



HAL
open science

Effets des boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol : premiers résultats obtenus sur bassins versants expérimentaux du Mont Lozère (Lozère, France)

Christian Dupraz, F. Lelong, M. Bonneau

► To cite this version:

Christian Dupraz, F. Lelong, M. Bonneau. Effets des boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol : premiers résultats obtenus sur bassins versants expérimentaux du Mont Lozère (Lozère, France). *Annales des sciences forestières*, 1986, 43 (2), pp.147-164. hal-02722691

HAL Id: hal-02722691

<https://hal.inrae.fr/hal-02722691>

Submitted on 1 Jun 2020

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

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

Effets des boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol : premiers résultats obtenus sur bassins versants expérimentaux du Mont Lozère (Lozère, France)

C. DUPRAZ *, F. LELONG ** et M. BONNEAU ***

avec la collaboration technique de J.F. DIDON ****

* *Office National des Forêts, actuellement au Laboratoire d'Etude Comparée des Systèmes Agraires, INRA, 9, place Viala, F 34060 Montpellier Cedex*

** *Laboratoire de Géologie Appliquée et ERA 601 du C.N.R.S., Université d'Orléans, F 45046 Orléans Cedex*

*** *INRA, Station de Recherches sur le Sol, la Microbiologie et la Nutrition des Arbres forestiers Champenoux, F 54280 Seichamps*

**** *Maison du Parc, F 30450 Genolhac*

Résumé

Cet article traite de l'influence possible d'un peuplement résineux pur sur l'altération de la réserve minérale du sol. Des bilans d'éléments totaux, à quartz constant, avaient conclu à des pertes importantes de calcium, magnésium et potassium mais un doute existait sur la réalité de ces pertes. On a donc installé sur le flanc Sud du Mont Lozère trois bassins versants, sur granite, l'un sous hêtraie, l'autre sous pessière artificielle, le troisième sous pelouse pâturée. L'article indique brièvement la méthode de calcul des flux d'éléments. Un bilan entrées-sorties est établi en prenant en compte les résultats de 24 mois consécutifs (juillet 1981, juin 1983) ; il est ensuite corrigé pour tenir compte des immobilisations dans les peuplements forestiers et des exportations par le troupeau de moutons. En adoptant l'hypothèse d'une stabilité du stock d'éléments échangeables, assez vraisemblable (vu l'état de désaturation très poussée des sols climax étudiés), on conclut que la pessière provoque effectivement une altération un peu plus forte que les deux autres écosystèmes ; l'écart avec la hêtraie n'est cependant que de 10 kg par ha et par an pour le calcium, 4 kg pour le magnésium, 3 kg pour le potassium. L'altération sous pessière est, suivant l'élément considéré, de 0,2 à 1,5 p. 100 des réserves totales pour 100 ans, contre 0,1 à 0,3 p. 100 pour la hêtraie ; la différence entre les deux écosystèmes porte surtout sur le calcium et le magnésium.

Mots clés : Bassins versants, résineux, feuillus, pelouse, altération, bilans d'éléments minéraux.

1. Introduction

Les effets de boisements résineux purs sur l'altération chimique du sol ont été étudiés en France exclusivement jusqu'à présent par la méthode du bilan d'altération sur colonnes de sols (LELONG & SOUCHIER, 1979) en utilisant le quartz comme inva-

riant ; cette méthode permet d'évaluer les pertes (ou gains) absolus d'éléments minéraux dans chaque horizon des profils de sols. La comparaison de couples de profils développés sur roche mère semblable mais évoluant sous végétation contrastée (résineux - feuillus ou résineux - landes) a pu ainsi être effectuée dans différentes régions et sur différents témoins ; le tableau 1 résume les caractéristiques principales de ces études.

TABLEAU 1

Sites étudiés par bilans d'altération.

Studied sites by way of balance of alteration.

Nom vernaculaire	Peuplement résineux	comparé avec	Substrat	Sol	Auteurs
Peyrelevade (Plateau de Millevaches)	Epicéas de 40 ans 1 800 tiges/ha	Lande à callune, genêt poilu et canche	Granite leucocrate	Podzol humifère	NYS, 1977
Emerillon (Val-de-Loire)	Pin Laricio de Corse de 60 ans	Taillis de chêne et châtaignier	Terrasse sableuse	Brun	LELONG & PICH, 1978
Col du Hanz (Vosges)	Epicéa de 80 ans	Hêtre	Grès permien	Brun acide	GUELLEC in BONNEAU <i>et al.</i> , 1979
Monthermé (Ardennes)	Epicéas de 45 ans	Taillis sous futaie, chêne sessile, bouleau	Schistes	Brun acide Brun ocreux	NYS, 1981
Eu (Normandie)	Epicéa, Douglas, Mélèze (3 sites)	Sorbier des oiseaux, hêtre (2 sites)	Limons	Brun calcique	NYS in BONNEAU, 1983

Il ressort de ces travaux que pour des sols pauvres sur substrat acide l'ordre de grandeur des pertes excédentaires induites par les peuplements résineux pourraient atteindre (BONNEAU *et al.*, 1979) :

- plusieurs centaines de kg de potasse par ha et par an ;
- plusieurs dizaines de kg de Ca et Mg par ha et par an ;
- plusieurs kg de Mn par ha et par an.

Par leur importance en valeur absolue et relative (jusqu'à 4 à 5 p. 100 de la réserve minérale totale du sol...), ces pertes supplémentaires notamment en K_2O

faisaient craindre que sur ces substrats l'évolution géochimique des sols ne soit rapidement déséquilibrée et qu'elle aboutisse à des carences graves (BONNEAU *et al.*, 1979).

Mais les incertitudes dues à la complexité des calculs et les risques de biais introduits par certaines hypothèses implicites de la méthode (homogénéité de la roche mère, stabilité géochimique de l'horizon profond du sol servant de référence dans les bilans) laissaient planer quelques doutes sur cette conclusion pessimiste. Aussi fut-il décidé dès 1980 de tenter une évaluation directe des pertes supplémentaires en éléments minéraux dues aux plantations pures de résineux, en comparant les flux massiques exportés en solution à l'exutoire de bassins versants voisins et semblables, différents seulement par la végétation. Après une prospection dans différentes régions cristallines de France (Vosges, Morvan), les petits bassins versants retenus se prêtant le mieux à cette évaluation furent choisis sur le versant Sud du Mont Lozère (DUPRAZ, 1981), sur un substrat homogène (granite porphyroïde du Pont de Montvert) et dans des conditions d'altitude et d'exposition semblables : le bassin de résineux est couvert à 80 p. 100 d'épicéas, les deux autres bassins servent de référence ; l'un est couvert à 80 p. 100 d'un taillis de hêtres, l'autre est une pelouse avec quelques bosquets (10 p. 100), landes (10 p. 100) et tourbières (5 p. 100). Les peuplements forestiers sont peu productifs : on peut admettre que la pessière et la hêtraie appartiennent à la dernière classe de fertilité. Le tableau 2 résume les principaux caractères physiques des bassins versants étudiés, dont la situation géographique est indiquée sur la figure 1 a et l'équipement sur la figure 1 b.

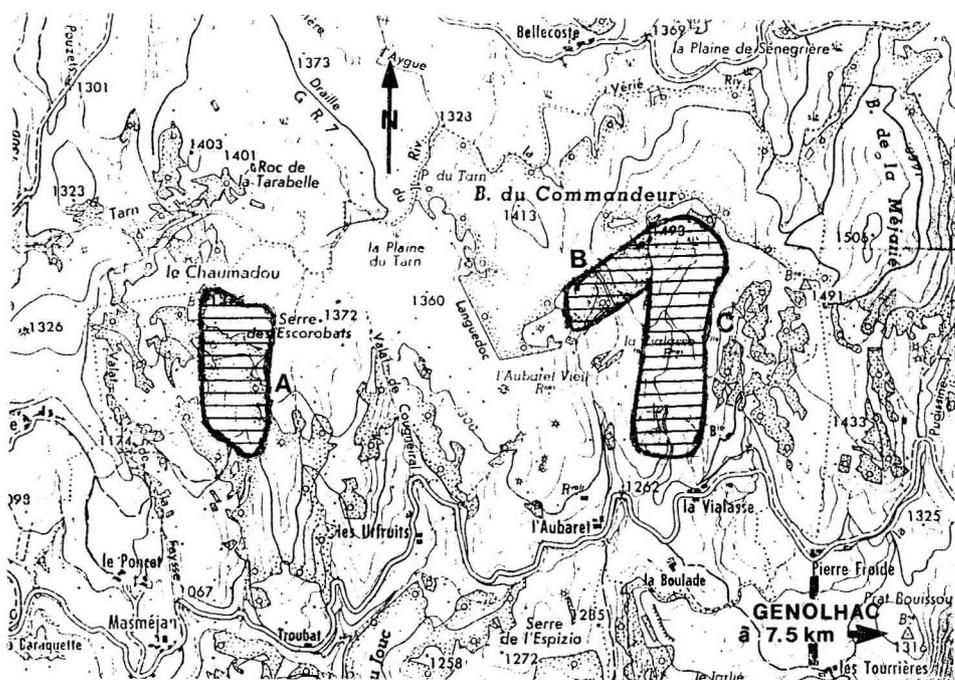


FIG. 1 a

Localisation des bassins versants.
Situation of the watersheds.

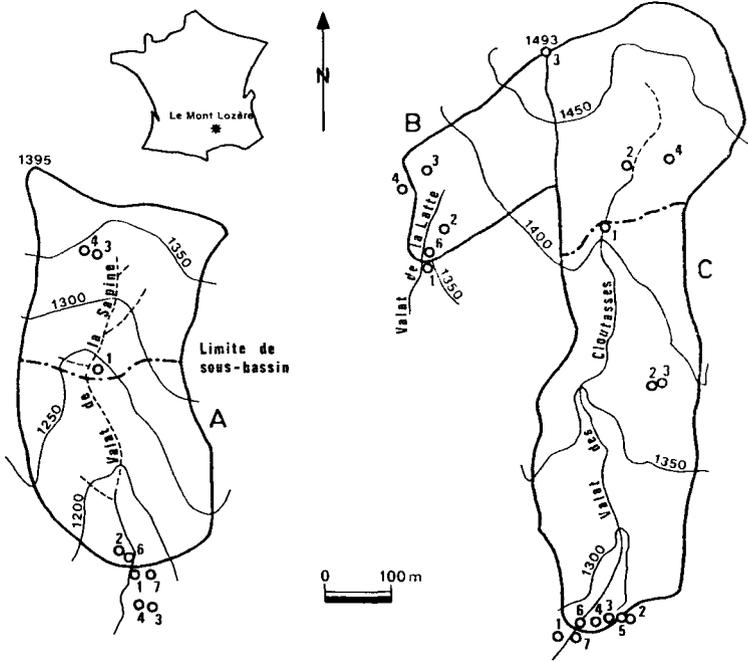


FIG. 1 b

Détail des équipements :

1 : Limnigraphe ; 2 : piézomètre ; 3 : tube à neige ; 4 : pluviographe ; 5 : hygrothermographe ; 6 : préleveur d'eau ; 7 : fosse à sédiments.

A : Bassin de la Sapine (hêtraie).

B : Bassin de la Latte (pessière).

C : Bassin des Cloutasses (pelouse).

Detail of the equipments :

1 : limnigraph ; 2 : piezometer ; 3 : snow measuring tube ; 4 : self-registering rain-gauge ; 5 : self-registering hygro-thermograph ; 6 : water sampler ; 7 : sediments pit.

Il s'agit en somme d'utiliser ces bassins comme des *lysimètres géants* et d'évaluer aussi précisément que possible les flux chimiques entrant et sortant pour chiffrer les différences éventuelles entre les bassins et en déduire l'importance relative de l'altération chimique de leurs sols selon la couverture végétale. Cette tentative implique que les facteurs parasites dus aux facteurs de dissemblance entre bassins (forme, taille...) autres que la végétation puissent être tenus pour négligeables. Aucun argument décisif ne suffit pour l'instant à l'affirmer ; cependant des présomptions nombreuses et convergentes (DUPRAZ, 1984) rendent cette hypothèse très vraisemblable : par exemple les différences notées dans le fonctionnement hydrodynamique et dans les bilans hydriques des 3 bassins sont faibles mais significatives et vont parfaitement dans le sens des différences attendues du fait des contrastes de végétation (DUPRAZ, DIDON & LELONG, 1984).

TABLEAU 2

*Principales caractéristiques physiographiques des bassins versants.
Main physiographic characteristics of the watersheds.*

Nom local et végétation	Superficie ha	Altitude moyenne m	Altitudes extrêmes m	Orientation	Pente moyenne du bassin %	Pente moyenne du ruisseau %	Longueur du cours m	Densité de drainage km ² /km ²
Valat de la Sapine Hétraie	54	1 270	1 160-1 395	N → S	18	15	750	1,39
Valat de la Latte Pessièrè	19,5	1 421	1 340-1 495	NE → SW	20	17	210	0,95
Valat des Cloutasses Pelouse	81	1 386	1 290-1 495	N → S	10	8	1 825	2,43

Parmi les nombreuses études de petits bassins versants représentatifs d'écosystèmes forestiers (LIKENS *et al.*, 1977 ; SWANK & DOUGLAS, 1975 ; FREDRIKSEN, 1972 ; HENDERSON *et al.*, 1978), aucune ne s'est attachée à l'évaluation comparative de l'altération des minéraux du sol sous des végétations différentes. Cet objectif extrêmement fin est toutefois poursuivi par une autre équipe dans les Ardennes belges (BULDGEN *et al.*, 1984), mais des différences marquées de fonctionnement hydrodynamique des bassins semblent rendre l'évaluation de l'impact spécifique des végétations (hêtres et épicéas également) sur l'altération très incertaine.

2. Méthodes

Le principe des bilans « entrées-sorties » d'éléments en solution est simple. Le flux chimique d'un élément i pendant le temps $\Delta t = t_1 - t_0$ s'exprime par :

$$F_i = \int_{t_0}^{t_1} c_i q_i dt$$

c_i étant la concentration et q_i le débit à l'instant t .

— Pour les flux d'entrée, on recueille toutes les précipitations (pluies, neige) de l'année et on analyse un échantillon de chacun d'eux ; s'il y a n épisodes dans l'année, le flux d'entrée annuel de l'élément i est (par unité de surface) :

$$F_i = K \sum_1^n c_i h_j$$

c_i étant sa concentration moyenne dans la lame d'eau,

h_j étant la hauteur d'eau précipitée au cours de l'averse j (j allant de 1 à n) et K étant un facteur d'homogénéité des unités employées.

— Pour les sorties, l'évaluation est plus difficile. On mesure en continu le débit q à l'exutoire des bassins mais le calcul des flux fait appel à l'équation $F = \int c \cdot q \cdot dt$ qui suppose la connaissance des variations de la concentration c en continu ; or la mesure de c en continu n'est techniquement pas réalisable et l'on ne sait pas *a priori* comment varie ce terme au cours du temps et en fonction du débit. Une campagne de mesures hydrochimiques intensives sur le site a permis pendant la première année de comprendre la structure des variations de concentrations (DUPRAZ, 1984).

- En période de tarissement (écoulement non influencé par les précipitations), les concentrations en solution sont relativement stables et un prélèvement toutes les semaines ou 2 fois par mois garantit une précision suffisante (au moins pour Si, Mg, Ca, Na). Un prélèvement automatique réglé avec un pas de temps hebdomadaire suffit à obtenir un échantillonnage représentatif.

- En période de crue, par contre, on observe de brusques variations de concentration dans la rivière. Il peut s'agir de dilutions ou d'augmentations de concentration selon les éléments et selon les crues. Les différences de concentration entre la pluie et l'eau de la rivière avant la crue n'expliquent que partiellement les variations obser-

vées, qui ne résultent pas d'une simple loi de mélange. Un préleveur automatique dont le déclenchement est commandé par les variations limnimétriques du ruisseau permet de prélever un échantillon à chaque pic de crue (DUPRAZ *et al.*, 1984). A partir de cet échantillon, et des échantillons prélevés avant et après la crue par le préleveur à pas de temps fixe, on peut reconstituer les variations de concentration liées à la crue (chémogramme) et obtenir les flux massiques en procédant à l'intégration des produits débit-concentration pour chaque intervalle de temps ($i, i + 1...$) où la relation q - c est définie par un modèle linéaire simple (fig. 2).

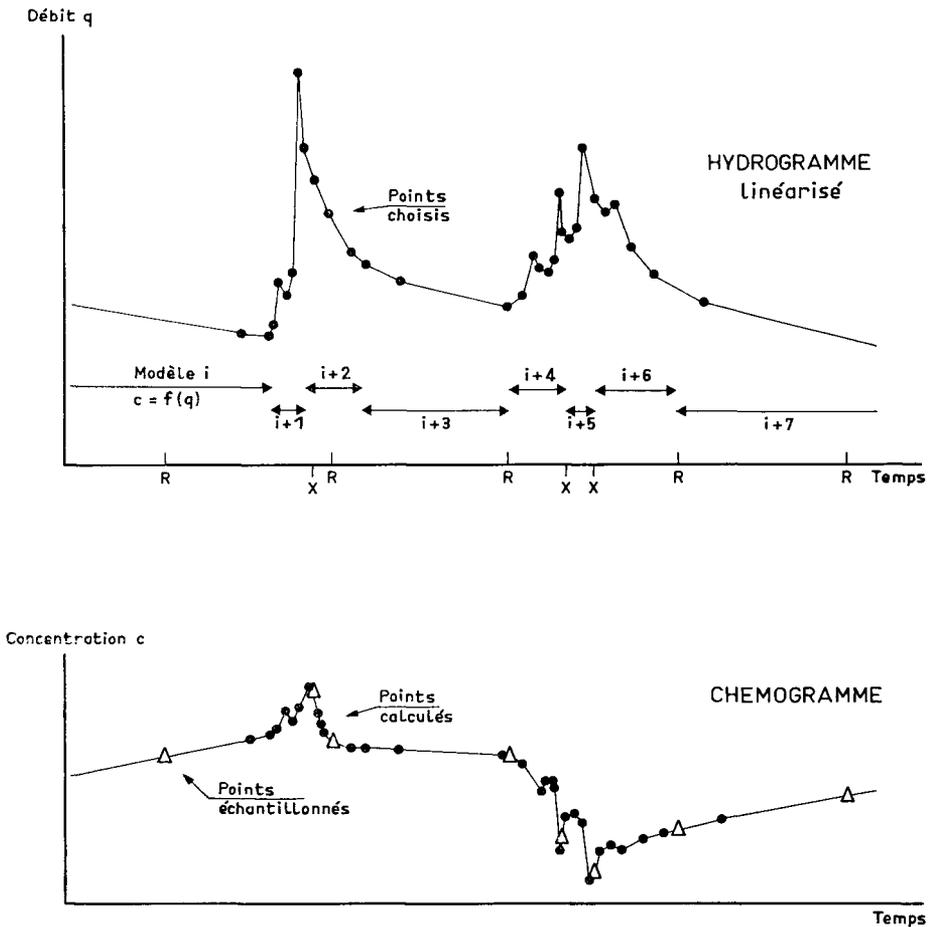


FIG. 2

Hydrogramme et chemogramme : schéma de calcul des flux massiques à partir d'un découpage de l'hydrogramme, des analyses des échantillons R (prélèvement de routine) et X (prélèvement de crue) et d'une reconstitution du chemogramme par tronçons.

Hydrogram and chemogram : schema of the mass flow calculation.

Avec ce dispositif de prélèvement et un algorithme de calcul de flux bien adapté à cette stratégie d'échantillonnage, on estime que l'erreur standard sur le flux annuel, due à l'échantillonnage, aux erreurs analytiques et à l'algorithme de calcul est de :

1 p. 100 environ pour Ca, Mg, Na, Si

2 p. 100 environ pour K, Cl, SO₄.

Compte tenu des incertitudes sur les débits, l'erreur possible sur *les flux de sortie est de 2 à 5 p. 100 selon les éléments et les années*. L'erreur standard dans l'estimation des flux d'entrée est plus élevée (DUPRAZ, 1984) :

5 p. 100 pour Na

10 p. 100 pour Ca, Mg, K

15 p. 100 pour SO₄

20 p. 100 pour NH₄ et Cl.

La connaissance de ces marges d'erreur est essentielle pour interpréter valablement les différences « entrées-sorties » en termes de bilans d'altération.

3. Résultats

3.1. Bilans « entrées-sorties »

Les résultats des bilans hydrochimiques « entrées-sorties » au cours des deux premiers cycles de mesures (DUPRAZ, 1984, p. 246 et 247) et sur la moyenne des 2 cycles (tabl. 3 et fig. 3) indiquent des tendances nettes.

— Les différences « entrées-sorties » sont toujours *négatives* pour Si et pour les cations, ce qui signifie que les bassins évacuent plus de matière qu'ils n'en reçoivent (sauf pour Ca sous pelouse et sous hêtraie pendant le second cycle et sous hêtraie pour la moyenne des 2 cycles).

— Les différences « entrées-sorties » sont au contraire *positives* pour les anions sauf sous épicéas où le bilan des sulfates, pendant les 2 cycles, et celui des chlorures pendant le second cycle sont négatifs. Compte tenu des niveaux d'incertitude admis, le bilan des anions est moins significatif que celui des cations ; il s'agit seulement de tendances.

Ces résultats distinguent assez nettement l'écosystème résineux. L'importance des excédents de sorties par rapport aux entrées caractérise nettement cet écosystème : sur les 2 cycles l'excédent moyen des pertes par rapport au bassin de hêtraie est d'environ 6 kg ha⁻¹. an⁻¹ pour Ca, 2 kg pour Mg, 0,7 kg pour K, ce qui est faible en valeur absolue mais significatif compte tenu des marges d'erreurs. Pour les anions, l'existence de bilans négatifs pour le bassin enrésiné, contrairement aux autres bassins, pose problème. Ce fait peut être interprété comme étant la conséquence de précipitations sèches occultes non comptabilisées dans les bilans et qui seraient plus intenses pour la pessière dont les surfaces foliaires semblent mieux capter les poussières et aérosols (WEDRAOGO-DUMAZET, 1983 ; DUPRAZ, 1984). Des recherches ultérieures viseront à préciser ce point fort important pour la compréhension des interactions entre les précipitations acides et les peuplements végétaux.

TABLEAU 3

*Bilans hydrochimiques moyens annuels
(entrées par les précipitations moins sorties par les rivières)
pour les trois bassins versants du Mont Lozère.*

*Annual mean hydrochemical balance (input by rain minus output by the streamlets)
for the three watersheds.*

Bassin de pelouse.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	N	Si
Entrées	14,0 ± 1,4	2,2 ± 0,2	2,5 ± 0,3	13,2 ± 0,7	21,1 ± 4,2	16,6 ± 2,5	5,8 ± 1,2	0,2 ± 0,0
Sorties	16,6 ± 0,7	4,8 ± 0,2	3,8 ± 0,2	16,5 ± 0,7	16,9 ± 0,8	13,9 ± 0,6	ε —	18,0 ± 0,7
Bilan	-2,6 ± 2,1	-2,6 ± 0,4	-1,3 ± 0,5	-3,3 ± 1,4	+4,2 ± 5,0	+2,7 ± 3,1	+5,8 ± 1,2	-17,8 ± 0,7

Bassin de hêtraie.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	N	Si
Entrées	12,1 ± 1,2	2,0 ± 0,2	2,3 ± 0,2	11,9 ± 0,6	19,6 ± 3,9	15,5 ± 2,3	5,0 ± 1,0	0,2 ± 0,0
Sorties	9,8 ± 0,7	3,8 ± 0,3	2,7 ± 0,2	14,0 ± 1,0	17,0 ± 1,2	11,8 ± 0,8	ε —	16,3 ± 1,1
Bilan	+2,3 ± 1,9	-1,8 ± 0,5	-0,4 ± 0,4	-2,1 ± 1,6	+2,6 ± 5,1	+3,7 ± 3,1	+5,0 ± 1,0	-16,1 ± 1,1

Bassin d'épicéas.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	N	Si
Entrées	13,6 ± 1,4	2,2 ± 0,2	2,5 ± 0,3	13,0 ± 0,6	20,8 ± 4,2	16,4 ± 2,5	5,7 ± 1,1	0,2 ± 0,0
Sorties	17,3 ± 1,7	6,5 ± 0,6	3,6 ± 0,3	15,8 ± 1,6	21,1 ± 2,1	17,3 ± 1,7	ε —	16,9 ± 1,7
Bilan	-3,7 ± 3,1	-4,3 ± 0,8	-1,1 ± 0,6	-2,8 ± 2,2	-0,3 ± 6,3	-0,9 ± 4,2	+5,7 ± 1,1	-16,7 ± 1,7

Les valeurs sont en kg/ha/an; elles correspondent à la moyenne des valeurs obtenues sur deux années de mesures (1981 à 1982, 1982 à 1983). L'intervalle de confiance proposé correspond à une amplitude de deux erreurs standard, soit à une probabilité de 95 p. 100 dans l'hypothèse d'une distribution normale de l'erreur.

The values are in kg/ha/year; they concern the mean values for two years (1981 to 1982, 1982 to 1983). The amplitude of the confidence interval is two standard errors.

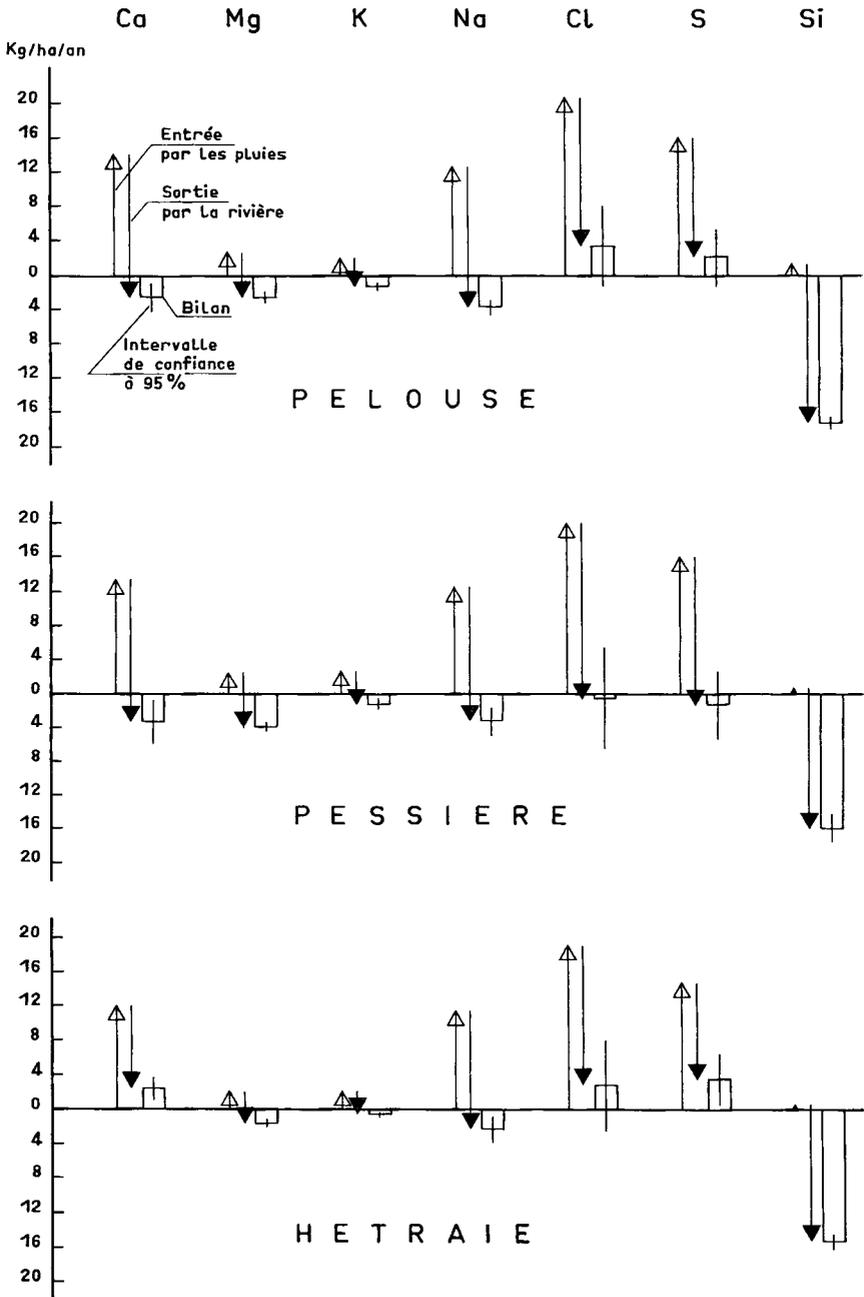


FIG. 3

*Bilans entrées-sorties pour les trois bassins.
Input-output balances for the three watersheds.*

3.2. *Evaluation de l'altération chimique de chaque écosystème*

Ces résultats bruts spécifient déjà nettement du point de vue biogéochimique la forêt d'épicéas par rapport aux deux autres végétations. Mais pour passer de ces bilans bruts à une évaluation comparée de l'altération chimique, il faut tenir compte des autres transferts de matière qui peuvent intervenir dans le fonctionnement des « pédosystèmes » (LELONG *et al.*, 1984). L'organigramme de la figure 4 représente de façon simplifiée les flux entrants et sortants ainsi que les cycles internes entre les différents compartiments de ces systèmes : la loi de la conservation de masse, appliquée à ces systèmes, s'exprime par :

$$\Sigma \text{ entrées} = \Sigma \text{ sorties} \pm \text{variations de stock (AR)}$$

Les variations de stock sont comptées positivement quand les compartiments phytomasse, litière et sol augmentent, et négativement dans le cas contraire.

On voit que l'évaluation de l'altération chimique (flèche n° 3) suppose que l'on connaisse :

- les importations dues aux précipitations sèches ;
- les exportations solides (récoltes, troupeaux, érosion) ;
- les variations de stock des différents compartiments.

On a tenté ces évaluations (DUPRAZ, 1984) : les précipitations sèches semblent assez réduites et même si elles pèsent davantage sur l'écosystème pessière, on n'en a pas tenu compte ici. Quant aux exportations solides, leur évaluation est imprécise mais les flux sont réduits par rapport aux flux entrées-sorties et peuvent être négligés, sauf pour Ca, N et K (déjections nocturnes des troupeaux exportées hors de la pelouse, érosion des litières, pour le bassin de hêtraie). Enfin, concernant les variations de stocks, on avait estimé au vu des analyses de sol disponibles (TRÉVISAN, 1982) que le développement de la pessière depuis 55 ans avait provoqué une certaine accumulation d'humus brut et une certaine désorption des cations du complexe d'échange, dont l'impact sur le bilan d'altération chimique ne serait pas négligeable. Des analyses de sols plus nombreuses depuis lors conduisent à penser que les compartiments sols et litières des 3 écosystèmes considérés ne tranchent pas les uns par rapport aux autres de façon notable (DURAND, 1984). On peut donc en première approximation postuler pour les trois pédosystèmes un état globalement stationnaire, sauf pour le compartiment phytomasse dont les taux de bioaccumulation peuvent être approximativement connus d'après les données disponibles dans la littérature, compte tenu du taux de productivité faible des peuplements végétaux sur nos bassins (KREUTZER, 1976).

Les bilans d'altération chimique que l'on peut calculer ainsi sur la moyenne des résultats des deux années de mesure sont présentés sur le tableau 4. L'altération se déduit des chiffres disponibles par la formule :

$$\text{ALTÉRATION} = \text{SORTIES} \pm \text{AR} - \text{ENTRÉES}$$

Les sorties par lixiviation ont été corrigées pour tenir compte de la non homogénéité des peuplements végétaux et du taux de surface biologiquement non active des bassins du fait de la pierrosité.

Les chiffres d'altération chimique ainsi obtenus sont très parlants :

- Toutes les valeurs sont faibles en *valeurs absolues*, de l'ordre de 1 à 10 kg.

TABLEAU 4

Evaluation de l'altération chimique du sol sous chaque écosystème.

Valeurs en kg . ha⁻¹ . an⁻¹. (Moyenne sur deux cycles annuels de mesures, 1981 à 1983).

Evaluation of the chemical weathering of the soil under each ecosystem (in kg/ha/year).

Pelouse.

<i>Entrées</i>							
Précipitations humides ⁽¹⁾	14,0	2,2	2,5	13,2	21,1	16,6	0,2
<i>Sorties</i>							
Lixiviation ⁽¹⁾	16,6	4,8	3,8	16,5	16,9	13,9	18,0
Lixiviation corrigée ⁽²⁾	19,7	5,2	4,5	18,8	18,0	15,3	20,5
Fixation par les animaux ⁽³⁾	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
Transfert de déjections ⁽³⁾	1,8	0,2	2,9	0,1	0,2	0,0	ε
Total	21,8	5,4	7,5	19,0	18,2	15,4	20,5
<i>Variations de stock</i>							
Biomasse des genêts ⁽³⁾	1,4	0,9	1,4	1,2	ε	ε	ε
Altération chimique	9,2	4,1	6,4	7,0	-2,9	-1,2	20,3

Hêtraie.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
<i>Entrées</i>							
Précipitations humides ⁽¹⁾	12,1	2,0	2,3	11,9	19,7	15,5	0,2
<i>Sorties</i>							
Lixiviation ⁽¹⁾	9,8	3,8	2,7	14,0	17,0	11,8	16,3
Lixiviation corrigée ⁽²⁾	8,0	3,7	2,6	14,5	18,7	11,9	17,5
Erosion des litières ⁽³⁾	1,5	0,1	0,2	0,0	ε	ε	ε
Total	9,5	3,8	2,8	14,5	18,7	11,9	17,5
<i>Variations de stock</i>							
Biomasse pérenne ⁽³⁾	4,0	0,8	3,0	1,0	ε	0,5	1,0
Altération chimique	1,4	2,6	3,5	3,6	-1,0	-3,1	18,3

Pessière.

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
<i>Entrées</i>							
Précipitations humides ⁽¹⁾	13,6	2,2	2,5	13,0	20,8	16,4	0,2
<i>Sorties</i>							
Lixiviation ⁽¹⁾	17,3	6,5	3,6	15,8	21,1	17,3	16,9
Lixiviation corrigée ⁽²⁾	19,9	8,0	3,9	17,4	25,3	20,8	18,4
<i>Variations de stock</i>							
Biomasse pérenne ⁽³⁾	6,0	1,0	5,0	1,0	ε	2,0	2,0
Altération chimique	12,3	6,8	6,4	5,4	4,5	6,4	20,2

(1) Termes mesurés, cf. tableau 3. On a négligé les précipitations sèches dont le poids relatif paraît faible sauf peut-être pour la pessière, en ce qui concerne Cl et S - *Measured data. The dry deposition was neglected.*

(2) Deux corrections sont nécessaires pour tenir compte - *Two corrections are necessary for taking into account :*

— de ce que les bassins ne sont pas parfaitement représentatifs d'un écosystème homogène. Par exemple, la pelouse comprend 2 ha de hêtraie. Le mode de calcul de cette correction est donné dans DUPRAZ, 1984 - *the lack of homogeneity of the watersheds (see the method of correction in DUPRAZ, 1984) ;*

— de ce qu'une partie non négligeable de la superficie des bassins est occupée par des blocs de granite apparent. Cette surface est soustraite à l'activité biologique et les chiffres d'altération obtenus doivent être ramenés à la surface réellement active. Les surfaces relatives de bassins occupés par les blocs ont été estimées à 10 p. 100 pour chaque bassin ; les flux lixiviés ramenés à 100 p. 100 de couvert végétal sont donc majorés de 10/9 - *the percentage of apparent granitic blocks.*

(3) Termes évalués à partir de données bibliographiques. On a négligé les variations de stock correspondant aux charges chimiques des solutions du sol car les réserves en eau du sol retrouvent sensiblement les mêmes valeurs après chaque cycle hydrologique et les variations deviennent négligeables pour la moyenne de deux cycles - *Evaluated term from literature data.*

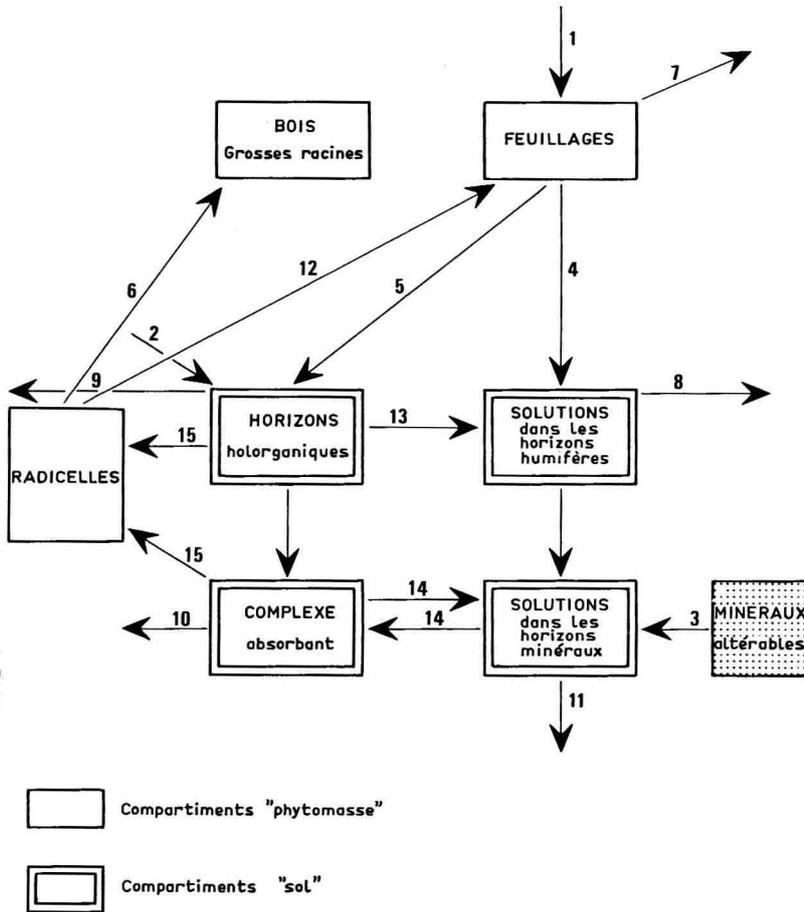


FIG. 4

Organigramme des transferts de matière dans un pédosystème (sol-eau-végétation).

Flow diagram showing the movement of material in a soil system (soil-water-vegetation).

1 - Précipitations ; 2 - Fixation biologique d'azote ; 3 - Altération chimique ; 4 - Pluviolessivats ; 5 - Chute des feuilles ; 6 - Accumulation de la biomasse ; 7 - Exportations (récolte, troupeaux, érosion) ; 8 - Exportation chimique par le ruissellement ; 9 - Erosion des litières ; 10 - Erosion du sol ; 11 - Exportation chimique par drainage ; 12 - Transfert d'éléments nutritifs ; 13 - Minéralisation de la matière organique ; 14 - Absorption et désorption ; 15 - Prélèvement racinaire.

1 - Precipitation ; 2 - Biological nitrogen fixation ; 3 - Chemical weathering ; 4 - Through-fall ; 5 - Leaf fall ; 6 - Accumulation in the biomass ; 7 - Output (due to harvesting, grazing, erosion) ; 8 - Chemical loss due to surface run-off ; 9 - Litter erosion ; 10 - Soil erosion ; 11 - Chemical loss due to drainage ; 12 - Transfer of nutrient elements ; 13 - Organic matter mineralisation ; 14 - Absorption and desorption ; 15 - Root uptake.

$\text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour les éléments minéraux et du même ordre de grandeur par élément pour les 3 écosystèmes.

— Pour les métaux les différences relatives d'intensité d'altération sont toujours dans le même ordre : par exemple pour Ca, Mg, K, Si, l'altération est minimale sous hêtraie, elle est maximale sous pessière, elle est intermédiaire sous pelouse. L'écart entre la pessière et la hêtraie est de l'ordre de $10 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour Ca, de 4 kg pour Mg, de 3 kg pour K, 2 kg pour Si, soit 10 à 100 fois moins que l'ordre de grandeur des pertes supplémentaires évaluées par la méthode des bilans de sol (cf. chiffres donnés dans l'introduction ci-dessus, d'après BONNEAU *et al.*, 1979).

— Pour Cl et S, on remarque que le bilan d'altération sous pessière est positif, alors qu'il semble négatif (accumulation) sous pelouse et sous hêtraie. La signification de ces résultats n'est pas évidente. Cependant, les valeurs négatives sont faibles par rapport aux erreurs possibles sur les entrées (tabl. 3). En outre, la différence de sens des bilans est logique si l'on considère que les précipitations sèches et les aérosols, certainement plus importants dans la pessière, n'ont pas été pris en compte. En ce qui concerne le soufre, on peut penser, suivant ULRICH (1984), que si l'apport de S extérieur est important, il a pu être stocké sous forme d'hydroxosulfate d'Aluminium (bilan négatif) puis être déstocké par dissolution de ce dernier sous l'influence d'une acidification croissante. Il faudrait rechercher la présence effective dans le sol de ce composé.

— Le bilan de l'azote n'a pu être établi : les entrées sous forme de NH_4 dans les précipitations humides sont notables (cf. tabl. 3) ; par contre on n'a mesuré que des teneurs négligeables, sous forme de nitrates, dans les eaux de drainage. Mais le calcul du bilan suppose aussi la connaissance des quantités stockées dans la végétation, de l'éventuelle fixation symbiotique ainsi que des pertes possibles par dénitrification. Une part importante des transferts de cet élément pouvant avoir lieu sous forme gazeuse, les mesures hydrochimiques ne suffisent pas à donner des résultats fiables.

4. Conclusions

Après deux années de mesures sur les bassins versants comparatifs à végétation contrastée du Mont Lozère (pelouse, hêtraie, pessière), les bilans hydrochimiques « entrées-sorties » et les bilans d'altération chimique de la réserve minérale du sol qu'on peut en déduire révèlent un écart faible mais significatif de l'érosion chimique d'un bassin à l'autre, en relation, semble-t-il, avec la nature de la végétation.

La réserve minérale du sol est davantage mobilisée sous le peuplement d'épicéa, mais la différence par rapport au peuplement de hêtre est ténue (quelques kg par ha et par an pour Si, Ca, Mg, K). Cette altération représente une part très faible de la réserve minérale totale du sol (quelques dixièmes de p. 100 pour la hêtraie, moins de 2 p. 100 pour la pessière en 100 ans, cf. tabl. 5). Les différences de bilan constatées pour les anions (Cl et S) posent le problème de l'existence et de l'évaluation des précipitations occultes (précipitations sèches et aérosols), dont on suppose le rôle actif dans les phénomènes d'acidification des écosystèmes à feuillage dense.

La divergence de ces résultats par rapport à ceux obtenus sur colonnes de sol ne discrédite pas pour autant la méthode des bilans pédologiques précédemment employée, (BONNEAU *et al.*, 1979). Il est probable que dans les profils de sol sous résineux, le lessivage chimique et mécanique des particules fines modifie significativement la

TABLEAU 5

Evaluation de l'importance relative de la réserve minérale consommée par l'altération actuelle (en p. 100, pour 1 m de sol).

Evaluation of the proportion of the mineral stock which is consumed by the present weathering of the soil minerals (in p. 100 for 1 m of soil).

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
(1) Altération chimique (cf. tabl. 4)							
Hêtraie en kg . ha ⁻¹ an ⁻¹ ..	1,4	2,6	3,5	3,6	— 1,0	— 3,0	18,3
Pessière en kg . ha ⁻¹ an ⁻¹ ..	12,3	6,8	6,4	5,4	4,5	6,4	20,2
(2) Teneur pondérale dans la roche mère en p. 100	2,1	1,0	3,5	2,3	—	—	31
(3) Teneur pondérale dans l'arène en p. 100	0,6	0,8	3,2	1,4	—	—	28
(4) Réserve contenue dans 1 m de sol ayant la composition de l'arène en 10 ² kg . ha ⁻¹	800	1 000	4 200	1 800	—	—	36 000
(5) Importance relative de l'altération en 100 ans par rapport à la réserve minérale du sol (0 à 1m)							
Hêtraie en p. 100	0,2	0,3	0,1	0,2	—	—	0,05
Pessière en p. 100	1,5	0,7	0,2	0,3	—	—	0,06

Le calcul est fait à partir de la composition de la roche mère (ligne 2, cf. WEDRAOGO-DUMAZET, 1983) en faisant le rapport ligne (1) sur ligne (4) et en admettant que :

— la réserve minérale contenue dans le mètre superficiel du sol a une composition chimique semblable à celle d'arènes ;

— que les arènes contiennent 30 p. 100 du Ca, 60 p. 100 du Na, 80 p. 100 du Mg, 90 p. 100 du K et du Si des éléments totaux contenus dans la roche mère (cf. LELONG & SOUCHIER, 1970) ;

— que la densité apparente du sol entre 0 et 1 m est de 1,30.

Quotient ligne (1) on ligne (4), taking in account the composition of the parent-material and assuming that the bulk density of the soil is 1,3.

composition chimique de l'horizon (B)/C qui sert de référence aux calculs et que, en conséquence, toutes les pertes de matière calculées par cette méthode soient systématiquement surévaluées (fig. 5).

Les bilans hydrochimiques « entrées-sorties » ne peuvent pas saisir ces transferts internes à l'écosystème. Ils peuvent simplement chiffrer l'érosion chimique globale. Autrement dit, la méthode des bassins versants chiffrerait de manière réaliste les pertes de réserve minérale subies, tandis que le bilan isoquartz fait à partir du sol aurait faussement attribué à une perte globale ce qui n'est que transfert du sol à l'interface sol/roche-mère.

La crainte qu'il existe de fortes pertes supplémentaires globales d'éléments chimiques (notamment Ca, Mg, K) due à la végétation résineuse est en grande partie levée. Mais il reste le problème du lessivage mécanique et/ou chimique qui pourrait

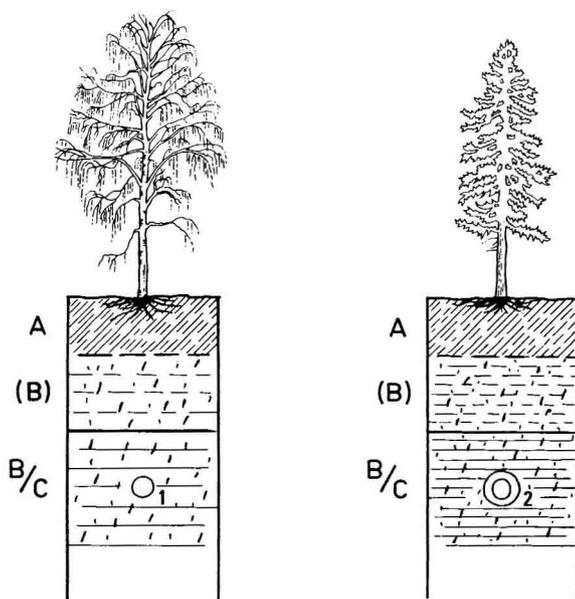


FIG. 5

Schéma de l'erreur commise dans les bilans isoquartz en prenant comme référence sous résineux un échantillon 2 qui, en réalité, est enrichi par rapport à l'échantillon homologue 1 sous feuillu.

Schema of the error in the isoquartz-balance method, by referring under the coniferous stand to the sample 2, which is enriched in comparison with the sample 1 under the broad-leaved stand.

bien être responsable d'un appauvrissement minéral (au sens géochimique du terme) des horizons de surface et d'une compacité plus forte en profondeur dans les écosystèmes enrésinés, ce qui n'est sans doute pas sans conséquence pour la fertilité à terme des sols forestiers.

Reçu en février 1985.

Accepté en juin 1985.

Remerciements

Nous remercions le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (PIREN) du C.N.R.S. pour le financement de cette étude, ainsi que l'Office National des Forêts et le Parc National des Cévennes pour leurs contributions décisives. En mettant à la disposition du projet un ingénieur, l'E.N.G.R.E.F. tout d'abord, puis l'O.N.F., ont créé les conditions permettant le suivi de cette expérimentation.

Summary

Effects of pure conifers stands on the evolution of soil fertility : first results of experimental watersheds on the Mont Lozère (Lozère, France)

This article discusses the possible influence of pure conifers stands on the weathering of soil reserve minerals. Balances of total soil nutrients, referring to quartz content, showed the possibility of heavy losses of Ca, Mg and K but there was a doubt on the reality of these losses.

Therefore, three watersheds were equipped on the South face of Mont Lozère (France) : one under beech forest, the second under a spruce stand and the third under grazed land. The method of calculating fluxes of elements is briefly explained. An input-output balance is given for 24 months (july 1981-june 1983) ; then, it is corrected for taking into account the nutrients fixation of the forest stands and the output by the flock of sheep. Assuming that the stock of exchangeable cations is constant (very low base saturation), it is concluded that the spruce stand is responsible for a slightly greater weathering rate than the two others vegetation types. Nevertheless the difference with the beech stand is only 10, 4 and 3 kg/ha/year for Ca, Mg and K respectively.

Weathering rate of primary minerals under spruce on a basis of hundred years varied between 0.2 and 1.5 p. 100 in the spruce stand and between 0.1 and 0.3 p. 100 in the beech one, according to the element. The biggest differences between both stands concern Mg and Ca.

Key words : Watersheds, conifers, broad-leaved trees, grazed land, weathering, balance of the mineral elements.

Références bibliographiques

- BONNEAU M., LACAZE J.F., LELONG F., LÉVY G., NYS C., SOUCHIER B., BRETHES A., 1977. *Modification de fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs*. Compte rendu de fin d'étude. Direction générale de la Recherche scientifique et technique, 88 p.
- BONNEAU M., BRETHES A., LELONG F., LÉVY G., NYS C., SOUCHIER B., 1979. Effets de boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol. *Rev. for. fr.*, **XXXI** (3), 198-207.
- BONNEAU M., 1983. *Conséquences des monocultures résineuses et alternatives possibles*. Rapport scientifique final. ATP Ecosystèmes, C.N.R.S., 68 p.
- BULDGEN P., CAJOT O., MONJOIE A., REMACLE J., 1984. Biochimie de deux bassins versants de l'Est de la Belgique. *Physio-géo.*, **9**, 47-59.
- DUPRAZ C., 1981. *Suivi hydrologique et hydrochimique appliqué à l'étude des effets de l'enrésinement et de l'écobuage*. Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts. 66 p. + annexes.
- DUPRAZ C., 1984. *Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétations contrastées (Mont Lozère, France)*. Thèse doct. ing., Université d'Orléans, 363 p. + annexes.
- DUPRAZ C., DIDON J.F., LELONG F., 1984. Les bassins versants expérimentaux du Mont Lozère : premiers résultats sur le rôle hydrologique du couvert végétal. *Bull. Hydrogéologie*, BRGM, 3 (sous presse).
- DUPRAZ C., WEDRAOGO-DUMAZET B., DUBREULE A., 1984. Echantillonnages adaptés et méthodes de calcul automatique pour l'évaluation de la charge soluble dans les petits bassins versants. *Physio-géo.*, **9**, 99-116.

- DURAND P., 1984. *Etude statistique des caractéristiques physico-chimiques des sols de trois bassins versants, à végétation contrastée, du Mont Lozère*. Rap. Labo. Géol. Appl., Univ. d'Orléans, 10 p.
- FREDRIKSEN R.L., 1972. Nutrient budget of a Douglas-fir forest on an experimental watershed in western Oregon. In : Proceedings « *Research on coniferous forest ecosystems* » a symposium, pp. 115-131, Bellingham, Wash.
- HENDERSON G.S., SWANK W.T., WAIDE J.B., GRIER C.C., 1978. Nutrient budgets of appalachian and cascades region watersheds : a comparison. *For. Sci.*, vol. **24** (3), 383-397.
- KREUTZER K., 1976. Effect of growth on next rotation. *Symposium on the harvesting of a larger part of forest biomass*. Vol. I, tome I, FAO/CEE/OIT/IUFRO, Hyrinking, Finland, June 14-16th, 1976.
- LELONG F., SOUCHIER B., 1970. Bilans d'altération dans la séquence de sols vosgiens, sols bruns acides à podzols, sur granite. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **23**, 113-143
- LELONG F., PICH P., 1978. Influence de la végétation sur l'évolution pédologique des sols sableux du Val-de-Loire. *Sci. de la Terre*, **XXII** (3), 243-271.
- LELONG F., SOUCHIER B., 1979. Les bilans d'altération dans les sols. Méthodes, résultats, perspectives. *Sci. du Sol*, **2-3**, 267-279.
- LELONG F., ROOSE E., AUBERT G., PEDRO G., FAUCK R., 1984. Géodynamique actuelle de différents sols à végétation naturelle ou cultivée d'Afrique de l'Ouest. *Catena* (sous presse).
- LIKENS G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S., EATON J.S., JOHNSON N.M., 1977. *Biogeochemistry of a forested ecosystem* Springer-Verlag, New York, 146 p.
- NYS C., 1977. Influence d'une plantation d'épicéas sur un sol granitique du plateau de Millevaches (France). Proceedings of the Symposium « *Soil as a site factor for forests of the temperate and cool zone* », Zvolen 5-7 sept. 1977, 142-153.
- NYS C., 1981. Modifications des caractéristiques physicochimiques d'un sol brun des Ardennes primaires par la monoculture d'épicéas. *Ann. Sci. For.*, vol. **38** (2), 237-259.
- SWANK W.T., DOUGLAS J.E., 1975. *Nutrient flux in undisturbed and manipulated forest ecosystems in the southern appalachian mountains*. Symposium de Tokyo. Publication n° 17 de l'AISH, 14-60.
- ULRICH B., 1984. Effects of air pollution on forest ecosystems and waters. The principles demonstrated at a case study in central Europe. *Atmospheric Environment*, **18** (3), 621-628.
- WEDRAOGO-DUMAZET B., 1983. *Modification de la charge chimique des eaux au cours du transit à travers trois écosystèmes distincts du Mont Lozère*. Thèse de doctorat de 3^e cycle. Université d'Orléans, 147 p.