



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 4171

To link to this article : URL : <http://prodinra.inra.fr/record/129468>

<p>To cite this version : Ranger, Jacques and Dambrine, Etienne and Nys, Claude and Probst Anne, and Gelhaye L&D, and Nourrisson, Gilles and Pollier, Benoît <i>Dégradation de la qualité des eaux en sol forestier acide montagnard, possibilité de restauration</i>. (1992), Dossiers de l'Environnement de l'INRA, n°4, pp. 174-179, ISSN 1257-4627</p>

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Dégradation de la qualité des eaux en sol forestier acide montagnard, possibilité de restauration

par Jacques Ranger*, Etienne Dambrine*, Claude Nys*
et Anne Probst**

avec la collaboration de L. et D. Gelhaye*, G. Nourrisson* et B. Pollier*

* INRA CRF Nancy : station des sols forestiers Champenoux 54280 Seichamps

** CNRS/Centre de Géochimie de la Surface, 1 rue de Blessig, 67084 Strasbourg

La forêt est traditionnellement considérée comme une zone privilégiée pour collecter les eaux propres à la consommation humaine. C'est encore très généralement le cas, mais quelques écosystèmes étudiés de manière approfondie (de 3 à 5 ans de mesures) dans les Ardennes et dans les Vosges montrent que dans les sols acides, les eaux percolant à la base du sol ne sont pas pures. En fonction de divers paramètres caractérisant le fonctionnement de l'écosystème, d'ordre biologique, édaphique ou hydrologique la dégradation de la qualité des eaux peut ou non être transmise aux sources et aux ruisseaux, ce qui a des implications importantes sur leur aptitude à la consommation et pour la vie sauvage. Cette dégradation des eaux est liée à l'acidification continue des sols qui se traduit par une aluminisation du complexe absorbant du sol et une diminution concomitante des "bases échangeables" (Ca et Mg).

Nous essayons dans ces écosystèmes d'identifier le rôle de divers paramètres du fonctionnement actuel des sols, ayant une action sur la qualité des solutions de drainage. L'échelle utilisée est toujours celle de la placette forestière, avec en plus en fonction des sites, des données obtenues soit sur des sources soit sur les ruisseaux drainant le bassin versant. Dans deux sites, celui du Bonhomme (Vosges) et celui de la Croix-Scaille (Ardennes), un amendement calci-magnésien a été utilisé pour améliorer l'état sanitaire des peuplements et la qualité du sol.

Tableau I. Caractéristiques des sites étudiés

site	essence	sol	échelle	pH	altitude	pluviométrie
Aroennes	épicéa/feuillus	brun acide schistes	placette + BV	3,8	390 m	1100 mm
Audure (Vosges)	épicéa	brun acide granite	placette + BV	3,8	1100 m	1400 mm
Bonhomme (Vosges)	épicéa	podzolique granite	placette + BV	3,4	1100 m	1550 mm
Gemainpoutte (Vosges)	épicéa	brun acide gneiss	placette - source	3,9	650 m	1120 mm

Résultats

A l'échelle de l'écosystème forestier

Les solutions gravitaires sont acides (tab.II) : elles contiennent de l'acidité libre, mais également de l'aluminium, qui représente une forme de transfert de l'acidité vers les couches profondes. En effet, son insolubilisation libérera la même quantité de protons que celle qui a été consommée pour sa mise en solution. L'aluminium a de plus un rôle propre, de part sa forte toxicité pour les organismes vivants.

Ces solutions contiennent des charges importantes en anions mobiles, nitrates et sulfates. C'est particulièrement le cas des sols des Ardennes et de Gemaingoutte pour le nitrate, ou les valeurs extrêmes enregistrées atteignent le seuil de non-potabilité pour cet élément. Les profils de concentration des solutions du sol dans les différents horizons montrent que dans tous les systèmes étudiés la nitrification est un mécanisme constant, qui domine le chimisme des solutions. Ces concentrations élevées correspondent en valeur absolue à des pertes modulées par le bilan hydrologique (tableau III).

Tableau II. Concentrations (mg/l) observées à la base du sol (de 60 à 80 cm, correspondat à la limite inférieure de l'enracinement)

site	N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ²⁻	Al ³⁺	H ⁺
Ardennes (épicéa)	7,7	11,2	4,5	0,15
Aubure	2,7	2,6	1,6	0,06
Bonhomme	3,1	3,9	3,3	0,06
Gemaingoutte	6,1	4,6	3,1	0,07

Tableau III. Drainage d'éléments à la base des sols (en kg/ha/an)

site	drainage	N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ²⁻	Al ³⁺	H ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ardennes	444	31,0	51,1	18,5	0,4	14,0	2,7
Aubure	726	21,6	19,4	11,5	0,5	11,5	2,4
Bonhomme	740	14,6	28,6	19,5	0,4	7,5	2,6
Gemaingoutte	296	16,8	13,8	9,6	0,2	10,2	6,0

Origine de ces pertes observées

La notion de stabilité des écosystèmes est complexe, par exemple on ne sait pas si un écosystème stable perd ou non de l'azote par drainage profond. Cette notion de stabilité ne doit pas être confondue avec l'état actuel d'équilibre qui lui peut fluctuer.

Nys (1987) montre qu'un peuplement feuillu apparemment à l'état d'équilibre (il faudrait des études à long terme pour en être certain) perd de l'azote en dehors de la saison de végétation, quand l'azote produit n'est pas prélevé par les arbres. Pendant cette période de l'année, le vecteur nitrate mobilise des cations en vertu de la loi d'électroneutralité de la solution.

Dans les systèmes étudiés, on peut identifier les causes des pertes par drainage profond, qui résultent toujours d'un découplage entre production (incluant les apports) et immobilisation biologique (par les micro-organismes ou les végétaux supérieurs) :

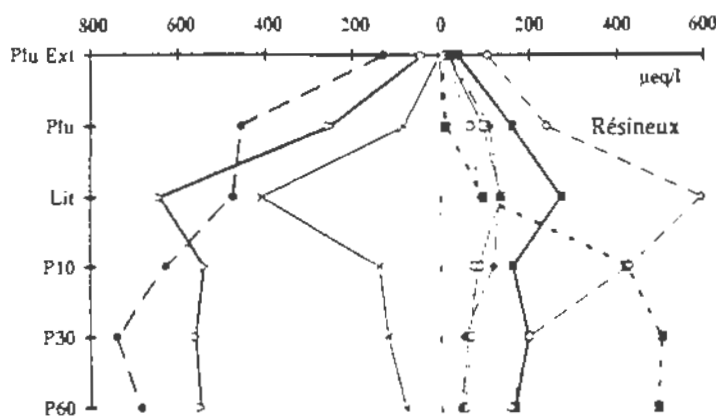
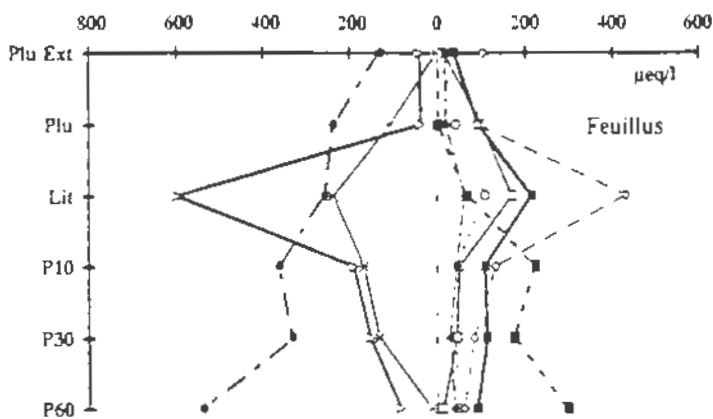
- Il existe une certaine proportionnalité entre apports atmosphériques et pertes profondes, par exemple dans les Ardennes, les pertes élevées sous épicéa (40,3 kg.ha⁻¹.an⁻¹) correspondent à des apports élevés de 50,3kg), alors que dans les Vosges, les pertes plus modestes variant de 10 à 20 kg.ha⁻¹.an⁻¹ ont lieu dans des écosystèmes où les apports sont du même ordre de grandeur ;
- Les écosystèmes dépérissants ont des pertes plus élevées que les systèmes sains situés dans les mêmes conditions. Le prélèvement limité en éléments nutritifs par les arbres dépérissants conduit à des solutions plus concentrées : c'est le cas en particulier de l'azote, pour des raisons multiples mal identifiées (déséquilibres alimentaires, altération du système d'absorption etc..) ;

- un écosystème sain peut avoir des pertes élevées s'il est en voie de rééquilibrage par suite de modifications des pratiques culturales : l'exemple de Gemaingoutte appartient à ce groupe. Il s'agit d'un écosystème sain, très productif, mais dont le bilan entrées-sorties est déficitaire pour de nombreux éléments. L'explication la plus probable de ce phénomène est que le compartiment organique n'a pas atteint un équilibre stable. En effet, il s'agit d'une première génération d'épicéa issue de plantation sur une ancienne friche pâturée.

A l'intérieur de chacun de ces groupes, des facteurs supplémentaires peuvent moduler les observations :

- la variabilité des facteurs climatiques : des "flush" de nitrification sont observables après des périodes sèches, la diminution des précipitations peut conduire à la diminution des pertes par drainage, mais augmenter la concentration des solutions :

- le traitement sylvicole par l'essence choisie, l'intensité de la récolte, la longueur de la révolution forestière ou la méthode de récolte, peut influencer nettement sur les valeurs des concentrations et des bilans, à l'intérieur d'un même écosystème. Par exemple dans les Ardennes NYS, (1987), montre que pour un climat de pollution constant, les pertes d'azote sous feuillus sont de $13.6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$, alors qu'elles sont de 40.3 kg sous les épicéas adjacents. Le puissant effet filtre des conifères sempervirents est en grande partie responsable de ces différences entre essences ce que traduit la figure 1 au plan qualitatif. Dans des conditions écologiques identiques l'âge du peuplement influence largement sur la concentration des solutions du sol. L'exemple d'Aubure (Dambrine *et al.*, 1992) est caractéristique : sous un peuplement mature d'épicéa, les concentrations à 60 cm de profondeur, en nitrates (N-NO_3^-) et en Aluminium sont respectivement de 2.7 et 1.6 mg/l , alors qu'elles ne sont que de 0.35 et 0.72 mg/l pour les mêmes éléments sous un jeune peuplement de 30 ans, dont le prélèvement est beaucoup plus élevé (fig. 2). L'effet d'un amendement calcaire-magnésien est spectaculaire dans les sols acides. Un exemple pris dans les Vosges (site du Bonhomme) montre que les concentrations en nitrates, aluminium et protons à la base du sol ont été notablement diminuées, tandis que celles en calcium et en magnésium ont été augmentées (fig. 3). L'apport complémentaire de fertilisants à cet amendement a par contre conduit à une augmentation de la concentration en azote des solutions à la base du sol.



—○— K —●— Ca —□— Mg - - - ■ - - - Al
 - - - > H⁺ - - - < NH₄ —○— NO₃ —●— SO₄ —□— PO₄

Plu ext = pluviomètre externe ; Plu = pluviessivat ; Lit = litière.

Figure 1. Effet de l'essence sur la concentration en éléments majeurs des eaux gravitaires dans l'expérience des Ardennes (d'après Nys 1987)

A l'échelle du bassin versant

La neutralisation de l'acidité et la disparition de l'azote entre la base du sol et l'émissaire des bassins versants dépendra de la nature du sous-sol et du cheminement des eaux (tableau IV).

Diverses situations ont été observées :

- dans les Ardennes, Nys (données non publiées), a analysé pendant un an les eaux du ruisseau drainant le bassin versant où sont installées ses placettes d'étude. Ce bassin versant est peuplé majoritairement de feuillus, le ruissellement hypodermique conduit à des eaux toujours acides, chargées en nitrates et en aluminium :

- dans le bassin versant d'Aubure (Vosges), dont les peuplements sont essentiellement résineux, et la roche mère granitique, Probst *et al.* (1990), observent des eaux de ruissellement le plus souvent neutres si l'on excepte la période de fonte des neiges. Ces eaux ne sont pas neutralisées dans le sol mais dans l'arène granitique :

- dans l'expérience du Bonhomme (Mohamed, 1992), la neutralisation est moins bonne, les eaux de ruisseau ont un pH moyen de 5,8. Dans cet écosystème, la neutralisation se fait assez profondément dans l'arène puisque la solution collectée par des plaques lysimétriques installées à 120 cm de profondeur montre des compositions assez proches de celles observées à 60 cm et d'une source captée encore acides.

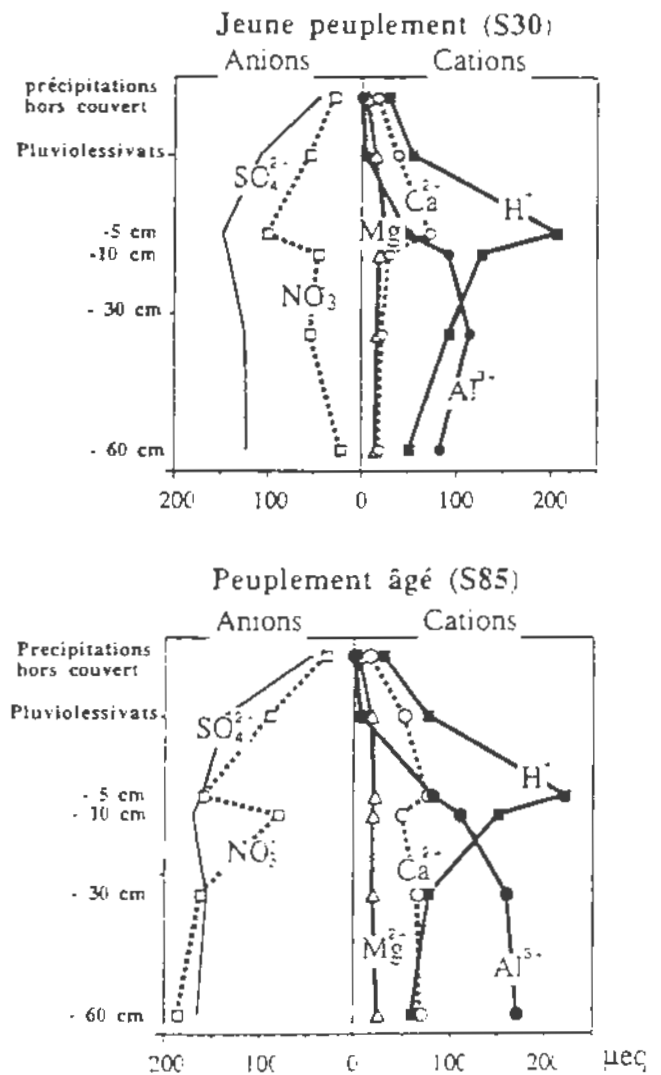


Figure 2. Effet de l'âge du peuplement d'épicéa sur la concentration en éléments majeurs des eaux gravitaires à Aubure (d'après Probst *et al.*, 1990b).

Tableau IV. Concentrations observées dans les sources (s) ou au niveau des ruisseaux (r) drainant le bassin versant (en mg/l)

site	pH	N-NO ₃ ⁻	S-SO ₄ ²⁻	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ardennes (r)	4,6	0,8	1,4	0,15	0,7	0,6
Aubure (s)	6,02	0,56	3,28	tr	3,58	0,57
(r)	6,1	0,5	3,4	tr	3,73	0,74
Bonhomme (s)	5,2	1,44	2,07	0,06	1,9	0,54
(r)	5,8	0,62	1,64	0,04	1,5	0,40
Gemaingoutte	7,1	2,1	5,45	0,01	5,3	1,80

Probst *et al.* (1990), ont réalisé une étude portant sur 39 ruisseaux dans les Vosges dont les résultats permettent de mettre en évidence le rôle des paramètres végétation, roche mère et climat de pollution, sur leur chimisme. Les résultats montrent que 15 ruisseaux sur 39 sont acides (pH < 5,6) et relativement riches en aluminium en sulfates et en nitrates. 21 ruisseaux ont une très faible alcalinité en particulier en période de fonte des neiges.

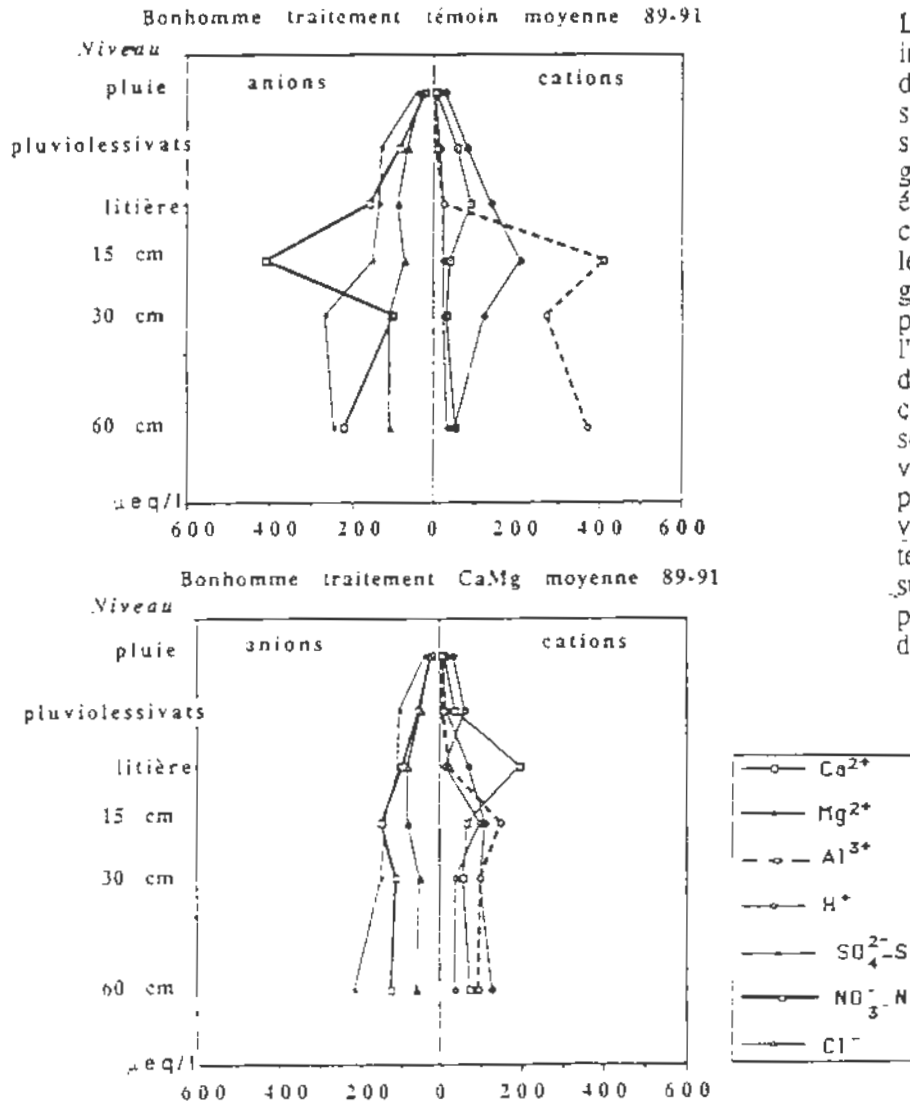


Figure 3. Effet d'un amendement calcimagnésien sur la concentration en éléments majeurs des eaux gravitaires dans l'expérience du Bonhomme (d'après Mohamed, 1992)

L'effet de la végétation est important (via l'effet filtre des peuplements de conifères sous lesquels les apports au sol d'acidité ou d'éléments générateurs d'acidité sont élevés) et ajoute ses effets à celui de la roche mère. Dans le cas de sols développés sur granite acide ou sur grès pauvre, la neutralisation de l'acidité n'est pas réalisée dans le sol, ni même complètement dans le sous-sol. Les conséquences sur la vie aquatique sont très nettes puisqu'en dessous d'une valeur de pH de 5.5 les teneurs en Al deviennent supérieures à 200 ppb et les populations de truites disparaissent (fig. 4).

La manipulation d'écosystème se répercute sur la qualité des eaux superficielles.

- La coupe à blanc des peuplements forestiers mettant brutalement en lumière les humus, conduisent à un "flush" de minéralisation décelable parfois au niveau des ruisseaux. Le cas du Hubbard-Brook forest NH aux USA est le plus célèbre (Bormann *et al.*, 1968) : la récolte du peuplement a conduit à des concentrations en nitrates de 15 mg/l. pendant plusieurs années après la coupe, en raison de l'utilisation d'herbicides pour éliminer la végétation concurrente des nouvelles plantations ;

- Dans les Ardennes un chaulage de bassin versant sous pessière montre que dans cet écosystème acide, à ruissellement hypodermique, le chaulage (1.5 t de calcaire magnésien broyé par ha) remonte assez rapidement le pH du ruisseau de quelques dixièmes d'unité, ce qui ne modifie pas les concentrations en Al ; le nitrate augmente cependant sensiblement de 0.4 à 0.6 mg/l. Il ne s'agit que des effets initiaux.

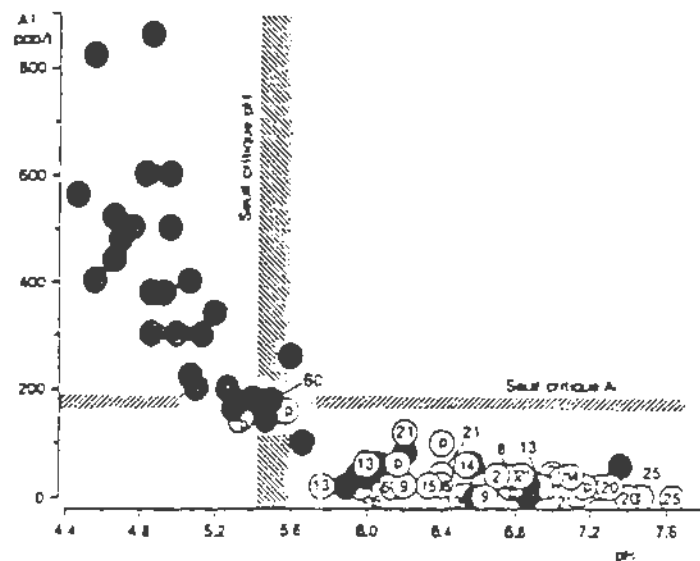
En conclusion

Le mythe de la forêt propre : les solutions des sols forestiers acides que nous avons observés sont chargées en nitrates et en aluminium, ce qui prouve que ces sols ne jouent plus leur rôle "épurateur". Ces éléments sont ou non transférés vers les eaux superficielles en fonction de l'aptitude du sous-sol à neutraliser leur acidité, ou à "immobiliser" l'azote, et/ou en fonction du système hydrologique (migration profonde des eaux ou ruissellement hypodermique).

Sans entrer dans le système forestier intensif, il est clair que les pratiques sylvicoles peuvent avoir des effets importants sur la qualité des eaux superficielles que ce soit directement (réduction de la longueur des révolutions...) ou indirectement (choix d'une essence dont l'effet filtre est important pour les polluants atmosphériques par exemple).

roncs noirs = ruisseaux sans truites
roncs blancs = ruisseaux peuplés : le chiffre du rond blanc indique le nombre de truites pêchées sur 50 m de ruisseau ; p = présence en hachuré : seuils de toxicité apparents

Figure 4. Relation entre pH et teneur en Al total dissous dans les eaux de ruisseaux des Vosges.



Références bibliographiques

- BORMANN F.H., LICKENS G.E., FISHER D.W., et PERCE R.S., 1968. Nutrient loss accelerated by clear-cutting of a forest ecosystem. *Science*, Vol. 159, 882-884.
- DAMBRINE E., RANGER J., POLLIER B., BONNEAU M., GRANIER A., CARISEN N., LU P., PROBST A., VIVILLE D., BIRON P., GARBAYE J. et DEVEVRE O., 1992. Influence of various stresses on Ca and Mg nutrition of a spruce stand developed on an acidic soil. *Proceed. 1st Eur. Symp. on Terres Ecosyst.*, Florence, ma: 91, 465-472.
- MOHAMEL AHAMED DALDOUM, 1992. *Rôle du facteur saaphique dans le fonctionnement biogéochimique et l'état de santé de deux pessières vosgiennes. Effet d'un amendement calcium-magnésier*. Thèse Univ. Nancy I (à paraître).
- NYS C., 1987. *Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier : conséquences des aménagements*. Thèse Univ. Nancy I, 207p.
- PROBST A., MASSABEAU J.C., PROBST J.L. et FRITZ B., 1990. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du substratum, conséquences pour les populations de truites ; Le cas des ruisseaux des Vosges. *C.R. Acad. Sci. Paris* 311, sér.II., 405-411.
- PROBST A., DAMBRINE E., VIVILLE D. et 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. *J. of Hydrology*, 116, 101-124.