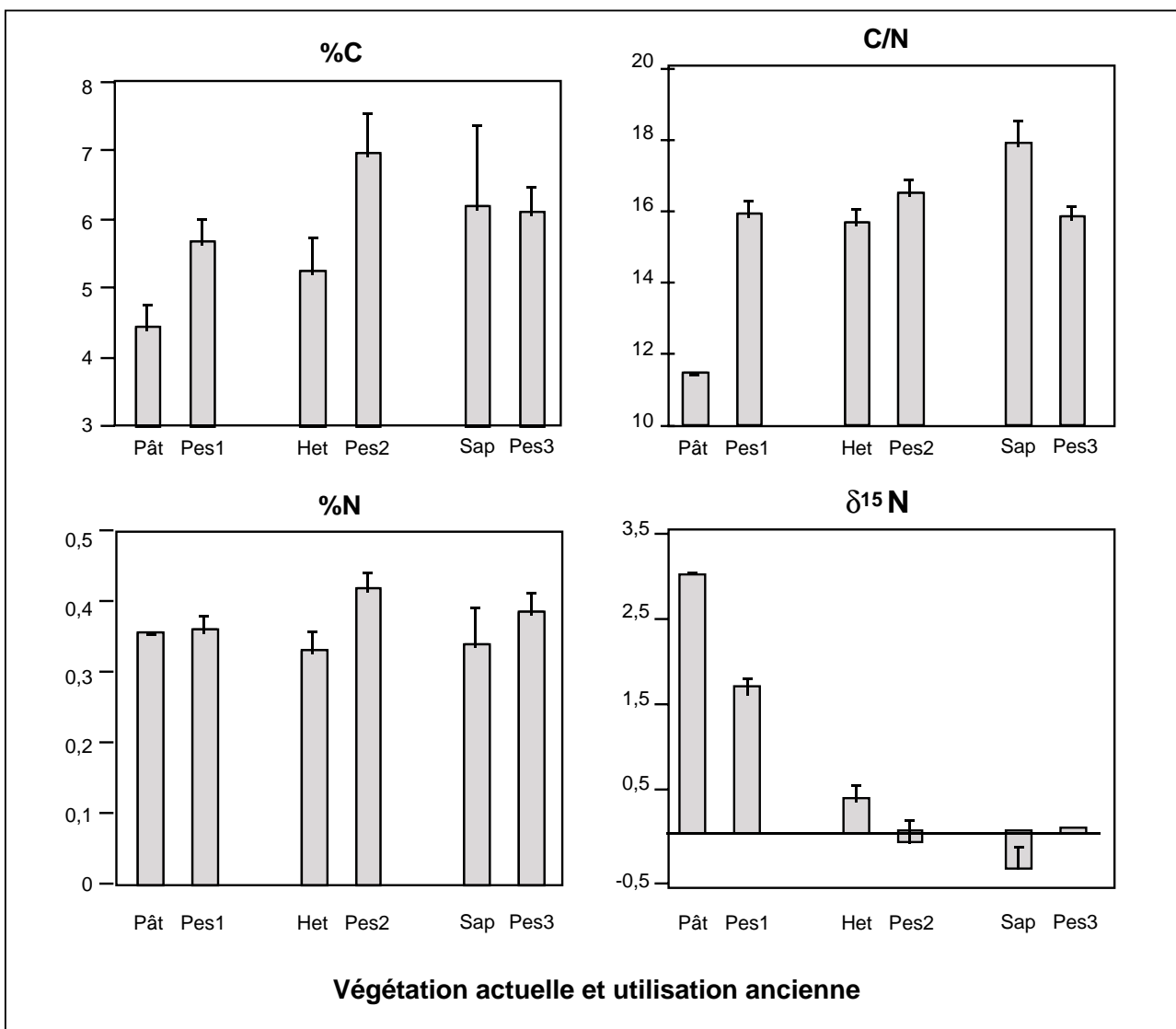
Le taux de nitrification de l'azote potentiellement minéralisé est élevé quel que soit l'usage ancien des sols (figure 4). Bien

que la dispersion des résultats soit importante, la quantité de nitrate produite décroît en moyenne dans l'ordre: sols des pâtures actuelles = sols des anciennes hêtraies et hêtraies-sapinières n'ayant pas changé d'usage > sols des peuplements résineux actuels (sapin et épicéa) sur ancienne forêt > sols des pessières sur anciennes "chaumes".

DISCUSSION ET SYNTHÈSE

Cette étude montre que l'histoire agricole et forestière des sols actuellement forestiers influence sur le long terme le cycle et la disponibilité de l'azote dans ces sols.

L'influence des anciennes utilisations agricoles peut être expliquée par des transferts de fertilité. Dans le cas des petites exploitations agricoles autarciques, la fertilité prélevée par les récoltes et le pâturage est restituée, notamment à travers l'épandage des déjections animales. Le rapport restitutions/prélèvements croît généralement dans l'ordre forêt-pâturage < champ-pré < jardin.

Figure 3 - C, N, C/N et $\delta^{15}\text{N}$ des sols du bassin versant d'Aubure selon l'utilisation ancienne des sols et la végétation actuelle.**Figure 3 - Soil C, N, C/N and $\delta^{15}\text{N}$ in the Aubure catchment according to past soil use and present vegetation.**

Pât: pâtures actuelles; anciennes terres agricoles (n=2)

Pes1, Pes2 et Pes3: peSSIères actuelles;

Pes1: anciennes "chaumes" (n=29),

Pes2: anciennes hêtraies et hêtraies-sapinières (n=6),

Pes3: anciennes sapinières (n=8)

Het: hêtraies immémoriales (n=13)

Sap: sapinières immémoriales (n=3)

L'acidification des terrains par le pâturage a conduit à l'apparition d'une flore de faible valeur pastorale, notamment du *Nardus stricta* L. (Kammerer, 1983).

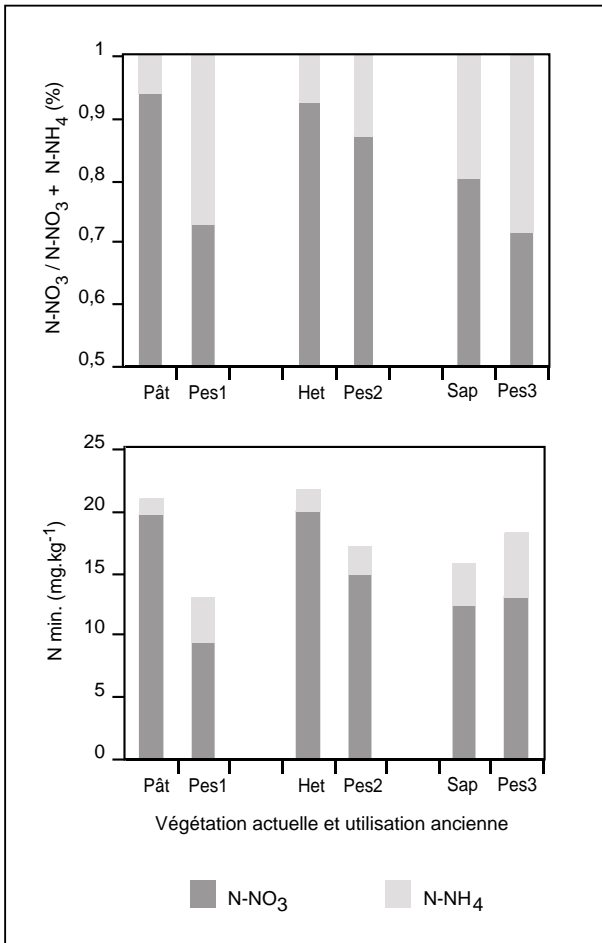
Le nombre d'espèces végétales dans les anciens champs, prés et jardins est plus élevé que dans les forêts anciennes. Cette différence est liée à une augmentation de la fréquence des espèces nitrophiles qui confirme l'augmentation de la nitrification dans les parcelles anciennement fumées. Cependant, la minérali-

sation potentielle, c'est-à-dire la production nette d'azote minéral semble peu influencée par l'usage ancien des sols. La variation de C/N paraît traduire l'incorporation de matière organique ancienne à bas C/N (fumier) plutôt qu'une activité minéralisatrice actuelle.

La haute capacité nitrificatrice des sols forestiers anciennement cultivés peut être liée à un changement de communauté microbienne plus favorable à la microflore nitrificatrice qu'à la

Figure 4 - Azote minéral et proportion d'azote nitrique produits en incubation à Aubure (4 semaines à 15 °C) en fonction de la végétation actuelle et de l'utilisation ancienne des sols.

Figure 4 - Mineral nitrogen and proportion of nitrate-nitrogen produced from Aubure soils during a 4-week incubation at 15 °C, according to present vegetation and past soil use.



Pât: pâtures actuelles; anciennes terres agricoles (n = 2)

Pes1, Pes2 et Pes3: pessières actuelles

Pes1: anciennes "chaumes" (n = 29),

Pes2: anciennes hêtraies et hêtraies-sapinières (n = 6),

Pes3: anciennes sapinières (n=8)

Het: hêtraies immémoriales (n = 13)

Sap: sapinières immémoriales (n = 3)

microflore consommatrice d'ammonium (Stark et Hart, 1997). Ce changement a pu être induit par le labour, qui favorise l'aération, la minéralisation et la nitrification (Lossaint et Rapp, 1960), et entretenu par les apports de matière organique labile riche en azote. La stimulation de la nitrification se poursuit généralement en profondeur. Les jardins, qui sont les sols les plus perturbés sont aussi ceux qui présentent le comportement le plus variable pour l'horizon 15-30 cm.

La nitrification potentielle au laboratoire des sols des forêts anciennes est variable. Les sols des peuplements résineux étudiés autour des fermes sont peu nitrifiants. Inversement, une forte nitrification a été mesurée dans les sols de hêtraies et de hêtraies-sapinières du bassin versant d'Aubure (Jussy, 1998). La nitrification plus élevée des sols de hêtraies par rapport aux sols des peuplements résineux a été déjà décrite (Persson *et al.*, 2000).

Les sols des "chaumes" et pâtures replantées en épicéas apparaissent moins nitrifiants que ceux des forêts anciennes voisines. Cette différence pourrait être liée à l'appauvrissement du sol occasionné par le pâturage, et/ou à l'effet inhibiteur des litières d'épicéa vis-à-vis de la nitrification (Wedraogo *et al.*, 1993).

Nous avons mis en évidence une relation entre utilisation ancienne du sol et $\delta^{15}\text{N}$. Le déboisement, en favorisant la minéralisation de l'humus, élève le $\delta^{15}\text{N}$ du sol (Pardo, 1997). D'autre part, l'incorporation au sol de fumier et de litière animale à $\delta^{15}\text{N}$ élevé contribue également à élever le $\delta^{15}\text{N}$ du sol (Riga *et al.*, 1971, Emmett *et al.*, 1998). L'augmentation de la nitrification amène à supposer des pertes de nitrate par drainage, avec les conséquences que l'on connaît au niveau de l'écosystème: lixiviation de cations basiques et d'aluminium, acidification et appauvrissement du sol, dégradation de la qualité des eaux. Cette hypothèse est confortée par des fortes pertes de nitrate mesurées dans le Beaujolais sur d'anciennes terres agricoles reboisées en Douglas (Marques, 1996, Jussy *et al.*, 2000). Le drainage de nitrate, appauvri en ^{15}N a pu contribuer à entretenir des valeurs élevées de $\delta^{15}\text{N}$ dans les sols (Koopmans *et al.*, 1997). Cependant, nous n'avons pas observé de relation simple entre $\delta^{15}\text{N}$ et nitrification potentielle, puisque des valeurs élevées sont associées soit à d'anciennes "chaumes" peu nitrifiantes, soit à d'anciennes terres fumées fortement nitrifiantes. Le $\delta^{15}\text{N}$ apparaît donc surtout comme un marqueur de l'intensité de l'usage agricole (Mariotti, 1982). Dans le cas des petites exploitations, l'intensité de la nitrification est variable en fonction de l'intensité de la fumure, mais aussi de la richesse du site, c'est-à-dire du substrat. Il a donc fallu s'affranchir de la variabilité entre sites en passant par des valeurs relatives à celles mesurées en forêt immémoriale. Le $\delta^{15}\text{N}$ de *Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs est lui aussi fonction de l'utilisation agricole ancienne, mais sa valeur plus basse suggère une alimentation azotée à partir d'une source pauvre en ^{15}N . L'absence de relation $\delta^{15}\text{N}$ /nitrification à Aubure pourrait être en relation avec l'intensité du drainage sous les peuplements. En effet, des mesures de drainage réalisées pendant 4 ans à l'aide de plaques lysimétriques, parallèlement à des mesures de prélèvement azotés par la végétation (méthode de Raison *et al.*, 1987 modifiée par Jussy *et al.*, 2000) montrent que le drainage dépend surtout de l'intensité du prélèvement. Certains peuplements ayant de forts besoins en azote, les pertes de nitrate par drainage sont très limitées en dépit d'une forte nitrification (Jussy, 1998).

Enfin, une partie des différences liées aux anciens usages des sols et observées dans cette étude peut être attribuée à la sélection

tion par les exploitants des terroirs les plus favorables pour les cultures, tandis que les zones peu fertiles étaient laissées à la forêt. C'est parfois indéniable. Cependant, d'une part l'attribution d'un usage à une parcelle répondait souvent à des raisons historiques plutôt qu'agronomiques. D'autre part, les différences mesurées entre les sols des forêts anciennes et ceux anciennement fertilisés dépassent la variabilité mesurée à l'intérieur des forêts anciennes. Les différences préexistantes entre placettes ont vraisemblablement été amplifiées par l'utilisation agricole et la fertilisation.

CONCLUSION

Dans les sols actuellement forestiers qui ont été auparavant utilisés par l'agriculture et qui représentent une large proportion des sols forestiers français, l'activité nitrificatrice et la disponibilité en nitrate sont modifiées par rapport aux sols des forêts anciennes. En effet, près d'un siècle après l'abandon et le reboisement en conifères, les parcelles anciennement fertilisées conservent une capacité nitrificatrice et une disponibilité en azote nitrique plus élevée que les sols des forêts immémoriales. Inversement, la nitrification et la disponibilité en azote nitrique sont plus faibles dans les sols appauvris par le pâturage, mais cet effet pourrait être lié à l'essence de plantation, en l'occurrence l'épicéa. Outre les effets du contexte biogéochimique et de la végétation forestière actuelle, l'utilisation ancienne des sols doit être considérée comme un des paramètres contrôlant la nitrification en forêt et doit donc être prise en compte dans toute tentative de modélisation du cycle de l'azote. Les résultats présentés ci-dessus soulignent de plus l'importance des anciennes utilisations des sols sur la biodiversité végétale actuelle, la distribution spatiale de la fertilité du sol et la productivité forestière. Un choix raisonné des essences et des traitements sylvicoles pourrait utilement profiter de la connaissance de l'histoire ancienne des parcelles, en permettant par exemple de spécifier les placettes susceptibles de porter des essences plus exigeantes. Enfin, le $\delta^{15}\text{N}$ du sol et de *Dryopteris carthusiana* (Villar) H.P. Fuchs peut être utilisé comme un traceur fiable des utilisations anciennes.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Jean Van Melkebecke et Catherine Belville-Zeller pour l'assistance durant les recherches historiques. Nous remercions également les forestiers du terrain (ONF, CRPF et For'Est Vosges) pour l'aide au choix des placettes. Ce travail a été financé par le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation et l'Union Européenne.

BIBLIOGRAPHIE

- ADHR (Archives Départementales du Haut-Rhin) 8AU/14428 - Plan d'exploitation de 1878.
- ADHR (Archives Départementales du Haut-Rhin) E 1543 (1684, 1702, 1716, 1787) - Registres de la visite générale faite dans toutes les forêts de la Seigneurie d'Hohenack.
- Bonneau M., Souchier B., 1994 - Pédologie. Ed. Masson, Paris, 459 p.
- Cinotti B., 1996 - Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX^e siècle. Rev. For. Fr., XLVII, 6, p. 547-562.
- Dambrine E., Bonneau M., Ranger J., Mohamed A.D., Nys C., Gras F., 1995 - Cycling and Budgets of Acidity and Nutrients in Norway Spruce Stands in Northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). In: Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains, eds G. Landmann & M. Bonneau, p. 233-258.
- El Gh'Mari A., 1995 - étude minéralogique, pétrophysique et géochimique de la dynamique d'altération d'un granite soumis aux dépôts atmosphériques acides (bassin versant du Strengbach, Vosges, France) : mécanismes, bilans et modélisation. Thèse Université Louis Pasteur Strasbourg, 199 p.
- Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W., Paulissen D., 1992 - Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Scripta Geobotanica, 18, p. 1-258.
- Emmett B.A., Kjonaas O.J., Gundersen P., Koopmans C., Tietema A., Sleep D., 1998 - Natural abundance of ^{15}N in forest across a nitrogen deposition gradient. For. Ecol. Manage., 101, p. 9-18.
- Fichter J., 1997 - Minéralogie quantitative et flux d'éléments minéraux libéré par altération des minéraux des sols dans deux écosystèmes sur granite (bassin versant du Strengbach, Vosges). Thèse Université Henri Poincaré Nancy I, 284 p.
- Fron A., 1909 - Forêts, Pâturages, Prés-Bois. Ed. Librairie Hachette, 182 p.
- Glatzel G., 1991 - Internal proton generation in forest ecosystems as influenced by historic land use and modern forestry. Fertilizer Research, 27, p. 1-8.
- Guillet B., Janssen C.R., Kalis A.J., Valk E.J., 1976 - La végétation pendant le Post-Glaciaire dans l'Est de la France. La Préhistoire française, 2 : Civilisations néolithiques et protohistoriques. Ed. Guilaine, p. 82-87.
- Guinochet M., 1973 - Phytosociologie. Collection d'écologie 1, ed Masson, Paris, 277 p.
- Huffel G., 1904 - économie Forestière. Ed. L. Laveur, Paris, Tome 1, 422 p.
- Hüttl R.F., Schaaf W., 1995 - Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. Plant Soil, 168-169, p. 31-41.
- Janssen C.R., 1987 - Type regions F-h and F-i, the Vosges mountains. In: Paleocological events during the last 150000 years - Regional syntheses of Paleocological Studies of Lakes and Mires in Europe, eds. B.E. Berglund, H.J.B. Birks, M. Ralska-Jasiewiczowa, H.E. Wright, p. 575-599.
- Janssen C.R., Kalis A.J., Tambøer Van Den Heuvel G., Valk E.J., 1974 - Palynological and Paleocological investigations in the Vosges (France) - A research project. Geologie en Mijnbouw, Vol. 53 (6), p. 406-414.
- Jéhin P., 1990 - Les forêts du val d'Orbey et leur exploitation au XVIII^e siècle. Mémoire de maîtrise Université Strasbourg, 406 p.
- Jussy J.H., 1998 - Minéralisation de l'azote, nitrification et prélèvement racinaire dans différents écosystèmes forestiers sur sol acide. Effets de l'essence, du stade de développement du peuplement et de l'usage ancien des sols. Thèse Université Henri Poincaré Nancy I, 161 p.
- Jussy J.H., Colin-Belgrand M., Ranger J., 2000 - Production and root uptake of mineral nitrogen in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Beaujolais Mounts. Forest Ecol. Manage., 128, p. 197-209.
- Kahl A., 1894 - Forstgeschichtliche Skizzen aus den Staats- und Gemeindeforsten von Rappoltsweiler und Reichenweiler. Heitzverlag, Strasbourg, 76 p.
- Kammerer O., 1983 - Le cheptel bovin dans le val d'Orbey avant la guerre de

- Trente ans : pour une histoire écologique. Histoire de l'Alsace rurale, 24, p. 149-160.
- Kœrner W., 1993 - L'histoire de l'utilisation du sol et le dépérissement de la forêt vosgienne à l'échelle locale ou parcellaire. Mémoire de maîtrise de Géographie Université Panthéon-Sorbonne, 129 p.
- Kœrner W., 1999 - Impacts des anciennes utilisations agricoles sur la fertilité du milieu forestier actuel. Thèse Université Paris 7, 188 p.
- Kœrner W., Dambrine E., Dupouey J.L., Benoît M., 1999 - $\delta^{15}\text{N}$ of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Öecologia*, 121, p. 421-425.
- Kœrner W., Dupouey J.L., Dambrine E., Benoît M., 1997 - Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology*, 88, p. 351-358.
- Kœrner W., Tabeaud M., 1993 - L'histoire de l'occupation des sols et le dépérissement dans les forêts vosgiennes. *Ann. Géo.*, 572, p. 412-414.
- Koopmans C.J., Van Dam D., Tietema A., Verstraten J.M., 1997 - Natural ^{15}N abundance in two nitrogen saturated forest ecosystems. *Öecologia*, 111, p. 470-480.
- Lefèvre Y., 1988 - Les sols du bassin d'Aubure (Haut-Rhin) : caractérisation et facteurs de répartition. *Ann. Sci. For.*, 45, p. 417-422.
- Le Goaster S., 1989 - Influence de la croissance d'un peuplement sur le prélèvement en éléments minéraux. Relations avec le dépérissement. Mémoire de 3^e année de l'E.N.I.T.E.F., 83 p.
- Le Goaster S., Dambrine E., Ranger J., 1991 - Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. I - Evolution de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. *Acta Öecologica*, 12, p. 771-789.
- Lossaint P., Rapp M., 1960 - Sur la minéralisation de l'azote organique d'un humus lent forestier à la suite d'un labour. *C. R. des séances de l'Acad. des Sciences*, 251, p. 3034-3036.
- Mariotti A., 1982 - Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse de doctorat d'état es Sciences Naturelles Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 476 p. + annexes.
- Marques R., 1996 - Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) dans les Monts du Beaujolais (France). Thèse de doctorat E.N.G.R.E.F., 240 p.
- Mühlenbeck E., 1879 - Documents historiques sur Sainte-Marie-Aux-Mines. Eds Hagemann *et al.*, Strasbourg., p. 1-50.
- Pardo L.H., 1997 - Changes in $\delta^{15}\text{N}$ over time for a clearcut and a mature forest. *Biogeochem* 97, *J. Conf. Abs.*, 2, 266 p.
- Persson T., Rudebeck A., Jussy J.H., Colin-Belgrand M., Priemé A., Dambrine E., Karlsson P.S., Sjöberg R.M., 2000 - Soil nitrogen turnover - Mineralisation, nitrification and denitrification in European forest soils. Chapitre 14 *in*: Carbon and Nitrogen Cycling in Forest Ecosystems, ed E.D. Schulze. *Ecological Studies*, Springer Verlag, Berlin (sous presse).
- Probst A., Dambrine E., Viville D., Fritz B., 1990 - Influence of acid atmospheric inputs on surface water chemistry and mineral fluxes in a declining spruce stand within a small granitic catchment (Vosges massif- France). *J. Hydrology* 116 : p. 101-124.
- Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., Timbal J., Lecoite A., Dupont P., Keller R., 1989 - Flore Forestière Française, guide écologique illustré, tome 1 : Plaines et collines. Editée par l'Institut pour le développement forestier et le Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 1785 p.
- Raison R.J., Connell M.J., Khanna P.K., 1987 - Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biol. Biochem.*, 19, p. 521-530.
- Riga A., Van Praag H.J., Brigode N., 1971 - Rapport isotopique de l'azote dans quelques sols forestiers et agricoles de Belgique soumis à divers traitements culturaux. *Geoderma*, 6, p. 213-222.
- Stark J.M., Hart S.C., 1997 - High rates of nitrification and nitrate turnover in undisturbed coniferous forests. *Nature*, 385, p. 61-64.
- Thiriart X., 1866 - La vallée de la Cleurie - Statistique, topographie, histoire, mœurs et idiomes. Imprimerie Flash-88, (réédition 1974), Epinal, 458 p.
- Wedraogo F.X., Belgy G., Berthelin J., 1993 - Seasonal nitrification measurements with different species of forest litter applied to granite-sand-filled lysimeters in the field. *Bio. Fertil. Soils*, 15, p. 28-34.