

ARTICLES

Charges critiques d'acidité en polluants atmosphériques en France : conséquences vis-à-vis des sols et des peuplements forestiers

Critical loads of acidity for France : consequences on forest ecosystems

Jean-Paul PARTY*, Anne PROBST**, Anne-Laure THOMAS*, Étienne DAMBRINE***

NDLR : Article issu du Séminaire ADEME « Pollution atmosphérique et charges critiques : Bilan et perspectives des recherches menées en France », 15 mai 2001, Paris (MATE).

Résumé

Depuis plus de 10 ans, les charges critiques ont été à la base des négociations internationales pour la réduction de la pollution atmosphérique. Les calculs de charges critiques d'acidité reposent sur l'estimation d'un flux de cations issu de l'altération des minéraux du sol et de la roche et sur un drainage acceptable de protons et d'aluminium. Les charges critiques d'acidité ont été calculées puis cartographiées au 1/1 000 000 pour les écosystèmes forestiers français. La carte obtenue résulte de la combinaison de données pédologiques, géochimiques, climatiques et de données minéralogiques extrapolées à partir d'un nombre limité de sites de référence (issus entre autres du réseau RENECOFOR). Pour la France, les charges critiques d'acidité sont faibles (moins de 1,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹) pour moins de 15 % des forêts françaises de production, soit 17 000 km². Les surfaces où les charges critiques sont dépassées se situent principalement dans le nord-est de la France : Vosges, Ardennes, et dans une moindre mesure dans le sud-ouest de l'Île-de-France et le long des bordures du Massif central, en Bretagne et en Normandie.

Abstract

For the last ten years, critical loads assessment has been the basis of international negotiations to reduce atmospheric pollutants. Critical loads calculations consider the flux of base cations from mineral weathering, and an acceptable drainage of protons and aluminium. Critical loads of acidity were calculated and mapped at the 1/1 000 000 scale for the French forest ecosystems using Geographical Information System (GIS). This map results of the combination of gridded data on pedology, geochemistry and climate, as well as extrapolated data on mineralogy obtained on a limited number of studied sites (RENECOFOR Network). Critical loads of acidity are low (less than 1.0 keq.ha⁻¹.yr⁻¹) for less than 15 % of the productive French forests, i.e. about 17 000 km². Critical loads are exceeded mainly in the northern part of France : Vosges, Ardennes, and to a lesser extent in the South-Western part of Ile-de-France and along the borders of the Massif Central, Brittany and Normandy.

* SOL-CONSEIL, 2, rue de Roppenheim, 67000 Strasbourg.

** UPS-CNRS, LMTG-UMR 5563, 38, rue des 36 Ponts, 31400 Toulouse.

*** INRA Nancy, Équipe Cycles biogéochimiques, 54280 Champenoux.

Introduction

Les charges critiques sont définies comme des seuils de contamination au-delà desquels des effets nocifs peuvent survenir sur les composantes de notre environnement, en particulier forestier [1]. Le respect de ces seuils a pour principal objectif de protéger l'équilibre à long terme des écosystèmes. Cette notion de charges critiques est la base d'évaluation des protocoles définis par la Commission économique européenne des Nations Unies (CEE-ONU) pour proposer des réductions d'émissions polluantes (SO_2 et NO_x , en particulier). Cette méthode a été mise en œuvre depuis la fin des années 80 dans les pays d'Europe du Nord.

En France, les nombreuses données nécessaires aux calculs de ces charges critiques ont été acquises depuis 1992 [2, 3] et sont progressivement mises en base de données [4-6]. La mise en œuvre depuis 1991 de réseaux d'observation des forêts [CEE, Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR)] a aussi permis d'affiner et de valider les hypothèses cartographiques réalisées plus particulièrement vis-à-vis des charges critiques d'acidité [7].

Une fois les cartes de charges critiques réalisées, l'intérêt principal réside dans leur confrontation avec les dépôts actuels de polluants atmosphériques. Ceci permet ainsi de confirmer les espaces où des effets pourraient être constatés sur les peuplements forestiers.

Méthodes du calcul des charges critiques d'acidité

Le calcul des charges critiques d'acidité repose sur une estimation du flux de cations basiques libéré par l'altération des minéraux des sols et des roches et du drainage de protons et d'aluminium. Il est établi sur la base d'un bilan de masse à l'état d'équilibre (méthode SSMB, Steady State Mass Balance [8]) selon l'équation suivante :

$$\text{CL}_{\text{Ac}} = \text{BC}_w + Q \cdot ([\text{H}^+]_{\text{crit}} + [\text{Al}^{+++}]_{\text{crit}})$$

BC_w correspond à l'altération en cations basiques ;
Q est le drainage ;

$[\text{H}^+]_{\text{crit}}$ est la concentration critique de protons dans les eaux de drainage ; celle-ci correspond pour les sols forestiers français à 25 $\mu\text{eq/l}$, soit un pH de 4,5-4,6 [7] ;

$[\text{Al}^{+++}]_{\text{crit}} = R_{\text{crit}} \cdot (\text{BC}_d + \text{BC}_w - \text{BC}_u)$, avec R_{crit} le rapport $\text{Al/BC} = 1,2$ (BC pour cations basiques, avec BC_d pour le dépôt atmosphérique de cations basiques, BC_u le prélèvement de cations basiques par les arbres forestiers [9].

Cette équation suppose donc que les charges critiques d'acidité correspondent à la capacité de neutralisation de l'acidité par altération de la roche, de l'altérite et du sol (BC_w) augmentée d'un drainage acceptable de protons et d'aluminium. Ceci signifie

qu'une acidification s'accompagnant d'une libération de protons et d'aluminium peut être tolérée tant qu'elle reste compatible avec l'équilibre écologique et l'état sanitaire des peuplements forestiers. Ce drainage acceptable est estimé d'une part avec les concentrations en $[\text{H}^+]$ critique et, d'autre part, selon le rapport Al/BC (voir ci-dessus). Lorsque ces seuils sont dépassés, les conditions de la croissance racinaire des arbres forestiers deviennent défavorables. Les valeurs de ces seuils établis d'après de nombreuses données européennes [10] ont été vérifiées pour des peuplements forestiers vosgiens et à l'aide des données du réseau RENECOFOR [sous-réseau CATAENAT (Charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres)] pour les solutions de sols.

Enfin les dépassements de ces charges critiques par les dépôts atmosphériques acides (EX pour « exceedance » en anglais) ont été calculés comme suit :

$$\text{EX} = S_d + N_d - \text{BC}_d - \text{CL}_{\text{Ac}}$$

S_d correspondant au dépôt par voie atmosphérique des composés du soufre, N_d des composés de l'azote, BC_d des cations basiques, et CL_{Ac} aux charges critiques d'acidité calculées.

Démarche pour la cartographie des charges critiques d'acidité

La cartographie a été réalisée en utilisant des modèles empiriques établis à partir des données de la carte des sols de France d'une part [11], et sur la base des données acquises spécifiquement pour ce travail d'autre part [7]. Elles ont ensuite été validées à l'aide des données disponibles sur les réseaux existants (CEE et RENECOFOR). Pour cela, plusieurs étapes ont été nécessaires :

1. Une carte « pédogéochimique » des sols de France (Figure 1, ci-contre) prenant en compte, outre la pédogénèse, la géochimie des matériaux constitutifs des sols, a d'abord été construite avec la base de données de la carte des sols de France au 1/1 000 000 [11].
2. Les valeurs d'altération ont ensuite été calculées sur 12 sites de référence représentatifs des grandes familles pédogéochimiques définies, à l'aide du modèle PROFILE [12] sur la base d'analyses chimiques totales et d'une minéralogie reconstituée à l'aide de deux méthodes normatives : UPPSALA model [13, 14] et la mésonorme de Barth (Barth [15], adaptée par Stussi [16, 17]).
3. Une relation observée entre les valeurs d'altération calculées, la granulométrie et la somme des cations basiques mesurés dans les sols des 12 sites de référence a été établie. Ce modèle empirique a été ensuite appliqué aux 102 placettes du réseau RENECOFOR.

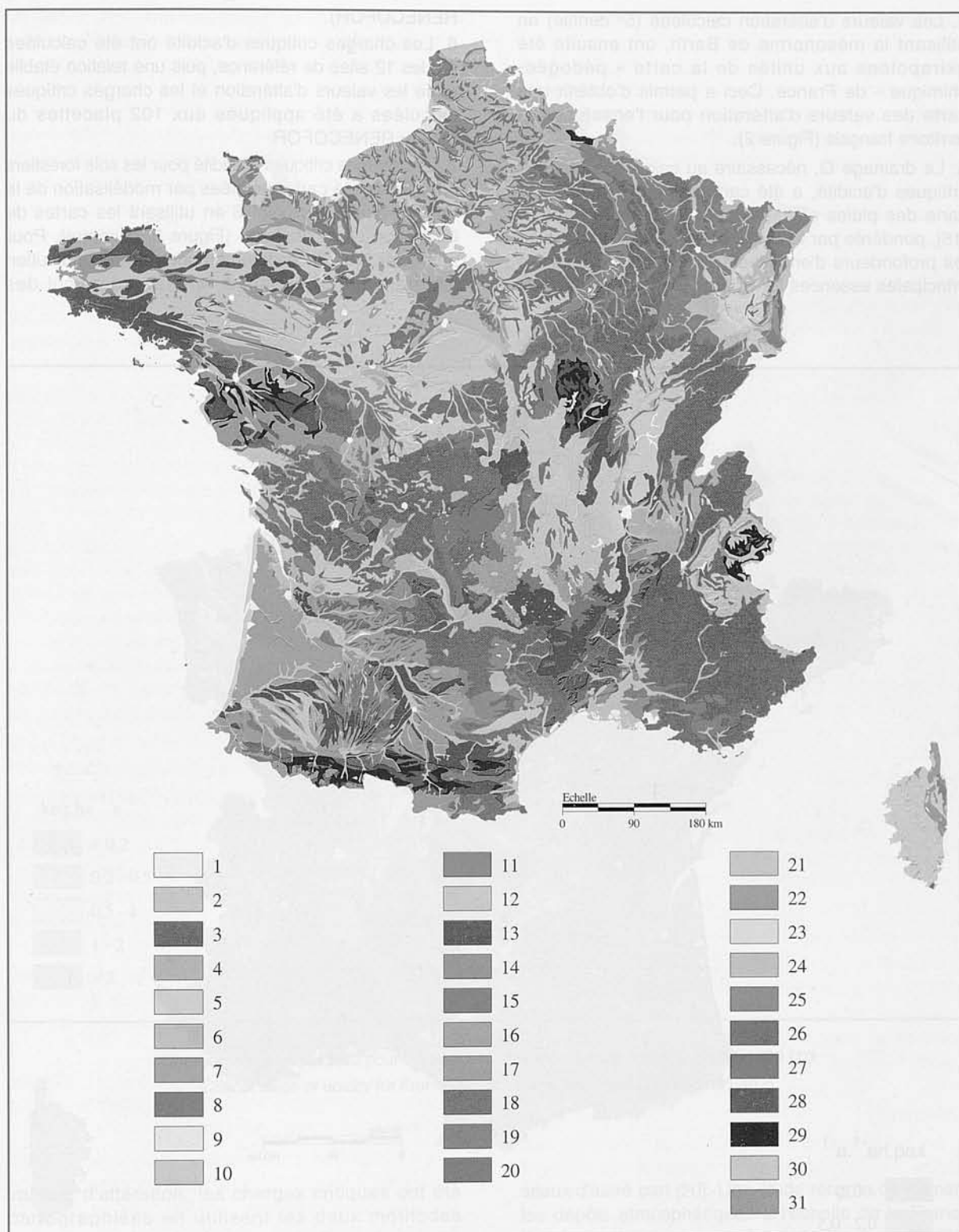


Figure 1.

Matériaux géologiques et sols du territoire français (carte construite d'après les données de la carte pédologique de France, INRA, 1998. (In : Party, 1999 [7])).

- 1 à 4 : sols issus de formations sédimentaires meubles et calcaires (ex. dunes, alluvions et conglomérats calcaires, loess).
 5 à 16 : sols issus de formations sédimentaires meubles et acides (ex. sables des Landes, de Fontainebleau, formations à silex, lehms, alluvions anciennes ou récentes, formations glaciaires acides).
 17 à 20 : sols issus de formations sédimentaires dures et calcaires (ex. calcaires, marnes, certains flyschs).
 21 à 24 : sols issus de formations sédimentaires dures et acides (ex. schistes et grès).
 25 à 29 : sols issus de formations métamorphiques (ex. micaschistes, gneiss, granitoïdes).
 30 et 31 : sols issus de formations volcaniques (ex. rhyolites, tufs, basaltes).

Parent materials and soils of France (based on the pedological map of France, INRA, 1998. (In : Party 1999 [7])).

4. Les valeurs d'altération calculées (5^e centile) en utilisant la mésonorme de Barth, ont ensuite été extrapolées aux unités de la carte « pédogéochimique » de France. Ceci a permis d'obtenir une carte des valeurs d'altération pour l'ensemble du territoire français (Figure 2).

5. Le drainage Q, nécessaire au calcul des charges critiques d'acidité, a été cartographié à l'aide de la carte des pluies efficaces pour le territoire français [18], pondérée par le calcul des réserves utiles selon les profondeurs d'enracinement constatées pour les principales essences forestières (données du réseau

RENECOFOR).

6. Les charges critiques d'acidité ont été calculées sur les 12 sites de référence, puis une relation établie entre les valeurs d'altération et les charges critiques calculées a été appliquée aux 102 placettes du réseau RENECOFOR.

7. Les charges critiques d'acidité pour les sols forestiers ont ensuite été cartographiées par modélisation de la relation établie au point 6 en utilisant les cartes de l'altération et du drainage (Figure 3, ci-contre). Pour apprécier l'influence des méthodes de reconstitution minéralogique qui sont à la base du calcul des

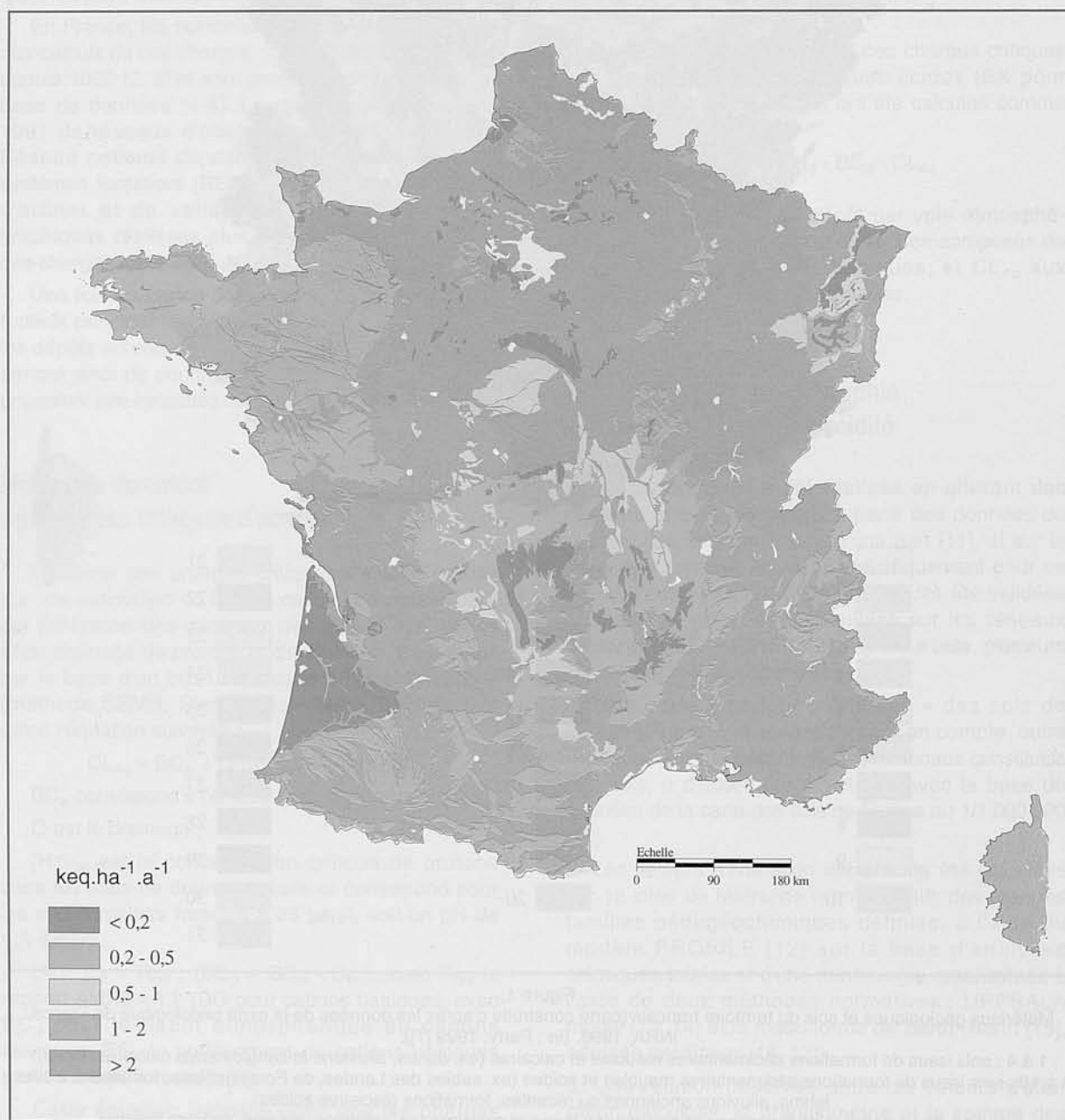


Figure 2.

Classes d'altération des matériaux géologiques et des sols du territoire français, calculées selon le modèle PROFILE (Party, 1999 [7]).

Weathering rates for French parent materials and soils, calculated using the PROFILE model (Party, 1999 [7]) (keq.ha⁻¹.an⁻¹).

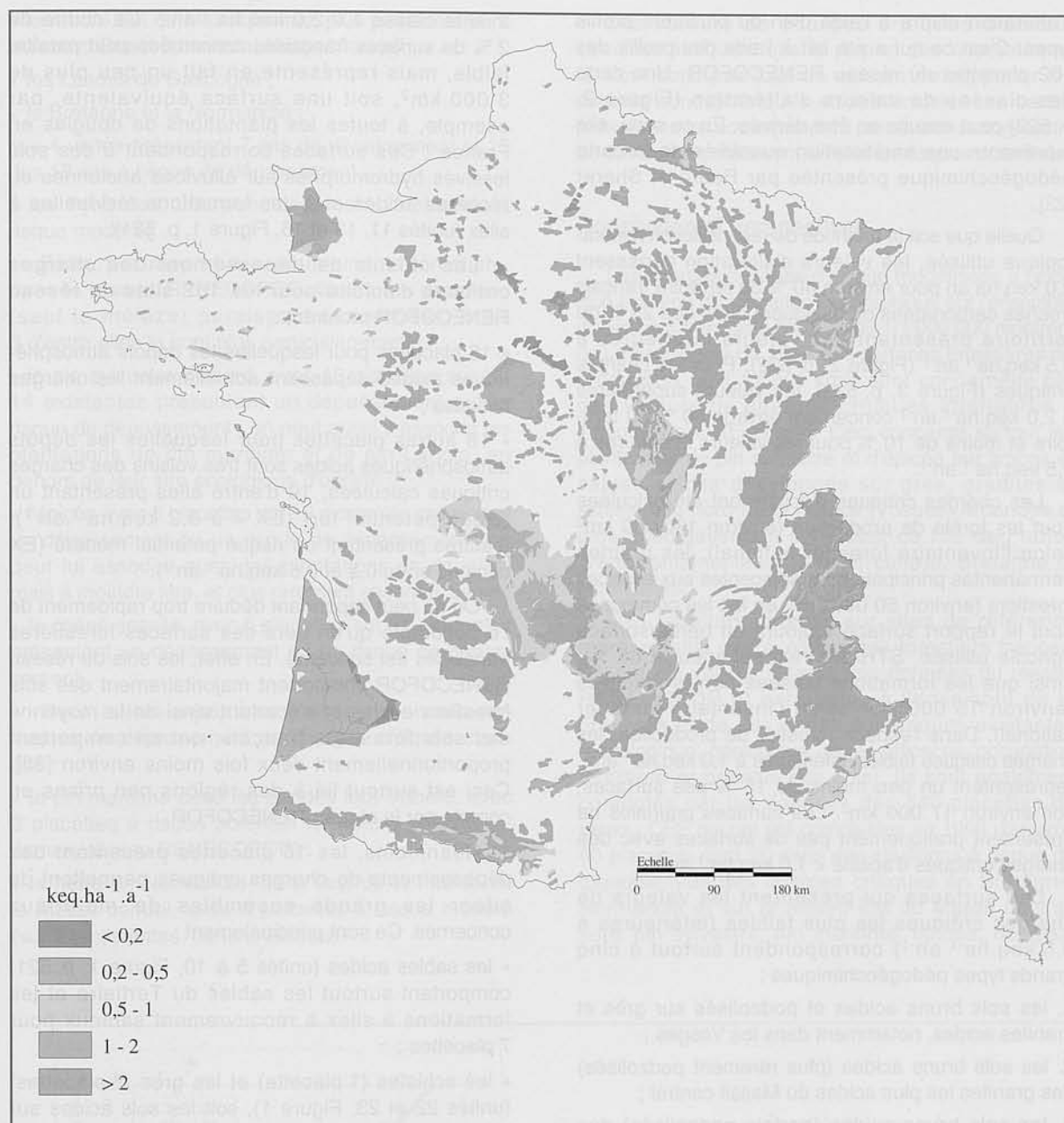


Figure 3.

Charges critiques d'acidité pour les sols forestiers du territoire français (Party, 1999 [7]).

Critical loads of acidity for French forest soils (Party, 1999 [7]) ($\text{keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$).

valeurs d'altération, les charges critiques ont été cartographiées en utilisant les deux méthodes normatives citées plus haut au point 2.

8. Enfin, les calculs menés sur les données des 102 placettes du réseau RENECOFOR ont permis de définir les sols, les essences forestières et les régions qui peuvent être concernées par les dépassements de charges critiques et de leur affecter un niveau de risque. Cette approche a été confirmée à l'aide des données des 540 placettes du réseau CEE [19] d'une part, et du résultat des calculs de charges critiques également réalisés pour les eaux de ruis-

seaux d'autre part [20]. Une étude récente concernant les dépôts atmosphériques à l'échelle de la France [21] permettra sans doute à court terme une spatialisation de ces dépassements à cette échelle.

Résultats obtenus

La carte pédogéochimique établie (Figure 1, p. 521) est fondamentale. En effet, elle permet de représenter les différentes familles du continuum roche-altérite-sol, et de leur associer un potentiel

d'altération chiffré à l'aide d'un ou plusieurs profils types. C'est ce qui a été fait à l'aide des profils des 102 placettes du réseau RENECOFOR. Une carte des classes de valeurs d'altération (Figure 2, p. 522) peut ensuite en être dérivée. En ce sens, elle représente une amélioration quantifiée de la carte pédogéochimique présentée par Pedro et Sherer [22].

Quelle que soit la méthode de reconstitution minéralogique utilisée, les valeurs d'altération dépassent 2,0 keq/ha.an pour environ 40 % du territoire français (roches carbonatées ou basiques) alors que 25 % du territoire présentent des valeurs inférieures à 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹ (Figure 2, p. 522). Pour les charges critiques (Figure 3, p. 523), les valeurs supérieures à 2,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹ concernent environ 60 % du territoire et moins de 10 % pour les valeurs inférieures à 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹.

Les charges critiques d'acidité ont été calculées pour les forêts de production (environ 130 000 km² selon l'Inventaire forestier national), les prairies permanentes principalement adjacentes aux espaces forestiers (environ 50 000 km², en fait les communes dont le rapport surface toujours en herbe/surface agricole utilisée, STH/SAU est supérieur à 85 %), ainsi que les formations boisées non productives (environ 15 000 km² selon l'Inventaire forestier national). Dans l'espace forestier de production, les charges critiques faibles, inférieures à 1,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹, représentent un peu moins de 15 % des surfaces, soit environ 17 000 km². Les surfaces prairiales ne présentent pratiquement pas de surfaces avec des charges critiques d'acidité < 1,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹.

Les surfaces qui présentent les valeurs de charges critiques les plus faibles (inférieures à 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹) correspondent surtout à cinq grands types pédogéochimiques :

1. les sols bruns acides et podzolisés sur grès et granites acides, notamment dans les Vosges ;
2. les sols bruns acides (plus rarement podzolisés) des granites les plus acides du Massif central ;
3. les sols bruns acides (parfois podzolisés) des granites et surtout des schistes de l'ouest de la France (Vendée, Bretagne et Normandie) ;
4. les sols bruns acides des schistes acides des Ardennes ;
5. les sols bruns acides, lessivés et podzolisés des sables des Landes et des formations résiduelles à silex des vallées de la Seine et de la Loire, cet ensemble paraissant le plus sensible (avec le grès des Vosges) avec des valeurs de charges critiques inférieures à 0,2 keq.ha⁻¹.an⁻¹.

Ceci est vrai quel que soit le modèle minéralogique utilisé. Dans les deux modélisations testées, les valeurs de charges critiques obtenues sont similaires pour 95 % des surfaces ($\pm$ 0,2 keq.ha⁻¹.an⁻¹). Pour les 5 % restants (soit près de 9 000 km²), les différences observées sont plus importantes. Elles concernent pour 3 % des surfaces dont les charges critiques sont supérieures à 2,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹ et pour

2 % la classe 1,0-2,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹. Ce chiffre de 2 % de surfaces françaises concernées peut paraître faible, mais représente en fait un peu plus de 3 000 km², soit une surface équivalente, par exemple, à toutes les plantations de douglas en France ! Ces surfaces correspondent à des sols lessivés hydromorphes sur alluvions anciennes ou récentes acides et à des formations résiduelles à silex (unités 11, 13 et 16, Figure 1, p. 521).

Les calculs de dépassement des charges critiques d'acidité pour les 102 sites du réseau RENECOFOR montrent :

- 18 placettes pour lesquelles les dépôts atmosphériques acides dépassent actuellement les charges critiques ;
- 18 autres placettes pour lesquelles les dépôts atmosphériques acides sont très voisins des charges critiques calculées, 10 d'entre elles présentant un risque potentiel fort (EX < à 0,2 keq.ha⁻¹.an⁻¹), 8 autres présentant un risque potentiel modéré (EX compris entre 0,2 et 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹).

On ne peut cependant déduire trop rapidement de ce décompte qu'un tiers des surfaces forestières françaises est concerné. En effet, les sols du réseau RENECOFOR comportent majoritairement des sols forestiers acides et s'écartent ainsi de la moyenne des sols forestiers français, qui en comportent proportionnellement deux fois moins environ [23]. Ceci est surtout lié à des régions non prises en compte par le réseau RENECOFOR.

Néanmoins, les 18 placettes présentant des dépassements de charges critiques permettent de situer les grands ensembles de matériaux concernés. Ce sont principalement :

- les sables acides (unités 5 à 10, Figure 1, p. 521) comportant surtout les sables du Tertiaire et les formations à silex à recouvrement sableux pour 7 placettes ;
- les schistes (1 placette) et les grès (6 placettes) (unités 22 et 23, Figure 1), soit les sols acides sur schistes du Cambrien, les schistes gréseux et siliceux, plus ponctuellement les grès argileux ;
- les granitoïdes (unités 26 à 28, Figure 1), soit des granites plus ou moins acides (3 placettes) et certains gneiss et migmatites (1 placette).

Ces placettes concernent 8 grands ensembles régionaux. Il s'agit dans l'ordre des dépassements ou des risques de dépassement de charges critiques acides des ensembles suivants :

- les Ardennes [24] ;
- les Vosges, l'Alsace et la Moselle ;
- le sud-ouest de l'Île-de-France (Yvelines, Fontainebleau), plus ponctuellement la Champagne ; ces 3 ensembles présentant 10 des 18 cas de dépassement ;
- la vallée de la Loire, plus ponctuellement la vallée de la Seine ;

- le rebord Est du Massif central, plus ponctuellement le rebord Ouest (Limousin, Haute-Vienne) ;

- les Landes de Gascogne ;

- la Bretagne et la Normandie ;

ces 4 unités présentant 7 cas de dépassement et 16 des 18 cas à risque de dépassement ;

- les Pyrénées, très ponctuellement (1 placette à risque modéré).

Enfin, par rapport aux peuplements forestiers, dans le réseau RENECOFOR, toutes les essences (sauf le mélèze) paraissent concernées, mais 3 d'entre elles le sont plus particulièrement :

- le pin sylvestre d'abord, avec 10 placettes sur les 14 existantes présentant un dépassement ou un risque de dépassement ; on peut aussi y associer les plantations de pin maritime et de pin Laricio, en dehors de leur aire écologique d'origine ;

- l'épicéa avec 6 placettes sur 10 existantes présentant un dépassement ou un risque de dépassement ; on peut lui associer aussi les plantations de douglas, mais à moindre titre, et plus rarement encore le sapin ;

- le chêne sessile, avec 6 placettes sur 21 existantes présentant un dépassement ou un risque de dépassement.

Deux autres ensembles présentent encore des risques de dépassement de charges critiques d'acidité :

- le pin maritime dans les Landes tout d'abord, avec 3 placettes à risque potentiel fort (sur 7 existantes, dans le réseau RENECOFOR) ;

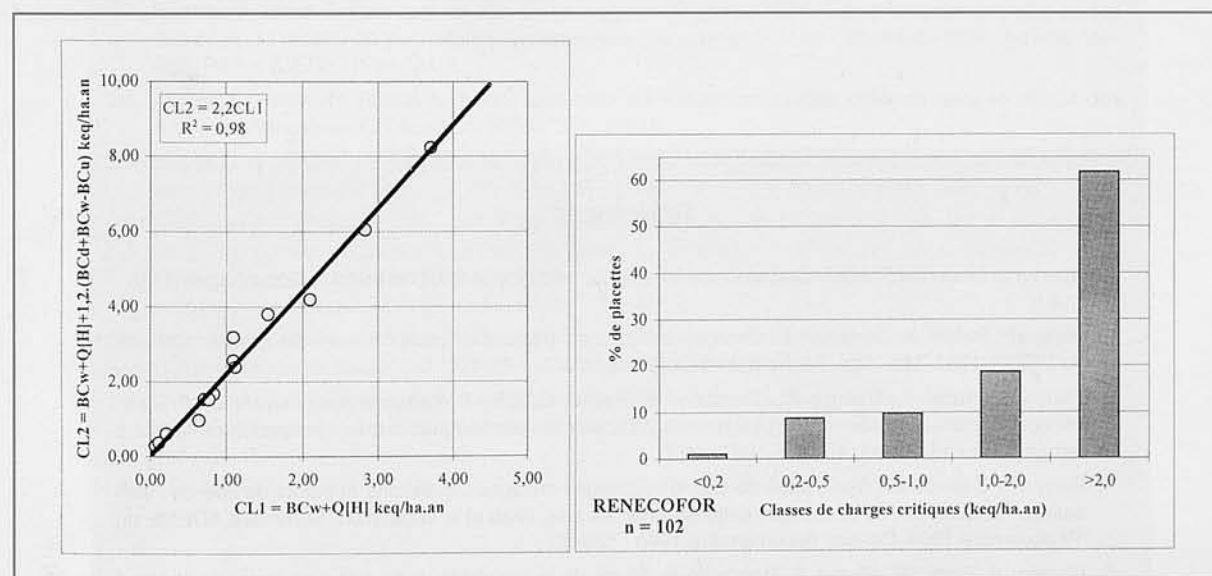
- le hêtre en Normandie, dans l'est de la France ou le Massif central, avec 5 placettes à risque modéré (sur 21 existantes, dans le réseau).

Les valeurs de charges critiques d'acidité calculées indiquent que la plupart des écosystèmes ne sont donc pas tous en mesure de supporter les apports atmosphériques acides actuels. Les cartes présentées ne correspondent pas à une cartographie de cas avérés, mais sont le reflet de risques potentiels.

Conclusion et perspectives

Les charges critiques d'acidité modélisées à l'aide d'un système d'information géographique sur l'ensemble du territoire français à l'échelle du 1/1 000 000 montrent qu'un peu moins de 15 % des surfaces forestières de production (soit 17 000 km²) sont concernées par des valeurs de charges critiques inférieures à 1 keq.ha⁻¹.an⁻¹ (Figure 4). Ceci concerne surtout les plantations de pin sylvestre et d'épicéa sur limons et sables acides développés sur grès, granites et schistes du nord de la France [Vosges, Ardennes et plus ponctuellement sud-ouest de l'Île-de-France (vers Fontainebleau), Massif central, Bretagne et Normandie].

Ces résultats obtenus sur sites de référence représentatifs des écosystèmes forestiers français [7], ont été validés à l'aide des données du réseau RENECOFOR et extrapolés à l'ensemble de la France à l'aide des cartes numériques existantes (pédologique, géologique, pluies efficaces, occupation forestière et prairiale des sols). Ils sont également confirmés par les données des 540 placettes du réseau CEE qui ont été complétées en 1999 d'environ 60 placettes dont 20 dans des situations à risque de dépassement des charges critiques en Bretagne, Normandie et sur le rebord Est du Massif central, sous pin sylvestre, pin maritime, épicéa, douglas,



chêne sessile ou hêtre, et sur matériaux sensibles, schistes et grès ou granitoïdes.

Enfin, les calculs de charges critiques réalisés pour les eaux de ruisseaux concordent également dans plus de 80 % des cas avec les charges critiques cartographiées pour les sols forestiers [7]. Une cartographie fine des dépassements de charges critiques constatés sur les 102 placettes du réseau RENECOFOR pourrait être prochainement effectuée à l'aide de la carte des dépôts atmosphériques réalisée récemment [21].

Ainsi, dans les sites identifiés comme sensibles, trois voies sont possibles pour conserver à terme l'intégrité de ces écosystèmes forestiers :

- continuer d'agir à court et moyen terme sur les sources d'émissions pour diminuer la part des composés acidifiants dans les dépôts atmosphériques ;
- agir sur les choix de gestion forestière à long terme, notamment dans les choix d'essence et de traitement forestier ;
- agir à court terme par des chaulages raisonnés et mesurés. Cette disposition ne doit être réservée qu'aux cas les plus sensibles dès leur origine et/ou ayant des dépassements de charges critiques sur de grandes surfaces (Vosges et Ardennes, principalement).

En particulier, les choix d'essences pourraient être réalisés non seulement sur la base des possibilités actuelles offertes par le milieu, ce que permet actuellement l'analyse des potentialités des stations forestières, mais aussi en fonction des conséquences à long terme de la production d'une essence forestière donnée sur le continuum roche-altérité-sol. En effet, une forte capacité de production forestière sur un site minéralogiquement pauvre provoque des pertes susceptibles d'épuiser en quelques dizaines

d'années les réserves minérales d'un écosystème. C'est par exemple le cas des pessières sur grès des régions du nord-est de la France [25].

À terme, pour définir les priorités infrarégionales sur le sujet, il sera sans doute nécessaire de cartographier ces résultats à l'échelle du 1/250 000 [26-28], ce que devrait permettre des cartes de sols réalisées dans la plupart des régions dans le cadre du programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) du ministère de l'Agriculture au cours de la prochaine décennie.

Enfin, une première évaluation des charges critiques azotées à l'échelle de la France complète les charges critiques d'acidité sur la base d'une cartographie numérique de la végétation.

Remerciements

Les travaux sur les charges critiques ont pour l'essentiel été financés par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et le ministère de l'Environnement.

Mots clés

Charges critiques. Acidification. Sols. Eaux de surface. Écosystèmes forestiers.

Keywords

Critical loads. Acidification. Soils. Surface water. Forest ecosystems.

Références

1. Nilsson J, Grennfelt P (eds). Critical loads for sulphur and nitrogen, Miljørapport 15, Copenhagen 1988 : 418 p.
2. Party JP, Probst A, Dambrine E. Charges critiques en polluants atmosphériques en France. Cahiers du DSF, 1-1997, Min. Agri. Pêche (DERF) 1997 : 67-70.
3. Party JP, Probst A, Thomas AL, Dambrine E, Février C, King D. Les charges critiques en France. Impacts et conséquences à long terme des polluants atmosphériques sur les écosystèmes naturels terrestres et aquatiques. ADEME 1997 : 59 p.
4. Party JP. Constitution d'une base de données charges critiques : questions et points de vue de l'utilisateur. Pollution de l'air et charges critiques pour les sols, l'eau et la végétation. Séminaire ADEME du 19 novembre 1996. Dossier documentaire 1996 : 125-30.
5. Badeau V, Party JP, Probst A, Dambrine E. Étude de la faisabilité d'une base de données charges critiques pour la France. Rapport ADEME, SOL-CONSEIL, CGS-CNRS Strasbourg, INRA 1997 : 33 p.
6. Probst A, Ertz O, Party JP, Clément A. Base de données charges critiques : extension et acquisition des données, lien avec un SIG. CGS-CNRS, ADEME, Rapport intermédiaire, 2000 : 21 p.

7. Party JP. Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Taux d'altération sur petits bassins versants silicatés. Application au calcul des charges critiques d'acidité. Thèse de Doctorat, Univ. Strasbourg, 1999 : 249 p.
8. Sverdrup H, De Vries W, Henriksen A. Mapping critical loads. A guidance to the criteria, calculations, data collection and mapping critical loads, Miljørapport (Environmental report) 1990, 14, Nord 1990, 98, Nordic Council of Ministers, Copenhagen 1990 : 123 p.
9. Dambrine E, Probst A, Party JP. Détermination et cartographie des charges critiques de polluants atmosphériques pour les écosystèmes naturels, en particulier forestiers. Pollution Atmosphérique, Numéro spécial « Charges critiques » 1993 : 21-8.
10. Sverdrup H, Warfvinge P. Effect of soil acidification on growth of trees, grasses and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Univ. of Lund Report, Sweden 1993 : 177 p.
11. INRA. Carte pédologique de la France (format numérique, version 3.2). INRA, Orléans 1999.
12. Sverdrup H, Warfvinge P. Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. Water, Air and Soil Pollution 1988 ; 38 : 387-408.
13. Olsson MT, Melkerud PA. Determination of weathering rates based on geochemical properties of the soil. In : Pulkinene E. (ed), Proceeding Conference on Environmental Geochemistry in Northern Europe, Symp Geol Surv Finland 1990 ; 34 : 45-61.
14. Melkerud PA, Olsson MT, Rosen K. Geochemical atlas of Swedish forest soils, Reports in forest ecology and forest soils, 65, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 1992.
15. Barth TFW. A final proposal for calculating the mesonorm of metamorphic rocks. J Geol 1960 ; 70 : 1-4.
16. Stussi JM. Cartographie de sensibilité à l'acidification des écosystèmes forestiers des Vosges sur roches mères plutoniques, CRPG Nancy 1995 : 33 p. + annexes.
17. Stussi JM. Cartographie de sensibilité à l'acidification des écosystèmes forestiers du Massif central sur roches mères granitoïdiques, CRPG Nancy 1997 : 15 p. + annexes.
18. BRGM. Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946-1976). BRGM, Département EAU. Carte à 1/1 500 000, 1983 : 40 p.
19. Badeau V. Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les Cahiers du DSF, 5-1998, Min. Agri. Pêche (DERF) 1998 : 211 p.
20. Party JP, Probst A, Dambrine E, Thomas AL. Critical loads of acidity to France : sensitivity areas in the north-eastern France. Water, Air and Soil Pollution 1995 ; 85 (1-4) : 2407-12.
21. Croisé L, Ulrich E, Duplat P. Estimation des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français en vue d'établir des cartes d'excès de charges critiques d'acidité. ONF, ADEME 2001 : 71 p.
22. Pedro G, Sherer S. Essai d'interprétation géochimique de la carte pédologique de France. Caractérisation et répartition des principaux types de milieux géochimiques. Ann Agron 1974 ; 25 (1) : 25-49.
23. Badeau V, Ulrich E. Pourquoi les sols du réseau intensif RENECOFOR sont-ils nettement plus acides que ceux du réseau de surveillance systématique (16 x 16 km) ? Les Cahiers du DSF, 1-1998, Min. Agri. Pêche (DERF) 1998 : 81-3.
24. Février C, Party JP, Probst A. Acidité des eaux de surface et charges critiques dans le massif des Ardennes françaises. CR Acad Sci 1999 ; 328 : 29-35.
25. Bonneau M, Dambrine E, Dupouey JL, Lefèvre Y, Thimonier A. Appauvrissement rapide de sols forestiers dans le Nord-Est de la France. Cahiers du DSF, 1-1997, Min. Agri. Pêche (DERF) 1997 : 63-6.
26. Dambrine E, Thomas AL, Party JP, Probst A, Boudot JP, Duc M, Dupouey JL, Gégout JC, Guérold F, King D, Landmann G, Maitat O, Nicolai M, Pollier B, Thimonier A. Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses : distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. CR Acad. Agric Fr 1998 ; 84 (5) : 75-94.
27. Thomas AL. Analyse spatiale de la sensibilité à l'acidification des écosystèmes du massif gréseux vosgien. Thèse de Doctorat, ENGREF-INRA, Orléans 1998 : 135 p.
28. Thomas AL, King D, Dambrine E, Party JP, Probst A. A spatial study of the relationships between streamwater acidity and geology, soils and relief (Vosges Northeastern France). J Hydrology 1998 ; 217 : 35-45.