

## Disponibilité azotée et lessivage de l'azote dans un mull et un moder forestiers

J. HERBAUTS \*

Fondation Universitaire Luxembourgeoise,  
rue des Déportés, 140 B 6700 Arlon Belgique

---

### Résumé

Dans une hêtraie mélangée mésophile croissant sur un sol brun lessivé à mull mésotrophe et dans une chênaie acidophyte développée sur un sol ocre podzolique à moder, on a mesuré *in situ*, pendant 2 années consécutives, la disponibilité azotée des horizons humifères et, simultanément, les apports en azote minéral par pluviolessivage et les pertes par percolation des eaux au sein des profils (dispositif lysimétrique).

Les résultats obtenus dans ces deux stations contrastées mettent notamment en évidence que les pertes en azote minéral par lessivage (sous forme de nitrates dans le sol à mull, sous forme ammoniacale dans le sol à moder) sont négligeables comparées aux quantités libérées *in situ* dans les deux horizons humifères par le processus de minéralisation.

---

### 1. — Introduction

Les deux méthodes dont on dispose actuellement pour déterminer la disponibilité azotée d'un sol forestier, à savoir la méthode par incubation *in vitro*, en conditions contrôlées (disponibilité potentielle au sens de Van Praag et Manil, 1966), et la méthode faisant appel à un dispositif d'incubation *in situ* (disponibilité actuelle), ont été appliquées à deux types d'horizons humifères contrastés : un mull mésotrophe de sol brun lessivé et un moder de sol ocre podzolique. Simultanément, les quantités d'azote minéral restituées annuellement au sol par l'intermédiaire du pluviolessivage sous couvert forestier ont été déterminées pendant 2 années consécutives ; l'entraînement des nitrates, de l'ammonium et de l'azote organique par percolation des eaux météoriques au sein des profils a également fait l'objet de mesures directes par le biais d'un dispositif lysimétrique.

Cet ensemble de mesures échelonnées sur 2 ans a permis d'estimer les parts respectives qu'occupent les processus de minéralisation et de lessivage de l'azote dans l'économie azotée de ces deux types de sols forestiers.

---

\* Adresse actuelle : Université Libre de Bruxelles, Laboratoire de Botanique systématique et d'Ecologie, 28, av. P.-Héger, B 1050 Bruxelles.

## 2. — Stations, matériel et méthodes

Les deux stations étudiées sont situées dans le sud-est de la Belgique (Lorraine belge) ; elles sont représentatives l'une des hêtraies mélangées mésophiles (*Melico Fagetum*), type forestier très répandu dans toute la Lorraine calcaire (Dion, 1970), l'autre des chênaies-hêtraies acidophiles (*Luzulo-Quercetum subatlanticum*), type forestier largement représenté dans la zone d'affleurement des grès calcaires infraliasiques du sud de la Belgique et du Luxembourg (Duvigneaud, 1960 ; Tanghe, 1967 ; Sougnez, 1967).

### Station à mull

— Bois de la Côte à Virton-St-Mard ; revers de la cuesta des calcaires bajociens ; pente très faible ; altitude 390 m.

— Ancien taillis sous futaie en voie de reconversion vers la futaie jardinée. Hêtre dominant, en mélange avec du frêne, du sycomore, du charme, etc. ; strate herbacée dominée par le groupe du mull mésotrophe (*Asperula odorata*, *Lamium galeobdolon*, *Melica uniflora*, *Hedera helix*, etc.), avec quelques représentants du mull actif et du mull acide.

— Sol brun lessivé, développé dans le loess recouvrant la *terra fusca* issue de la dissolution des calcaires sous-jacents (sol brun lessivé complexe au sens de Gury et Duchaufour, 1972) ; mull mésotrophe typique (C/N = 13,2 ; pH-eau = 5,2 ; taux de saturation voisin de 50 p. 100).

### Station à moder

— Bois de Thonne-la-Long à Bellefontaine ; revers de la cuesta des grès calcaires Lotharingiens ; pente faible ; altitude 330 m.

— Futaie claire de chêne sessile, mêlée de bouleau et d'un peu de hêtre ; strate au sol dominée par les espèces du moder-mor (*Vaccinium myrtillus*, *Deschampsia flexuosa*, *Luzula luzuloides*, *Pteridium aquilinum*, etc.).

— Sol ocre podzolique sur sables issus de la décarbonatation des grès calcaires sous-jacents ; moder (C/N = 18,0 ; pH-eau = 3,5 ; taux de saturation = 12 p. 100).

Signalons enfin que le climat régional est de type atlantique à tendance semi-continentale ; les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 900 et 1 100 mm et les températures annuelles moyennes entre 9 °C et 7,5 °C.

Deux techniques d'incubation, l'une *in vitro*, l'autre *in situ*, ont été utilisées pour déterminer la minéralisation de l'azote :

— *Incubation en conditions contrôlées* (disponibilité azotée potentielle).

Environ 50 g de sol frais, homogénéisé et tamisé à 4 mm, sont mis à incuber à 28 °C et à une humidité proche de la capacité de rétention, pour une période de 6 semaines, à l'obscurité (Zöttl, 1958 et 1960b ; Runge, 1965 ; Lemée, 1967, etc.) ; deux répétitions par échantillon. A l'issue de l'incubation, les nitrates et l'ammonium

sont extraits par une solution KCl N et dosés par colorimétrie à l'analyseur Technicon (Warzée, 1975 ; Burdin et Egoumenides, 1973) \*.

— *Incubation in situ* (disponibilité azotée actuelle).

Différentes méthodes ont été proposées pour évaluer l'intensité de la minéralisation azotée sur le terrain et donc les quantités d'azote minéral mises saisonnièrement ou annuellement à la disposition de la végétation (Lemée, 1967 ; Eno, 1960 ; Bardin, 1970 ; Runge, 1971 et 1974 ; Faille, 1975, etc.). Nous avons utilisé un protocole assez semblable à celui préconisé par Van Praag *et al.* (1974) : une dizaine de prélèvements de l'horizon humifère sont effectués au hasard dans la station, sont mélangés, homogénéisés et tamisés à 4 mm. Cet échantillon moyen est alors divisé en cinq sous-échantillons placés chacun dans un filet nylon à mailles fines qui le met à l'abri des racines mais pas du lessivage ; chaque sous-échantillon est ensuite replacé dans le sol au niveau du A<sub>1</sub>, sous la litière, pour un laps de temps déterminé ; l'hydratation, la teneur en azote total et les teneurs en azote minéral au prélèvement sont déterminées sur les échantillons au début de chaque période d'incubation. A l'issue de celles-ci, on détermine sur chacun des cinq sous-échantillons leur teneur en azote minéral et leur hydratation. La technique d'extraction et de dosage est semblable à celle décrite plus haut.

La mesure de l'eau d'infiltration a été effectuée au moyen d'un *dispositif lysimétrique* mis au point par Vanseveren (1976) et installé avec sa collaboration. Les eaux de percolation sont récoltées avec une dépression de l'ordre de 0,1 atmosphère (environ pF 2) ; les lysimètres, placés au niveau de la projection des couronnes des arbres, ont été relevés régulièrement pendant 2 années consécutives. Sur les percolats ont été déterminés les nitrates et l'azote ammoniacal par colorimétrie à l'analyseur Technicon et l'azote total par le même procédé après minéralisation sulfo-perchlorique préalable (Warzée, 1975) ; le carbone organique a été dosé au moyen d'un Dohrmann DC-50 T.O.C. Analyzer \*. Les mêmes méthodes de dosage ont été utilisées pour les eaux de pluviollessivage préalablement filtrées.

### 3. — Résultats

#### 3.1. — Disponibilité azotée potentielle

Les résultats obtenus à l'issue des incubations *in vitro* sont groupés dans le tableau 1. Les taux de minéralisation moyens du mull et du moder sont semblables et ne différencient donc pas, dans le cas présent, ces deux types d'humus cependant contrastés ; par contre, leurs pouvoirs nitrifiants respectifs sont très nettement divergents : dans le mull, la nitrification intervient pour moitié dans la production totale en azote minéral ( $N\text{-NO}_3/N_m = 50,6$  p. 100) ; dans le moder, le taux de nitrification n'est plus que de quelques p. 100.

#### 3.2. — Disponibilité azotée actuelle

La mesure du taux de minéralisation de l'azote a été effectuée *in situ* pour les deux horizons hémorganiques (A<sub>1</sub>) pendant 2 années consécutives, au moyen du dispo-

\* Analyses effectuées à la Fondation Universitaire Luxembourgeoise avec la collaboration de S. Martin et P. Warzée.

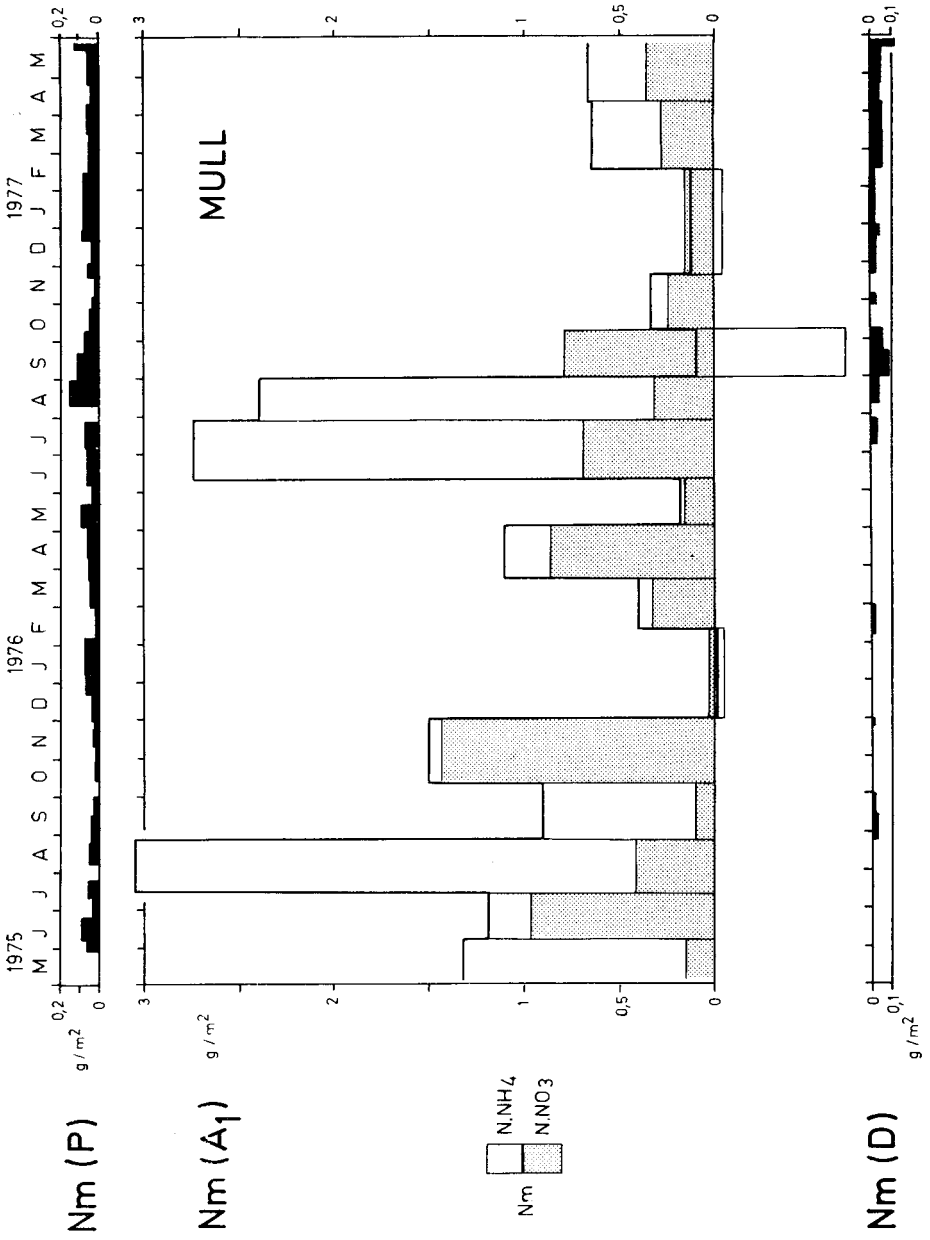
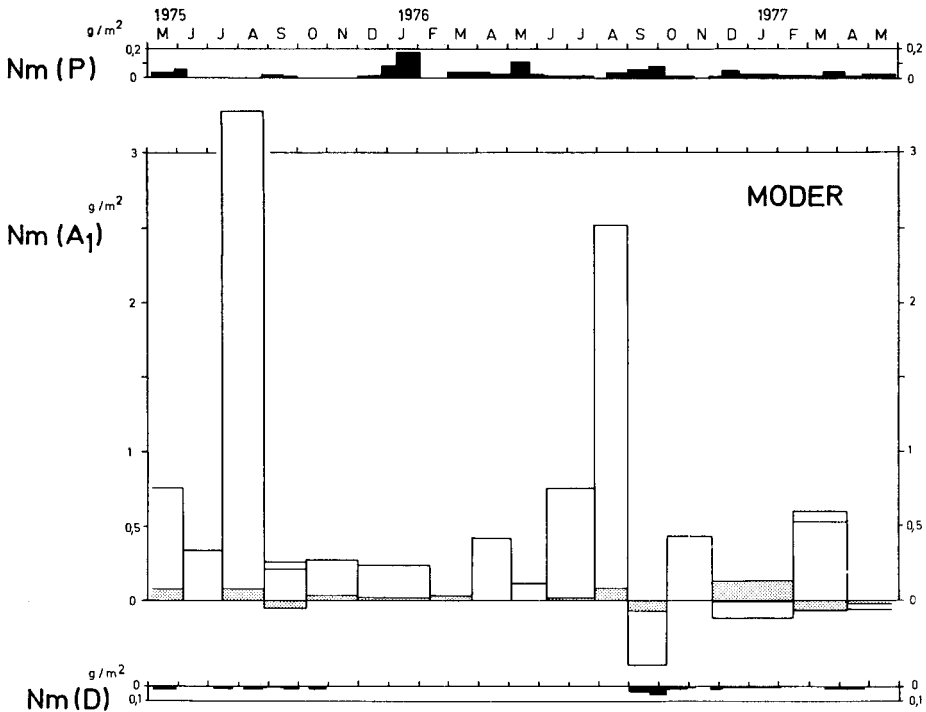


FIGURE 1.



(Suite de la FIGURE 1).

FIG. 1. — Azote minéralisé in situ dans le mull et le moder ( $N_m A_1$  en  $g/m^2$ ) par périodes approximatives de 6 semaines, comparées aux apports en azote minéral par pluviollessivage ( $N_m P$ ) et aux pertes par lessivage ( $N_m D$ ).

In situ mineralized nitrogen in mull and moder humus ( $N_m A_1$  expressed in  $g/m^2$ ) over periods of 6 weeks, compared with mineral nitrogen supply in throughfall waters ( $N_m P$ ) and with mineral nitrogen leached in drainwaters ( $N_m D$ ).

sitif décrit plus haut. Les résultats obtenus sont consignés aux tableaux 1 et 2 et représentés à la figure 1. Ici encore, les taux de minéralisation annuels sont comparables pour le mull et le moder. Mais la fourniture annuelle en azote minéral, lorsqu'elle est calculée à l'hectare, est de 70 kg/ha/an pour le mull et seulement de 40 kg/ha/an pour le moder. Par ailleurs 42 p. 100 de l'azote minéralisé est libéré sous forme de nitrates dans le mull, alors que le taux de nitrification du moder est inférieur à 2 p. 100.

Si on ne considère que l'azote minéralisé pendant la période de végétation, on observe dans les deux stations que la proportion d'azote minéralisé pendant cette période dans l'horizon humifère équivaut à plus de 80 p. 100 de l'azote libéré annuellement ; de même, dans le mull, la nitrification libère au cours de la saison de végétation de 60 à 80 p. 100 de la production annuelle en nitrates.

### 3.3. — Restitution en azote par l'intermédiaire du pluviollessivage

L'apport annuel en azote minéral par pluviollessivage (par égouttement : non compris le ruissellement le long des troncs) est d'environ 10 kg/ha/an dans la hêtraie mésophile ; il n'est que de 6 kg/ha/an dans la chênaie acidophyte (tabl. 2) ; cet apport

TABLEAU 1

Disponibilité azotée potentielle et actuelle. Azote minéralisé après 6 semaines d'incubation en conditions contrôlées (moyenne de dix épreuves d'incubation *in vitro* appliquées à des échantillons prélevés à dix époques différentes de l'année) et azote minéralisé annuellement sur le terrain (« production » cumulée pour huit périodes réparties sur l'année) dans les horizons humifères (A<sub>1</sub>) du sol brun lessivé à mull et du sol ocre podzolique à moder. Valeurs moyennes affectées de leur déviation standard

Potential and actual nitrogen availabilities. Net production of *in vitro* mineralized nitrogen (in mg/100 g dry weight) after 6 weeks of incubation and *in situ* annually mineralized nitrogen in the humic layers of the leached brown soil and the brown podzolic soil. Mean values with their standard deviations

	Azote minéralisé <i>in vitro</i>				Azote minéralisé <i>in situ</i>					
	mg/100 g T.S.				mg/100 g T.S.					
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>m</sub>	N-NO <sub>3</sub> /N <sub>m</sub> * P. 100	N <sub>m</sub> /N <sub>t</sub> ** P. 100	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>m</sub>	N-NO <sub>3</sub> /N <sub>m</sub> * P. 100	N <sub>m</sub> /N <sub>t</sub> ** P. 100
Mull	5,16 ± 2,88	5,84 ± 3,86	11,00 ± 2,99	50,6 ± 27,6	3,6 ± 0,8	4,66 ± 1,74	3,32 ± 0,85	7,98 ± 2,39	41,6 ± 22,6	2,7 ± 0,8
Moder	10,38 ± 3,75	0,09 ± 0,19	10,40 ± 3,76	1,1 ± 2,0	3,6 ± 1,1	6,80 ± 2,30	0,10 ± 0,03	6,90 ± 1,66	1,5 ± 2,9	2,8 ± 0,7

\* Taux de nitrification.

\*\* Taux de minéralisation.

TABLEAU 2

Bilan de l'azote minéral dans les deux horizons humifères étudiés  
Mineral nitrogen balance in the two studied humic layers

	Azote minéralisé annuellement dans l'horizon humifère kg/ha/an			Azote minéral restitué par pluviollessivage kg/ha/an			Azote minéral lessivé sous l'horizon humifère kg/ha/an			Azote et carbone organiques lessivés sous l'horizon humifère kg/ha/an	
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>m</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>m</sub>	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N <sub>m</sub>	N <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>
Mull	41,9	29,9	71,8	4,6	5,6	10,2	0,8	3,6	4,3	7,4	33,2
Moder	38,1	0,6	38,7	2,9	2,9	5,8	1,3	0,5	1,8	4,0	79,1

est *grosso modo* constitué pour moitié de nitrates, pour moitié d'azote ammoniacal. Ceci concorde avec les estimations effectuées dans différents types forestiers par Nihlgård (1970) et Mina (1965).

Rappelons que l'apport moyen d'azote minéral par les précipitations en dehors de toute influence d'un couvert végétal est habituellement compris entre 5 et 10 kg/ha/an (Likens et Bormann, 1967 ; Hüser, 1971 ; Masclat *et al.*, 1971).

### 3.4. — Flux d'azote au sein des profils

La percolation des eaux au travers du sol a été mesurée pendant 2 années consécutives dans le sol brun lessivé sous hêtraie et dans le sol ocre podzolique sous chênaie.

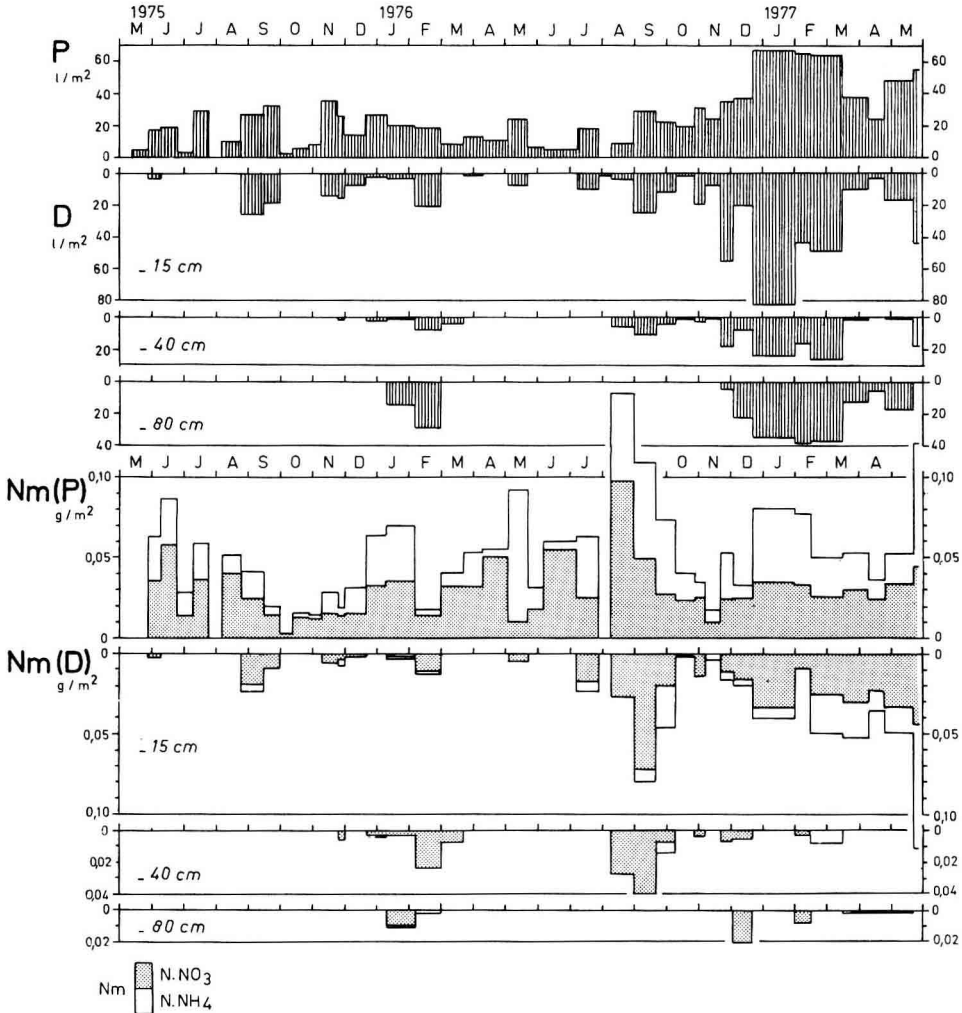


FIG. 2. — Distribution dans le temps des précipitations sous couvert forestier (P) et des eaux drainées (D) à trois niveaux du sol brun lessivé à mull ; quantités d'azote nitrique et ammoniacal apportées par les pluiolessivats ( $N_m P$ ) ou éliminées dans les percolats du sol ( $N_m D$ ).

Distribution of rainfall under forest canopy (P) and of drainwater (D) at three different levels in soil profile o leached brown soil ; amounts of nitrates and ammonium supply ( $N_m P$ ) or losses ( $N_m D$ ).

Les eaux de drainage ont été récoltées périodiquement, au moyen d'un dispositif lysimétrique, sous les horizons de mull (— 15 cm) et de moder (— 10 cm) ; en outre, dans le sol brun lessivé on a également capté les eaux de percolation à la base de l'horizon éluvial  $A_2$  (— 40 cm, ce qui correspond au sommet de l'horizon argillique  $B_t$ ) et au cœur même de l'horizon textural (— 80 cm, c'est-à-dire sous la zone d'enracinement maximum). Le relevé volumétrique des eaux drainées a permis d'estimer les quantités d'azote minéral (également d'azote organique et de carbone organique) qui sont mobilisées par unité de surface et de les comparer notamment avec les apports par pluviollessivage et avec la minéralisation de l'azote mesurée simultanément *in situ* dans les deux horizons humifères. Les données relatives à la lysimétrie sont groupées dans le tableau 2. La figure 2 reprend, à titre d'exemple, la distribution détaillée des précipitations et des eaux drainées dans le sol brun lessivé de la hêtraie mésophile (2 années d'observation).

Les concentrations en azote minéral mesurées dans les eaux lysimétriques sont en général faibles et elles fluctuent bien entendu au cours de l'année ; elles sont en moyenne de 1 à 1,5 mg/l sous les horizons  $A_1$  ; dans le  $B_t$  du sol brun lessivé, la concentration moyenne des percolats en azote minéral est de 0,3 mg/l. En tenant compte des volumes d'eau circulant dans les profils par unité de surface, on peut estimer que les quantités totales d'azote minéral qui sont soustraites annuellement aux horizons humifères, varient, selon la pluviosité de l'année, de moins de 1 kg/ha (année sèche) à plus de 4 kg/ha (année normale) dans le mull et de 0,5 kg/ha à moins de 2 kg/ha dans le moder. Dans le sol brun lessivé à mull, les nitrates représentent 80 p. 100 de l'azote minéral lessivé (90 p. 100 au niveau du  $B_t$ ), ce qui traduit bien la grande mobilité de cette forme d'azote. Dans le sol ocre podzolique, par contre, les nitrates ne représentent que 30 p. 100 de l'azote minéral des percolats : dans ce type de sol acide l'entraînement des ions ammonium devient prépondérant.

L'azote organique et le carbone organique entraînés dans les eaux de percolation ont également été déterminés (tabl. 2). Il faut souligner le contraste qui se manifeste entre les deux types d'humus quant à la composition des percolats qui en sont issus. La divergence porte non seulement sur la quantité de carbone hydrosoluble qui arrive au niveau du  $B_h$  du sol ocre podzolique et qui est plus de deux fois plus élevée que celle qui s'infiltré dans le  $A_2$  du sol brun lessivé, mais aussi sur le rapport carbone-azote des percolats (C/N de 4,5 sous le mull, de 19,8 sous le moder). Ceci concorde avec le type de pédogenèse attribué aux deux sols étudiés : brunification et lessivage dans un cas, podzolisation modérée dans l'autre (Duchaufour, 1977). Notons que la quantité de carbone entraîné sous le moder du sol ocre podzolique est du même ordre de grandeur que celles mentionnées par Suvorov (1974) pour des sols forestiers podzoliques d'Union Soviétique (50 à 90 kg/ha/an).

Signalons enfin que les quantités de carbone et d'azote organiques mobilisées dans les profils sont, à l'inverse de ce que l'on observe pour l'azote minéral, plus importantes en phénophase défeuillée : sous les horizons humifères, 90 p. 100 de l'azote organique et 60 p. 100 du carbone hydrosoluble sont lessivés en dehors de la période de végétation. Ceci s'explique vraisemblablement par la pénétration automnale et hivernale des percolats issus des litières de l'année, percolats qui semblent particulièrement riches en matières organiques hydrosolubles (Toutain, 1974).



#### 4. — Conclusions

Dans une hêtraie mélangée mésophile développée sur sol brun lessivé à mull mésotrophe et dans une chênaie acidophile croissant sur sol ocre podzolique à moder, on a tenté de déterminer différents postes du cycle de l'azote, à savoir :

- 1) la minéralisation actuelle (*in situ*) et potentielle (*in vitro*) de l'azote organique dans l'horizon humifère,
- 2) l'apport d'azote minéral par pluviolessivage,
- 3) les pertes en azote minéral (également en azote et carbone organiques) consécutives à la percolation des eaux météoriques dans les profils.

La comparaison de ces mesures qui, rappelons-le, ont été effectuées pendant 2 années consécutives, a permis de mettre en évidence les principaux points suivants :

1. — La production annuelle d'azote minéral, déterminée *in situ*, est de l'ordre de 70 kg/ha dans le mull mésotrophe et de l'ordre de 40 kg/ha dans le moder ; dans le mull, 40 p. 100 de l'azote minéral est libéré sous forme de nitrates, dans le moder le taux de nitrification est inférieur à 2 p. 100. Ces valeurs sont sans doute fort proches de la quantité d'azote minéral réellement mis à la disposition de la végétation dans l'une et l'autre station, puisque les pertes par lessivage mesurées sous les  $A_1$  sont comparativement très faibles (selon la pluviosité de l'année, de 1 à 4 kg/ha/an d'azote minéral dans le mull et de 0,5 à 2 kg/ha/an dans le moder). On serait plutôt amené à penser que l'estimation de la disponibilité actuelle est surestimée, suite à la stimulation de l'activité microbienne induite par l'homogénéisation et le tamisage des échantillons avant la mise en incubation (Runge, 1974 ; Guiot, 1975) ; mais cet effet est vraisemblablement atténué dans le mull (Gerlach, 1973).

2. — Les apports en azote minéral par pluviolessivage sont négligeables vis-à-vis des quantités d'azote libérées *in situ* par minéralisation dans l'horizon humifère, mais ils ne le sont pas vis-à-vis des quantités d'azote minéral percolant sous les horizons humifères ; les pluviolessivats restituent en effet au sol de deux à trois fois plus d'azote minéral qu'il n'en percole sous l'horizon humifère (mull ou moder).

3. — Dans les deux écosystèmes, les pertes d'azote par drainage restent négligeables par rapport à la production annuelle d'azote minéral des horizons humifères, et nous venons de voir qu'elles sont même très largement compensées par les apports (pluviolessivats). On note cependant des différences significatives entre les deux stations, dans la nature et l'intensité des transferts en profondeur des composés azotés solubles :

Sous le mull, le sol brun est un filtre efficace qui limite non seulement les pertes d'azote minérale (nitrique) en profondeur, mais également les transferts d'azote organique qui constituent une fraction hydrosoluble essentiellement polypeptidique à C/N très bas, et rapidement biodégradable.

Par contre, la podzolisation commençante, dans le sol à moder, est marquée par une dominance de l'ion ammonium sur les nitrates dans les eaux de percolation, mais aussi par la présence majoritaire d'une fraction organique à C/N beaucoup plus élevé, résistante à l'activité biologique : ce sont ces composés polyphénols-protéines qui représentent, sous l'horizon  $A_1$ , l'essentiel des pertes azotées.

Ainsi cette étude fait-elle ressortir assez nettement les divergences dans le cycle de l'azote de ces deux écosystèmes forestiers, dont les pertes par drainage profond

paraissent néanmoins très limitées, au moins dans le sol brun. Dans le sol à moder, les pertes par drainage profond n'ont pu être mesurées : elles seraient vraisemblablement plus importantes, au moins pour l'azote organique.

Reçu pour publication en octobre 1979.

### Summary

#### *Nitrogen availability and losses of mineral nitrogen by leaching in mull and moder forest humus*

During two successive years, nitrogen availability in the humic layer ( $A_1$ ) has been estimated both in a mixed beechwood growing on a loamy leached brown soil and in an acidic oakwood growing on a sandy brown podzolic soil. Mineral nitrogen supply from rainfall passing through the forest canopy and losses of mineral nitrogen by soil leaching were measured simultaneously. Results show, that in both sites losses of mineral nitrogen due to soil leaching are small when compared with the annual nitrogen mineralization rate measured in the field.

### Références bibliographiques

- AUSSENAC G., BONNEAU M. et LE TACON F., 1972. Restitution des éléments minéraux du sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'Est de la France. *Oecol. Plant.*, **7**, 1-21.
- BARDIN R., 1970. Contribution à l'étude de la minéralisation de l'azote organique *in situ* et *in vitro* de sols alcalins de Haute Durance. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, **7**, 471-492.
- BONNEAU M., 1971. Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans deux sols des Hautes-Vosges. *Sc. du Sol*, **1**, 31-46.
- BURDIN S. et EGOUMENIDES C., 1973. Détermination de l'azote ammoniacal et nitrique dans les sols et les eaux. Méthodes de dosage automatique. *Agron. trop.*, **28**, 12, 1193-1199.
- DION J., 1970. Les forêts de la France du Nord-Est. *Rev. Géogr. de l'Est*, **12**, 3-4, 1-277.
- DUCHAUFOR Ph., 1977. Pédologie. 1. Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 477 p.
- DUVIGNEAUD P., 1960. Carte écologique des groupements potentiels de Gaume. 1/40 000<sup>e</sup>. Ministère des Travaux Publics et de la Reconstruction. Administration centrale de l'Urbanisme. Enquête régionale du Bas-Luxembourg, C.E.B.L.
- ENO C. F., 1960. Nitrate production in the field by incubating the soil in polyethylene bags. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **24**, 277-279.
- FAILLE A., 1975. Recherches sur les écosystèmes des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. V. Evolution à court terme des humus à la suite de l'ouverture de clairières. VI. Influence tardive du clairéage sur les humus. *Oecol. Plant.*, **10**, 1, 43-62 et **10**, 4, 309-330.
- GERLACH A., 1973. Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Stickstoffnetto-mineralisation. *Scripta Geobotanica*, **5**, 115 p.
- GUIOT J., 1975. Estimation des réserves azotées du sol par détermination de l'azote minéral. *Revue de l'Agriculture*, 28<sup>e</sup> année, n<sup>o</sup> 5, 1117-1132.
- GURY M. et DUCHAUFOR Ph., 1972. Relations entre les formations superficielles et la pédogenèse sur substratum calcaire. *Sc. du Sol*, **1**, 19-24.
- HÜSER R., 1971. Stickstoffeinnahmen von Waldökosystemen durch Niederschläge. *Z. Pflanzener-nähr. Bodenkunde*, **129**, 1, 42-50.
- LEMÉE G., 1967. Investigations sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans les humus forestiers *in situ*. *Oecol. Plant.*, **2**, 4, 285-323.
- LIKENS G. E. et BORMANN F. H., 1967. Nutrient cycling. *Science*, **155**, 424-429.
- MASCLET A., NAGY C. et TROCME S., 1971. Apports de divers éléments par les précipitations. *Bull. A. F. E. S.*, **2**, 3-8.
- MINA V. N., 1965. Leaching of certain substances by precipitation from woody plants and its importance in the biological cycle. *Sov. Soil Sci.*, **6**, 609-617.
- NIHLGARD B., 1970. Precipitation, its chemical composition and effect on soil water in a beech and a spruce forest in south Sweden. *Oikos*, **21**, 208-217.
- RUNGE M., 1965. Untersuchungen über die Mineralstickstoff Nachlieferung an nordwestdeutschen Waldstandorten. *Flora*, **155**, 353-386.

- RUNGE M., 1971. Investigations of the content and the production of mineral nitrogen in soils. In : *Integrated Experimental Ecology, Ecological Studies*, **2**, 191-202.
- RUNGE M., 1974. Die Stickstoff-Mineralisation im Boden eines Sauerhumus-Buchen-waldes. I. Mineralstickstoff-Gehalt und Netto-Mineralisation. II. Die Nitratproduktion. *Oecol. Plant.*, **9**, 3, 201-218 et 219-230.
- SOUGNEZ N., 1967. Les forêts de la Lorraine belge. Etude phytosociologique. Les Presses Agronomiques de Gembloux, 114 p.
- SUVOROV A. K., 1974. Characteristics of migration of organic and mineral substances in plowed sod-podzolic soils. *Sov. Soil Sci.*, **6**, 18-25.
- TANGHE M., 1967. Les groupes écologiques forestiers de la Gaume. *Lejeunia*, N. S., **43**, 1-64.
- TOUTAIN F., 1974. Etude écologique de l'humification dans les hêtraies acidiphiles. Thèse Univ. Nancy, 114 p.
- VAN PRAAG H. J. et MANIL G., 1966. Observations sur le fractionnement de l'azote dans quelques sols bruns acides des forêts de l'Ardenne. *Sc. du Sol*, **1**, 65-87.
- VAN PRAAG H. J. et WEISSEN F., 1973. Elements of a fonctionnal definition of oligotroph humus based in the nitrogen nutrition of forest stands. *J. appl. Ecol.*, **10**, 569-583.
- VAN PRAAG H. J., WEISSEN F., BRIGODE N. et DUFOUR J., 1974. Evaluation de la quantité d'azote minéralisé par an, dans un sol de hêtraie ardennaise. *Bull. Soc. roy. Bot. Belg.*, **107**, 137-145.
- VANSEVEREN J.-P., 1976. Bilan d'eau dans une hêtraie ardennaise. Programme Biologique International, Projet Mirwart, rapport non publié, 10 p.
- WARZÉE P., 1975. Méthodes d'analyse automatique des eaux. Fondation Univ. Luxembourgeoise, Série Notes de Recherches, **5**, 63 p.
- ZÖTTL H., 1958. Die Bestimmung der Stickstoffmineralisation im Waldhumus durch den Brutversuch. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, NF **81**, 35-50.
- ZÖTTL H., 1960a. Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Mineralstickstoffnachlieferung des Waldbodens. *Forstw. Cbl.*, **79**, 72-88.
- ZÖTTL H., 1960b. Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial. *Plant and Soil*, **13**, 2, 166-182 ; **13**, 3, 183-206 et **13**, 3, 207-223.
-