Article original

Comparaison des eaux liées et des eaux libres des sols de 3 peuplements d'épicéa (*Picea abies* Karst) des Vosges. Application à l'étude du fonctionnement actuel des sols et conséquences pour l'état sanitaire des peuplements

J Ranger ¹, D Discours ¹, D Mohamed Ahamed ¹,
C Moares ¹, É Dambrine ¹, D Merlet ², J Rouiller ²

¹ INRA-CRF-Nancy, unité de recherches sur la microbiologie des sols et le fonctionnement
biogéochimique des écosystèmes forestiers, Champenoux, 54280 Seichamps;

² CNRS-centre de pédologie biologique, BP5, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy cedex, France

(Reçu le 24 décembre 1992; accepté le 17 juin 1993)

Résumé — Les solutions du sol ont été étudiées pendant un an dans 3 plantations d'épicéa (*Picea abies* Karst) des Vosges, représentant un gradient quant à leur état sanitaire et leur production : la pessière de Gemaingoutte fortement productive et non déperissante, celle d'Aubure moyennement productive et déperissante et celle du Bonhomme, peu productive et fortement déperissante. Dans cette dernière un amendement calco-magnésien a permis de revitaliser le peuplement; les solutions du sol du peuplement amendé ont également été étudiées. Les eaux gravitaires ont été collectées toutes les 2 semaines à Aubure et 4 semaines dans les autres sites, par les lysimètres-plaques sans tension à différents niveaux dans les sols, tandis que les eaux liées ou capillaires ont été extraites à partir d'échantillons prélevés aux mêmes dates par déplacement sur colonne. Ces 2 types de solutions ont des compositions qui peuvent être soit très différentes, soit très semblables en fonction, semble-t-il, des paramètres climatiques et des paramètres physiques des sols qui contrôlent les flux hydro-chimiques. La composition d'une solution peut être expliquée par son temps de contact avec la phase solide et le milieu particulier dans lequel elle circule. Les 2 types de solutions apportent des informations complémentaires sur le fonctionnement actuel des sols : les solutions gravitaires doivent être prises en compte pour l'établissement des flux de drainage profond à la base des sols, alors que les solutions «capillaires» rendent compte des équilibres phase solide/phase liquide et du milieu dans lequel les racines effectuent leur prélèvement. Dans ces trois situations étudiées, les données sur les solutions du sol (fig 1 à 5) i) permettent de caractériser le fonctionnement biogéochimique moyen du sol (fig 6), ii) de mettre en évidence les effets d'un amendement calco-magnésien sur la qualité des solutions ou sur la nitrification nette (fig 4) ou iii) de mettre en relation les paramètres édaphiques et l'état sanitaire des peuplements forestiers (fig 7).

**solutions du sol / eaux gravitaires / lysimètres sans tension / eaux capillaires / hydrochimie /
fonctionnement des sols / épicéa commun / déperissement**

Summary — Comparison of the gravitational and the capillary water of 3 spruce (*Picea abies* Karst) stands in the Vosges. Usefulness for the identification of the current soil function and consequences for the health status of the stands. Soil solutions were studied for 1 yr in 3 Norway spruce stands (*Picea abies* Karst) in the Vosges mountains. These stands represent a gradient of production and forest decline symptoms for Spruce in this area: the Gemaingoutte stand has high production and never showed any decline symptoms; the Aubure stand is moderately productive but showed some decline symptoms; and the Bonhomme stand has a low productivity with high decline symptoms. In the latter, a revitalization was obtained by fertilization (Ca and Mg). Gravitational water was collected every 2 weeks in Aubure and every fourth week at the other 2 sites, by zero-tension lysimeters installed at different depths in the soil profile (15, 30, 60 and 70 cm). Capillary water was extracted from soil samples collected at the same time interval, by displacement in columns. The results showed that these 2 types of solutions could have very different or sometimes similar compositions. It was hypothesized that both soil physical and climatic parameters determining the soil water regime, could explain these differences. The residence time and the water pathways are of paramount importance for the soil solution chemistry. In the studied soils, the observations made on the gravitational and capillary water (fig 1 to 5) allowed us: i) to identify the biogeochemical function of the soils (fig 6); ii) to qualify the transformations of soil biogeochemistry after liming (fig 4); and iii) to correlate the edaphic parameters to the health status of the stands (fig 7).

soil solution / gravitational water / zero-tension lysimeter / capillary water / hydrochemistry / soil functioning / Norway spruce / forest decline

INTRODUCTION

La solution est le paramètre dynamique du fonctionnement du sol, si on la compare à la phase solide qui ne donne que des informations statiques et le plus souvent «cumulatives».

On distingue cependant plusieurs types de solutions, dont la définition théorique est classique en science du sol : les solutions libres ou gravitaires et les solutions liées à la phase solide ou capillaires (Demolon, 1960 ; INRA, 1979 ; Meriaux, 1979) ; c'est cette terminologie que nous utiliserons. De nombreuses études ont révélé des différences dans leurs compositions chimiques (Vedy et Bruckert, 1979 ; Bonne *et al*, 1982 ; Barbee et Brown, 1986 ; Gras, 1988 ; Zabowski, 1989 ; Zabowski et Ugolini, 1990). Il n'existe pourtant pas de méthode de référence, spécifique et fiable pour extraire ces différents types de solutions ; on ne peut actuellement que comparer différentes solutions

issues de méthodes d'extractions dont il est indispensable de préciser la nature (Adams, 1974).

L'objectif principal de ce travail est de montrer l'intérêt des solutions du sol pour la compréhension des mécanismes actuels du fonctionnement des écosystèmes. Deux types de solutions seront comparées : i) les solutions gravitaires qui circulent rapidement dans la macroporosité du sol et dont la composition chimique ne correspondra généralement pas à un état d'équilibre avec la phase solide, et ii) les solutions liées à la phase solide, assimilées aux eaux capillaires correspondant à un certain équilibre entre la phase liquide et la phase solide.

Le suivi de ces 2 types de solutions pendant un cycle annuel complet, dans les sols acides de 3 plantations d'épicéa commun (*Picea abies* Karst) dans les Vosges, variant quant à leur croissance et leur état sanitaire, servira de support à cette étude.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les sites

Trois sites ont été choisis comme sites pilotes pour y effectuer des études à moyen terme du fonctionnement biogéochimique, dans une série d'écosystèmes représentant un gradient dans les symptômes de dépérissement : i) celui de Gemaingoutte où le peuplement d'épicéa de forte production ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à 85 ans) ne présente aucun signe de dépérissement ; ii) celui d'Aubure où le peuplement moyennement productif ($8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à 85 ans) montre des signes de dépérissement (jaunissement et défoliation limités) ; et enfin iii) celui du col du Bonhomme où le peuplement peu productif ($6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ à 70 ans) est très dépérissant (jaunissement et défoliation intenses). Dans ce dernier site, une expérience d'amendement calco-magnésien (mélange de calcaire broyé ($1400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), chaux vive ($1100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) et magnésie ($400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) a été mise en place en 1985 (Bonneau *et al.*, 1992). Les résultats très positifs sur la revitalisation des peuplements ont conduit à développer les études concernant les effets de l'amendement sur les sols (Mohamed *et al.*, 1993).

Le tableau I résume la situation géographique et écologique des trois sites vosgiens. Ces sites ont été étudiés de manière approfondie pendant au moins 4 années, pour ce qui concerne le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème.

Le tableau II donne les principales caractéristiques physico-chimiques des sols. Il s'agit tou-

jours de sols acides, riches en matière organique en surface, assez largement désaturés, sur lesquels ont été introduits artificiellement des peuplements d'épicéas communs. Les taux de Ca et Mg échangeables conduisent au gradient de fertilité chimique suivant : Gemaingoutte > Aubure > Bonhomme non traité. Ce gradient de fertilité est bien corrélé aux caractéristiques chimiques de la roche-mère du sol et au type de sol résultant : sol brun acide à Gemaingoutte et à Aubure, sol podzolique au col du Bonhomme.

Les méthodes utilisées pour la collecte des solutions du sol

Les eaux gravitaires

Des dispositifs lysimétriques sans tension de type Shilova (1955) ont été installés à 10 ou 15 cm, 30 cm et 60 ou 70 cm de profondeur en fonction des sites. Il s'agit de plaques lysimétriques, de $40 \times 30 \text{ cm}$, en polyéthylène de 1 cm d'épaisseur, enfoncées par pression à la base des horizons pédologiques et parallèlement à la surface du sol, à l'aide de deux vérins. Le nombre de plaques par niveau est de 3 par traitement au Bonhomme (Mohamed *et al.*, 1993), 4 à Gemaingoutte (Mohamed, 1992) et 8 à Aubure (Probst *et al.*, 1990). Les solutions ont été collectées toutes les 2 semaines à Aubure et toutes les 4 semaines à Gemaingoutte et au Bonhomme. Ces solutions sont conservées à l'abri de la lumière dans une fosse fermée, s'opposant aux brusques variations de température.

Tableau I. Quelques caractéristiques générales des sites étudiés.

Site	Sol	Altitude	Pluviométrie	Essence	Etat sanitaire
Gemaingoutte	Brun acide sur granito-gneiss	650 m	1 120 mm	<i>Picea abies</i> Karst	sain
Aubure	Brun acide sur granite acide du Brézouard	1 100 m	1 400 mm	<i>Picea abies</i> Karst	dépérissant
Bonhomme	Podzolique	1 100 m	1 550 mm	<i>Picea abies</i>	très dépérissant
Témoin	sur granite acide			Karst	
Amendement Ca Mg	du Valtin				peu dépérissant

Tableau II. Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites étudiés (données exprimées par rapport à la terre fine sèche à l'air).

Site	Horizon	Profondeur	Da TF	Argile %	Sable %	Éléments grossiers %	MO %	pH eau	CEC meq/100 g	Ca _e ²⁺ meq/100 g	Mg _e ²⁺ meq/100 g	Al _e ³⁺ meq/100 g
Gemaingoutte	Mull Moder	+3 -0										
	A1	0-5	0,6	21	52	29	15,5	3,5	13,5	1,04	0,57	9,4
	A12	5-15	0,6	18	56	40	4,2	4,1	9,4	0,44	0,27	7,6
	(B)1	15-25	1,2	17	57	44	2,7	4,4	6,6	0,37	0,20	5,5
	(B)2	25-65	1,4	17	55	50	1,5	4,6	4,9	0,30	0,15	4,1
	C	> 65	1,6	15	55	46		4,6	4,8	0,32	0,20	4,1
Aubure	Mull Moder	+3 -0										
	A1	0-10	1,0	20	60	60	7,1	3,5	12,0	0,42	0,27	10,9
	A1(B)	10-30	1,25	20	57	55	3,4	3,9	13,1	0,13	0,18	12,5
	(B)	30-50	1,35	20	57	55	2,5	4,2	11,5	0,12	0,17	11,1
	(B)/C	> 50		19	60	55		4,4	10,1			
Bonhomme Témoin	Moder	+5-0										
	A1	0-7	0,4	21	47	13	23,0	3,4	15,2	0,80	3,10	9,0
	A2Bh	7-14	0,6	15	56	17	11	3,6	15,3	0,17	0,10	11,8
	Bh	14-20	0,6	13	59	17	6,0	3,8	16,7	0,14	0,06	13,4
	Bs	20-60	0,6	11	60	20	4,5	4,1	12,4	0,11	0,04	10,0
	C	> 60	0,7	9	61	20		4,4	7,8	0,08	0,02	5,6
Bonhomme Traitement CaMg	Moder	+5 -0										
	A1	0-7	0,4	21	47	13	24,0	4,5	18,4	11,80	3,10	2,3
	A2Bh	7-14	0,6	15	56	17	6,0	3,9	12,7	0,60	0,46	9,40
	Bh	14-20	0,6	13	59	17	5,0	4,1	11,9	0,31	0,31	9,70
	Bs	20-60	0,6	11	60	20	4,5	4,3	12,3	0,14	0,14	7,60
	C	> 60	0,7	9	61	20		4,4	6,4	0,15	0,11	5,0

TF = terre fine ; CEC = capacité d'échange cationique effective ; élément_e = élément échangeable.

Les eaux liées (solutions capillaires)

Deux méthodes ont été testées en parallèle pendant cinq mois avant de n'en retenir qu'une seule pour le travail définitif qui a porté sur 15 prélèvements espacés de 4 semaines. À chaque échantillonnage, le sol est prélevé à partir de 3 profils indépendants, pour les horizons entiers 0–10/15 cm, 15–30 cm et 30–60/70 cm. La limite inférieure de ces horizons correspond aux niveaux d'insertion des plaques lysimétriques. Le sol humide est tamisé à 5 mm pour les extractions de solutions; son taux d'humidité est mesuré. L'extraction est réalisée dans les plus brefs délais sur un échantillon moyen, 2 répétitions sont effectuées.

La centrifugation

Elle a été réalisée à l'aide d'un centrifugeur «Jouan K110 SX» équipé de pots en polycarbonate pouvant recevoir 250 g de sol humide. Ces pots ont été conçus de façon à ce que la solution extraite soit récupérée dans un réceptacle indépendant, à la base du pot (méthode de Gras *et al*, 1988; Kugler, 1988); deux centrifugations successives sont effectuées : une première durant 20 min à 1770 m/s² (pF équivalent = 3) qui élimine les eaux gravitaires *sl* (à écoulement lent en particulier, dans l'acception de Meriaux, 1979) si elles existent, et une seconde de 20 min à 17 200 m/s² (pF équivalent = 4), et qui est censée extraire les eaux capillaires absorbables. Deux répétitions sont effectuées par échantillon sur 250 g de sol chacune, en veillant à ce que la colonne de sol en fin d'extraction ne dépasse pas 5 cm de hauteur afin d'éviter l'apparition d'un gradient d'humidité. Celui-ci diminuerait le rendement d'extraction et pourrait conduire à une modification sensible de l'hydrochimie qui dépend du pF équivalent. Cette méthode a été très souvent utilisée (Gilman, 1976; Elkhatab *et al*, 1987; Zabowski et Ugolini, 1990).

Le déplacement sur colonne

Cette méthode décrite par Adams (1974), Adams *et al* (1980), Calvato de Anta *et al* (1987) et Moares et Ranger (1991) consiste à déplacer la solution du sol par une solution aqueuse contenant un traceur que l'on identifiera facilement. Il s'agit en l'occurrence du sulfo-cyanate de potassium (SCNK) qui, par la réaction colorée qu'il produit avec le chlorure ferrique, est utilisé pour déceler la présence du liquide de dé-

placement. Environ 800 g de sol humide sont introduits dans une colonne en PVC de 3 cm de diamètre et de 1,25 m de hauteur. La solution du sol est déplacée par une charge correspondant à 10 cm de solution SCNK à 0,4% maintenue constante à la partie supérieure de la colonne de terre.

Remarque

La comparaison des résultats obtenus par les lysimètres-plaques et le déplacement sur colonne ou par centrifugation implique que l'on compare les données à la base d'un horizon et celles pour l'horizon entier. De plus, les eaux lysimétriques représentent le cumul d'une collecte sur un mois, alors que les eaux liées sont issues d'un déplacement à un instant donné.

Les méthodes analytiques

Les sols ont été analysés suivant les protocoles décrits par Bonneau et Souchier (1979); la capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables ont été évalués au pH du sol par la méthode de Rouiller *et al* (1980).

Les solutions sont analysées par spectrophotométrie d'émission ICP (Jobin-Yvon JY38+) pour les cations (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Mn) et P, et par colorimétrie automatique (autoanalyseur Technicon) pour les anions (N-NO₃⁻, Cl⁻, S-SO₄²⁻) et N-NH₄⁺.

Le carbone total a été dosé sur appareil TCM (ERBA Science), sur des échantillons moyens saisonniers.

Compte tenu du pH des solutions, les charges suivantes ont été attribuées aux ions de charge variable : Si⁰, P⁻, Al³⁺, ce qui représente une approximation pour Al (Driscoll, 1984).

RÉSULTATS

Comparaison des solutions obtenues par déplacement sur colonne et par centrifugation

La méthode par déplacement, qui correspond à une pression exercée de 0,6 at-

mosphère environ, extrait paradoxalement des quantités d'eau significativement plus importantes que la centrifugation pour laquelle la pression équivalente appliquée est de 8,5 atmosphères. Les valeurs moyennes des quantités extraites par les deux méthodes sont de 10 ml pour 100 g de sol sec pour le déplacement sur colonne et de 5,3 ml pour la centrifugation; ces deux variables sont significativement corrélées ($r = 0,66$ pour 48 données). L'extraction par centrifugation est d'autant plus efficace que la teneur en eau du sol est faible, là où la méthode des colonnes est plus difficile à appliquer.

Ces données, en accord avec les observations d'Adams *et al* (1980), peuvent s'expliquer par les mécanismes physiques mis en jeu dans les deux types d'extraction. La centrifugation conduit à des déformations du matériau : le tassement important de la base de la colonne de sol conduit rapidement à une diminution de sa perméabilité. Le déplacement sur colonne se fait par effet piston ne nécessitant pas des pressions importantes.

Van Praag et Weissen (1984) adaptèrent la méthode d'Adams en utilisant simultanément le traçage à SCNK et un traçage à l'eau tritiée. Ils montrèrent qu'il n'y a pas de différence de réponse entre ces deux traçages. Ce résultat indique que la solution obtenue est bien la solution du sol et non une solution dans laquelle les cations échangeables du sol auraient été déplacés contre K de la solution de déplacement. Les rapports Ca/Al et Mg/Al établis pour les éléments échangeables et pour les solutions de déplacement montrent d'ailleurs des valeurs totalement différentes et non corrélées.

Concernant le chimisme des solutions, l'analyse statistique des données obtenues par les deux méthodes montre (tableau III):

– des différences significatives pour Mn^{2+} , $S-SO_4^{2-}$, Cl^- , $N-NO_3^-$, Mg^{2+} , Ca^{2+} et Al^{3+} , en revanche pas de différences significatives pour Na^+ , K^+ , H^+ , $N-NH_4^+$ (le carbone organique total en solution n'est pas différent entre les deux types de solutions, mais les mesures n'ont été effectuées que sur des regroupements par trimestre);

Tableau III. Comparaison des moyennes des concentrations des solutions obtenues par les deux méthodes de déplacement sur colonne et par centrifugation (données en $\mu eq/l$).

Elément	Déplacement	Centrifugation	Test sur la différence	Coeff r entre méthodes
Mn	28	20	*	0,944***; $n = 41$
Mg	180	130	*	0,937***; $n = 41$
Ca	236	190	*	0,892***; $n = 41$
Al	239	159	*	0,672***; $n = 41$
Na	297	259	NS	NS; $n = 41$
K	71	77	NS	0,521***; $n = 41$
H	103	114	NS	0,771***; $n = 41$
NH ₄	52	48	NS	0,341*; $n = 34$
SO ₄	365	224	*	0,467***; $n = 41$
NO ₃	431	533	*	0,549***; $n = 34$
Cl	370	281	*	0,507***; $n = 34$

r = coefficient de corrélation; *** : valeur significative à 1‰; ** : valeur significative à 1%; * : valeur significative à 5%; NS : valeur non significative.

– des corrélations significatives entre les concentrations d'un même élément obtenues par les deux méthodes et ceci pour tous les éléments sauf Na^+ .

Au total, ces deux méthodes extraient des solutions dont les compositions chimiques ne sont pas identiques. L'analyse des relations entre les mêmes éléments chimiques des deux solutions conduisent cependant à une information voisine, surtout si on les compare aux eaux gravitaires. Ce résultat confirme celui de Van Praag et Weissen (1984).

Nous avons retenu la méthode des colonnes qui permet en particulier d'extraire des quantités d'eau plus importantes que la centrifugation, facilitant le dosage de tous les ions en solution.

Données générales sur les eaux gravitaires et les solutions obtenues par déplacement : comparaison des 3 sols

Cette première analyse concerne les résultats moyens pour les profils des 3 sols et pour tous les prélèvements, pour les eaux libres et pour les eaux liées (tableau IV). Les données portent essentiellement sur les cations et anions minéraux; seul le carbone total a été dosé.

Comparaison des eaux gravitaires

Elle montre que :

- les trois sols sont différents pour Ca^{2+} , N-NO_3^- et K^+ ;
- le sol de Gemaingoutte diffère des deux autres pour Mg^{2+} , Na^+ et Cl^- ;
- le sol d'Aubure diffère des deux autres pour Si et N-NH_4^+ ;
- il n'y a pas de différence significative pour les trois sols pour Mn^{2+} et S-SO_4^{2-} ;

– l'effet du chaulage au Bonhomme est significatif pour Ca^{2+} , Al^{3+} , K^+ , H^+ et N-NO_3^- .

Comparaison des solutions de déplacement

Elle montre que :

- les trois sols sont différents pour Mn^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et N-NO_3^- ;
- le sol d'Aubure diffère des deux autres pour S-SO_4^{2-} et Na^+ ;
- le sol de Gemaingoutte diffère des deux autres pour Si et Al^{3+} ;
- il n'y a pas de différence entre les sols pour N-NH_4^+ ;
- l'effet du chaulage est significatif pour : Mg^{2+} , Ca^{2+} et H^+ .

Comparaison des 2 types de solution pour l'ensemble des 3 sols

Ces solutions sont différentes pour tous les éléments (tableau V). La comparaison effectuée pour chaque type de sol est bien évidemment plus intéressante :

- pour le sol de Gemaingoutte, tous les éléments sont significativement différents, sauf Al^{3+} ;
- pour le sol d'Aubure, les différences sont significatives pour tous les éléments;
- pour le sol du col du Bonhomme, la majorité des éléments montre des différences significatives, avec comme exception S-SO_4^{2-} , H^+ et à nouveau Al^{3+} . Le chaulage modifie sensiblement ce schéma puisque tous les éléments sont significativement différents dans ce traitement.

Le carbone total présente généralement des concentrations voisines dans les deux types de solutions quel que soit le type de sol (tableau VI). Une influence significative des anions organiques dans l'équilibre ionique des solutions n'est possible que

Tableau IV. Composition moyenne annuelle des eaux libres et des eaux liées pour les différents sites en 1991 (données exprimées en mg/l).

A – Eaux libres

	Si	Mn	Mg	Ca	Al	Na	K	H	N-NH ₄	S-SO ₄	N-NO ₃	Cl	Ca/Al	Mg/Al
Gemaingoutte	3,35 ^a	0,96 ^a	1,01 ^a	2,17 ^a	2,31 ^a	0,95 ^a	1,64 ^a	0,07 ^a	0,31 ^a	3,36 ^a	4,81 ^a	2,46 ^a	1,13 ^a	0,53 ^a
écart type	2,52	0,72	0,57	1,38	2,24	0,31	0,93	0,05	0,44	1,05	5,30	0,68	0,59	0,28
Aubure	2,39 ^b	0,97 ^a	0,33 ^b	1,69 ^b	1,45 ^b	1,36 ^b	1,42 ^a	0,08 ^a	0,13 ^b	3,19 ^a	1,88 ^b	3,21 ^b	1,29 ^a	0,26 ^b
écart type	0,78	0,31	0,12	0,87	0,50	0,34	0,70	0,04	0,10	0,97	1,39	0,68	0,73	0,14
Bonhomme témoin	3,47 ^a	0,07 ^b	0,26 ^b	0,72 ^c	2,02 ^a	1,50 ^b	1,05 ^b	0,11 ^b	0,21 ^{ab}	3,64 ^a	1,16 ^{bc}	3,17 ^b	0,41 ^b	0,15 ^b
écart type	1,52	0,03	0,09	0,28	0,65	0,50	0,47	0,08	0,19	1,28	1,43	0,96	0,26	0,14
Bonhomme CaMg	2,75 ^{ab}	0,04 ^b	0,93 ^a	1,19 ^d	0,73 ^c	0,99 ^a	0,61 ^c	0,03 ^c	0,27 ^a	2,59 ^b	0,53 ^c	2,18 ^a	2,02 ^c	1,56 ^c
écart type	1,49	0,03	0,29	0,33	0,34	0,34	0,45	0,02	0,28	0,84	0,79	0,90	1,20	0,86

B – Eaux-liées

	Si	Mn	Mg	Ca	Al	Na	K	H	N-NH ₄	S-SO ₄	N-NO ₃	Cl	Ca/Al	Mg/Al
Gemaingoutte	8,88 ^a	1,46 ^a	2,74 ^a	5,36 ^a	2,81 ^a	5,29 ^a	2,29 ^a	0,12 ^a	0,66 ^a	4,52 ^a	9,43 ^a	10,14	2,04 ^a	1,04 ^a
écart type	3,91	0,83	1,18	2,73	2,81	1,93	1,40	0,13	0,89	1,28	5,74	3,14	0,91	0,39
Aubure	7,10 ^b	1,10 ^b	1,33 ^b	6,29 ^a	1,93 ^b	7,63 ^b	3,11 ^b	0,15 ^a	0,64 ^a	7,37 ^b	5,81 ^b	15,53 ^b	3,99 ^b	0,83 ^{ab}
écart type	3,01	0,58	0,70	4,46	1,93	4,35	1,65	0,14	0,45	3,75	3,21	6,99	3,73	0,59
Bonhomme témoin	6,96 ^b	0,20 ^c	0,71 ^c	2,07 ^b	1,73 ^b	5,02 ^a	1,61 ^c	0,13 ^a	0,69 ^a	3,54 ^a	3,36 ^c	8,20 ^a	1,39 ^a	0,49 ^b
écart type	2,45	0,11	0,21	0,99	1,73	1,64	0,72	0,14	0,62	1,91	1,68	3,49	0,79	0,26
Bonhomme CaMg	8,41 ^{ab}	0,10 ^c	2,79 ^a	7,58 ^c	1,49 ^b	4,22 ^a	1,33 ^c	0,02 ^b	0,73 ^a	4,51 ^a	4,51 ^{bc}	8,11 ^a	5,66 ^c	2,60 ^c
écart type	4,43	0,60	1,22	6,10	1,49	1,87	0,68	0,02	0,63	1,91	2,75	3,39	3,00	1,69

Les valeurs sont le résultat de l'analyse de variance ; deux lettres différentes indiquent des différences significatives.

Tableau V. Comparaison des concentrations moyennes annuelles des eaux libres et liées : (A) tous sites confondus, (B) par site tous horizons confondus, en 1991 (données en mg/l).

	Si	Mn	Mg	Ca	Al	Na	K	H	N-NH ₄	S-SO ₄	N-NO ₃	Cl	Ca/Al	Mg/Al
(A) Toutes stations														
Eaux libres	2,96 ^a	0,50 ^a	0,62 ^a	1,42 ^a	1,62 ^a	1,21 ^a	1,16 ^a	0,07 ^a	0,23 ^a	3,18 ^a	1,95 ^a	2,77 ^a	1,23 ^a	0,64 ^a
Eaux liées	7,84 ^b	0,70 ^b	1,89 ^b	5,31 ^b	1,98 ^b	5,15 ^b	2,07 ^b	0,10 ^b	0,68 ^b	4,95 ^b	5,75 ^b	10,43 ^b	3,26 ^b	1,24 ^b
(B1) Gernaingoutte														
Eaux libres	3,35 ^a	0,96 ^a	1,01 ^a	2,17 ^a	2,51 ^a	0,95 ^a	1,64 ^a	0,08 ^a	0,31 ^a	3,36 ^a	4,81 ^a	2,46 ^a	1,13 ^a	0,53 ^a
Eaux liées	8,88 ^b	1,46 ^b	2,74 ^b	5,36 ^b	2,81 ^a	5,29 ^b	2,29 ^b	0,12 ^b	0,66 ^b	4,52 ^b	9,43 ^b	10,14 ^b	2,04 ^b	1,04 ^b
(B2) Aubure														
Eaux libres	2,39 ^a	0,97 ^a	0,33 ^a	1,69 ^a	1,45 ^a	1,36 ^a	1,42 ^a	0,08 ^a	0,13 ^a	3,19 ^a	1,88 ^a	3,21 ^a	0,29 ^a	0,26 ^a
Eaux liées	7,10 ^b	1,01 ^a	1,33 ^b	6,29 ^b	1,93 ^b	7,63 ^b	3,11 ^b	0,15 ^b	0,64 ^b	7,37 ^b	5,80 ^b	15,53 ^b	3,99 ^b	0,83 ^b
(B3) Bonhomme témoin														
Eaux libres	3,47 ^a	0,07 ^a	0,26 ^a	0,72 ^a	2,02 ^a	1,50 ^a	1,05 ^a	0,11 ^a	0,21 ^a	3,64 ^a	1,16 ^a	3,17 ^a	0,41 ^a	0,15 ^a
Eaux liées	6,96 ^b	0,20 ^b	0,71 ^b	2,07 ^b	1,73 ^a	5,02 ^b	1,61 ^b	0,13 ^a	0,69 ^b	3,54 ^a	3,36 ^b	8,20 ^b	1,39 ^b	0,49 ^b
(B4) Bonhomme CaMg														
Eaux libres	2,75 ^{aa}	0,04 ^a	0,93 ^a	1,19 ^a	0,73 ^a	0,99 ^a	0,61 ^a	0,03 ^a	0,27 ^a	2,59 ^a	0,53 ^a	2,18 ^a	2,02 ^a	1,56 ^a
Eaux liées	8,41 ^b	0,10 ^b	2,79 ^b	7,58 ^b	1,49 ^b	4,22 ^b	1,33 ^b	0,02 ^b	0,73 ^b	4,51 ^b	4,51 ^b	8,11 ^b	5,66 ^b	2,60 ^b

Les valeurs moyennes sont issues de l'analyse de variance : les écarts types sont les mêmes qu'au tableau IV ; les lettres différentes indiquent des différences significatives.

dans les 30 premiers centimètres du sol ainsi que tendent à le prouver les corrélations significatives entre le carbone en solution et le déficit de la balance ionique. Les anions organiques interviennent en particulier dans la complexation de Al avec des taux approximatifs de 20% d'Al complexé dans les 3 sols étudiés (Mohamed, 1992).

Corrélations entre ces deux types de solutions

La matrice de corrélation globale établie pour les 180 données montre qu'à ce niveau les solutions gravitaires et liées ne sont pas strictement indépendantes, pour les concentrations en Mn ($r = 0,685$), en Mg ($r = 0,538$) ou pour le pH ($r = 0,458$).

Quand on étudie ces relations en fonction des types de sol, peu d'entre elles restent significatives. On n'a donc pas affaire à 2 compartiments fixes, conservant un

comportement homogène dans chacun des types de sol.

Analyse canonique

Elle permet de visualiser les différents groupes et leur proximité, qu'il s'agisse des eaux libres ou des eaux liées (fig 1).

En ce qui concerne les eaux libres, la discrimination des 4 populations dans le plan des axes I et II est très bonne. Les variables corrélées aux axes sont : i) pour l'axe I, Mg et secondairement Ca (corrélés négativement) et H, Cl, Na et Al (corrélés positivement), et ii) pour l'axe II, Mn et secondairement Ca (corrélés positivement).

En ce qui concerne les eaux liées, la discrimination dans le plan des axes I et II est également bonne. Les variables corrélées à ces axes sont : i) pour l'axe I, S-SO_4^{2-} , Mn, Na, K, H et Cl (corrélés positivement) et de Mg (corrélé négativement), et ii) pour l'axe II, Mn, Mg, Al et N-NO_3^- (corrélés positivement).

Tableau VI. Le carbone organique dissous dans les eaux libres et dans les eaux liées (données en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$).

	Horizon	Eau libre		Eau liée	
		Moyenne annuelle	Écart type	Moyenne annuelle	Écart type
Gemaingoutte	-15 cm	25,8	10,8	28,1	4,7
	-30 cm	16,1	6,9	11,4	1,6
	-60 cm	9,6	8,2	7,1	0,8
Bonhomme Témoin	-15 cm	18,9	2,6	34,5	17,3
	-30 cm	17,3	3,1	13,1	5,0
	-60 cm	8,5	2,0	10,4	2,9
Bonhomme CaMg	-15 cm	35,7	12,8	35,4	3,2
	-30 cm	11,3	7,0	18,1	2,9
	-60 cm	4,5	1,9	8,7	0,3
Aubure	-15 cm	40,0*		nd	
	-30 cm	20,0*		nd	
	-60 cm	8,0*		nd	

* évaluation à partir de données isolées ; nd : non déterminé.

Fig 1. Représentation des solutions gravitaires (a) et capillaires (b) des 3 sites dans le plan des axes 1 et 2 de l'analyse canonique. ▲ Aubure; o Gemaingoutte, □ Bonhomme témoin; ■ Bonhomme fertilisé.

Variabilité au cours du temps

La dispersion visualisée par l'analyse canonique, étudiée par la simple analyse de variance, montre que, sur cette seule année d'étude (15 dates d'échantillonnage), on ne peut pas attribuer les variations observées à un simple effet saisonnier : il existe des variations importantes, indépendantes ou non, en fonction des éléments, mais qui ne sont pas distribuées de façon homogène. Les différences entre les deux types de solutions ne seront analysées dans les paragraphes suivants que sur les données moyennes, ce qui représente une grande simplification, puisque à chaque point de mesure les paramètres instantanés (climatiques et biologiques) vont modifier le schéma moyen. On aura cependant une évaluation très correcte de la moyenne et de la variabilité annuelle.

Comparaison des profils de concentrations eaux-libres eaux-liées dans les différents sols

Le sol de Gemaingoutte

Les eaux libres (fig 2A)

L'aluminium est toujours l'élément dominant dans les horizons organo-minéraux et minéraux. Ca et Mg oscillent autour d'une valeur moyenne de 100 $\mu\text{eq/l}$. L'acidité libre se neutralise progressivement mais incomplètement vers la base du sol. Le nitrate est l'anion dominant par rapport au sulfate.

Le chimisme des solutions gravitaires est dominé par le nitrate et l'aluminium qui sont d'ailleurs très fortement corrélés ($r = 0,933$, $n = 40$). Les corrélations entre le nitrate et les autres cations sont également très significatives; celles entre sulfate et

cations sont nettement moins significatives ($r = 0,234$ avec Al^{3+}).

Les fluctuations des concentrations en tous éléments dans le sol sont singulières et tout particulièrement celles de $N-NO_3^-$ et Al^{3+} : valeurs élevées à 15 cm de profondeur, diminution à 30 cm et remontée à 60 cm. Ces variations ont été observées au cours de toutes les saisons (Mohamed, 1992).

Les eaux liées (fig 2B)

Leur chimisme est dominé par le nitrate et par les cations Al^{3+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} (les corrélations nitrates/cations sont significatives). Le sulfate n'a qu'une influence modérée. Les fluctuations sont nulles ou faibles pour Cl^- , $S-SO_4^{2-}$ et Al^{3+} et essentiellement constituées par une diminution

brutale des concentrations entre le niveau 0–15 cm et 15–30 cm, puis plus limitée entre 15–30 cm et 30–60 cm pour $N-NO_3^-$, Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Comparaison des eaux libres et liées

Les concentrations sont en moyenne plus élevées pour les eaux liées que pour les eaux libres à 15 et 30 cm de profondeur, alors qu'elles sont pratiquement identiques à 60 cm. Dans le détail, les différences sont les suivantes :

- à 15 cm de profondeur, les eaux liées sont les plus concentrées (sauf pour $S-SO_4^{2-}$ et Al^{3+});
- à 30 cm, les eaux liées restent les plus concentrées malgré une diminution des concentrations de la majorité des éléments dans les deux types de solutions;
- à 60 cm, la diminution de la concentration des éléments dans les eaux liées conduit à une homogénéisation remarquable des deux types de solutions (sauf pour Cl^-).

Le sol d'Aubure

Les eaux libres (fig 3A)

Elles sont acides (pH moyen de 4,2), pauvres en cations «basiques», riches en $N-NO_3^-$, $S-SO_4^{2-}$ et Al^{3+} , qui dominent leur chimisme (Dambrine *et al*, 1992). La distribution du nitrate dans le sol présente en 1991 une allure singulière par rapport aux autres années, avec une augmentation continue vers la profondeur du sol, très parallèle à ce que l'on observe pour Al^{3+} . L'acidité libre n'est pas neutralisée à la base du sol où elle augmente même par rapport au niveau moyen.

Les eaux liées (fig 3B)

Il n'y a pas réellement d'anion dominant parmi $S-SO_4^{2-}$, $N-NO_3^-$ ou Cl^- . En ce qui

Fig 2. Variation verticale de la composition chimique moyenne des eaux libres (A) et des eaux liées (B) du sol de Gemaingoutte (année 1991).

concerne les cations, Ca^{2+} a une concentration plus forte que Al^{3+} et surtout que Mg^{2+} .

Les liaisons statistiques les plus fortes existent entre S-SO_4^{2-} et Al^{3+} d'une part et entre N-NO_3^- et Ca^{2+} d'autre part.

Comparaison entre les 2 types d'eaux

Outre une charge ionique plus élevée pour les solutions liées, leur chimisme présente des différences notables avec les eaux gravitaires : N-NO_3^- domine en surface mais pas en profondeur où S-SO_4^{2-} le remplace et Al^{3+} , bien que ne variant pas en valeur absolue, n'est plus le cation dominant, ce rôle est tenu par Ca^{2+} .

Le sol du col du Bonhomme

Le traitement témoin

Les eaux libres (fig 4A)

Elles se caractérisent par une grande pauvreté en Ca^{2+} et Mg^{2+} , par des teneurs élevées en cations acides (Al^{3+} et H^+) et une relative richesse en N-NO_3^- dans les horizons superficiels et en S-SO_4^{2-} dans les horizons profonds (Mohamed *et al*, 1993; Mohamed, 1992).

Les eaux liées (fig 4B)

Les concentrations des anions N-NO_3^- , S-SO_4^{2-} et Cl^- sont remarquablement identiques; elles diminuent régulièrement avec la profondeur. Si on excepte le niveau 15 cm, Al^{3+} est le cation dominant.

Fig 3. Variation verticale de la composition chimique moyenne des eaux libres (A) et des eaux liées (B) du sol d'Aubure (année 1991).

Fig 4. Variation verticale de la composition chimique moyenne des eaux libres (A) et des eaux liées (B) du sol du traitement témoin du Bonhomme (année 1991).

Les corrélations entre N-NO_3^- et Ca^{2+} et Mg^{2+} sont significatives, par contre la corrélation $\text{N-NO}_3^-/\text{Al}^{3+}$ ne l'est pas.

Comparaison entre les deux types d'eau

Les eaux liées sont plus concentrées que les eaux libres à tous les niveaux du sol, sauf en ce qui concerne Al^{3+} et S-SO_4^{2-} . Les variations relatives des cations dans la solution ne sont pas identiques dans les deux types d'eau en raison de l'augmentation des cations «basiques» dans les eaux capillaires et du maintien de Al^{3+} .

Le nitrate domine plus nettement dans les eaux liées que dans les eaux gravitaires. Ca^{2+} et Mg^{2+} , plus abondants dans les eaux capillaires, sont plus fortement corrélés au nitrate qu'au sulfate.

Le traitement CaMg

Les eaux libres (fig 5A)

La charge ionique totale est faible puisque la majorité des éléments ont des concentrations inférieures à $100 \mu\text{eq/l}$. Le nitrate est très peu concentré y compris en surface. S-SO_4^{2-} , Al^{3+} et Mg^{2+} sont les ions dominants.

Les eaux liées (fig 5B)

La concentration en nitrate est toujours plus élevée que celle du sulfate et parmi les cations, Mg^{2+} et Ca^{2+} dominant toujours Al^{3+} . N-NO_3^- et Mg^{2+} et Ca^{2+} sont significativement corrélés.

Comparaison des deux types de solutions

La charge ionique des eaux liées est nettement plus élevée que celle des eaux libres. Le nitrate notamment y est nettement plus concentré ; la concentration en Al^{3+} varie peu entre les deux types de solutions, mais son importance relative a nettement diminué dans les eaux liées où les concentrations en Mg^{2+} et Ca^{2+} ont nettement augmenté.

DISCUSSION

La comparaison des solutions libres et liées dans divers types de sols montre que, d'une manière générale, les eaux liées sont plus concentrées que les eaux libres, mais que les types de sols et les comportements des différents horizons doivent être pris en compte.

Le chimisme des différentes solutions conduit à un certain nombre d'hypothèses sur leur mode de transfert, leur vitesse de percolation et les conséquences que cela implique sur les réactions chimiques et biologiques.

Parmi les horizons étudiés, deux types de comportement sont identifiables.

Fig 5. Variation verticale de la composition chimique moyenne des eaux libres (A) et des eaux liées (B) du sol du traitement CaMg du col du Bonhomme (année 1991).

Horizons pour lesquels le chimisme des solutions libres et liées est différent

Ce sont par exemple les horizons de surface de tous les sols (0–15 cm) et les horizons moyens et profonds des sols sur granite du col du Bonhomme et d'Aubure.

Dans ces horizons, les eaux gravitaires circuleraient rapidement dans une porosité grossière où les réactions de neutralisation de l'acidité ainsi que les réactions d'échange entre phase solide et solution seraient essentiellement des réactions de déplacement (ne pouvant pas atteindre un équilibre par définition). Ces réactions seraient favorisées par des drainages climatiques importants, comme c'est le cas dans les Vosges.

Dans ces conditions de sols acides, la macroporosité serait très appauvrie en cations alcalins et alcalino-terreux les plus labiles, et considérablement enrichie en cations acides, en particulier en aluminium. L'acidité de ces solutions à faible temps de contact avec la phase solide du sol n'a pas le temps de se neutraliser dans des réactions d'altération des minéraux primaires ; la réaction dominante est un échange d'ions avec le complexe d'échange où une partie des protons peut se substituer à l'aluminium libéré en solution. Ces protons vont rapidement diffuser vers le réseau minéral, provoquant par acidolyse une libération équivalente d'aluminium conduisant, en système acide et non complexant, à la recharge du complexe absorbant en cet élément (Hetier et Tardy, 1969; Robert *et al*, 1979).

Les eaux liées, résultant d'une imbibition au cours du ressuyage, représentent les solutions «réelles» du sol. Leur temps moyen de résidence est important (en tout cas toujours supérieur à celui des eaux libres), et leur composition est le résultat d'une part de réactions chimiques en système confiné, tendant vers l'équilibre, et d'autre part de réactions biologiques locali-

sées majoritairement dans la microporosité, comme en particulier la nitrification. Dans ces conditions, la neutralisation de l'acidité des solutions (transférée ou générée localement) se ferait au cours de réactions d'altération des minéraux (primaires ou néoformés); l'échange d'ions ne peut pas être la réaction privilégiée comme le montre la différence de concentrations en Si entre les eaux gravitaires et capillaires. Cette altération libère les cations en solution, en fonction de leur présence et de leur état cristallochimique : par exemple dans le sol de Gemaingoutte les réserves totales en Ca et Mg autorisent la libération de ces éléments dans les eaux liées, alors que c'est plus difficilement le cas dans le sol très pauvre développé sur granite leucocrate au col du Bonhomme.

Les résultats montrent clairement que la nitrification a lieu dans la microporosité du sol, où les conditions physico-chimiques sont les plus favorables (Berthelin et Toutain, 1979). La présence de nitrates dans les eaux gravitaires résulterait principalement d'un transfert par diffusion à partir des eaux liées.

Horizons pour lesquels le chimisme des solutions libres et liées est voisin

C'est le cas de l'horizon profond de Gemaingoutte.

Dans cette situation, la percolation des eaux gravitaires ne se ferait plus dans des zones préférentielles, en continuité avec celle des horizons sus-jacents. Elles résulteraient plutôt d'un déplacement de la solution du sol par «effet piston», comme on peut facilement le réaliser expérimentalement sur des colonnes de sol (méthode d'Adams, 1974). Les deux types de solutions sont donc, dans ce cas particulier, identiques quant à leur «histoire» dans le sol.

Cette explication est réductionniste car basée sur des observations moyennes. Elle permet cependant de mettre indirectement en évidence le rôle de l'hydrodynamisme dans l'acquisition de la composition chimique des solutions du sol.

Exemples de l'intérêt des études des différentes solutions du sol

Caractérisation du fonctionnement biogéochimique moyen de quelques types de sols

À Gemaingoutte, le sol brun acide développé sur granito-gneiss, est moyennement filtrant. Les deux compartiments gravitaire et capillaire montrent une certaine indépendance en surface, mais tendent à s'homogénéiser avec la profondeur, de sorte qu'à 60 cm leur composition est voisine.

Dans les sols filtrants développés à partir d'une arène granitique (le col du Bonhomme et Aubure), les deux compartiments tendent à rester individualisés sur tout le profil de sol, les échanges entre les deux compartiments augmentant cependant avec la profondeur.

Cette interprétation du fonctionnement biogéochimique est très schématique ; il est évident que les eaux capillaires sont issues des eaux gravitaires par imbibition. La distribution de Ca et Mg dans les solutions du traitement de chaulage matérialise les échanges entre compartiments.

Les paramètres hydrodynamiques du milieu ont une importance considérable sur le chimisme des solutions.

Les eaux liées caractérisent en général mieux le fonctionnement réel du sol, et l'équilibre phase solide/phase liquide. Les eaux libres sont des solutions «d'exclusion» qui, en fonction des paramètres hydrodynamiques du matériau,

vont correspondre soit à des réactions strictement de déplacement, soit à des réactions mixtes de déplacement-équilibre. En sol acide, les réactions de déplacement caractérisant le fonctionnement des macropores, conduisent à des zones très désaturées, très appauvries en calcium et magnésium et enrichies en aluminium, ce que reflète parfaitement la composition des eaux gravitaires ; la microporosité correspond à une zone de réactions pouvant atteindre un certain équilibre où le complexe d'échange est beaucoup moins désaturé, des minéraux altérables sont présents, et les solutions sont de fait plus riches en calcium et magnésium en particulier.

Le chimisme des solutions serait donc essentiellement réglé par le temps de contact des solutions avec la phase solide, dépendant des paramètres hydrodynamiques du milieu. Nous n'avons pas de mesures précises de la porosité de ces sols mais les analyses physiques simples, granulométrie et densité apparente, permettent de caractériser grossièrement les milieux. Dans les sols très poreux d'Aubure et du col du Bonhomme, où la pluviométrie est abondante et bien répartie au cours de l'année (1 100 à 1 500 mm) et l'ETR limitée (ETR voisine de 0,5 ETP), les eaux gravitaires atteignent très rapidement la base du profil et ont tendance à rester indépendantes des eaux capillaires. À Gemaingoutte, le drainage rapide des eaux gravitaires en surface se trouve rapidement limité en profondeur par la diminution de la porosité du sol, et par le drainage climatique (1 000 mm de pluviométrie, ETR estimée à une valeur comprise entre 0,7 et 0,8 ETP).

Un facteur intensité est bien entendu déterminé par l'activité biologique du milieu et par la quantité de minéraux altérables.

Dans les sols étudiés, la prise en compte simultanée des deux solutions permet de proposer le schéma de fonctionnement biogéochimique de la figure 6 qui ne

pourrait être définitivement validé que par une étude détaillée des paramètres physiques des sols.

Effet des manipulations d'écosystème sur le fonctionnement biogéochimique du sol

L'amendement calco-magnésien dans l'expérience du col de Bonhomme modifie considérablement la composition des solutions du sol plusieurs années après

l'amendement : l'acidité est neutralisée beaucoup plus efficacement que dans le traitement témoin, les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} augmentent tandis que celle de Al^{3+} diminue. Cette observation est valable pour les 2 types de solutions, mais tout particulièrement pour les solutions liées. Dans ce cas précis, l'origine de la neutralisation de l'acidité se serait opérée par 2 mécanismes successifs : dans un premier temps, dissolution des particules à la surface du sol et recharge du complexe absorbant, puis à l'inverse, quand les particules ont disparu, échange de protons entre la phase solide et la solution conduisant à une désaturation en Ca^{2+} et Mg^{2+} , avec une tendance à la désaturation préférentielle en Mg^{2+} dans les échanges rapides (eaux gravitaires). Il est en effet exclu que les réactions d'altération puissent libérer plus de calcium et de magnésium que dans le traitement témoin.

La diminution des concentrations en N-NO_3^- des eaux gravitaires du traitement amendé par rapport au traitement témoin amène à conclure, soit que la nitrification serait ralentie par le chaulage, soit que les arbres revitalisés absorberaient plus efficacement les nitrates produits. La composition des solutions capillaires conduit à des conclusions différentes puisqu'elles montrent des concentrations en N-NO_3^- toujours nettement plus élevées que celles des solutions comparables du témoin.

La question se pose alors de savoir pourquoi les nitrates qui diffusent en principe assez rapidement entre les 2 compartiments macro- et microporosité dans les autres sols étudiés ne le feraient pas ici. Ces solutions ne sont certes pas « contemporaines », et il faut admettre que la nitrification brute est importante, qu'elle est plutôt stimulée qu'inhibée par l'amendement, mais que le transfert des nitrates entre les phases capillaire et gravitaire est entravé. On ne peut que faire l'hypothèse d'une immobilisation biologique entre ces 2

Fig 6. Interprétation du fonctionnement hydro-chimique des sols établie à partir des données moyennes de composition chimique des eaux libres et liées.

compartiments ; il s'agirait là d'un effet de l'amendement sur la biologie des sols que les seules études des solutions ne permettent pas d'identifier. Malgré toutes les précautions prises lors des manipulations (conservation en chambre froide et extractions dans les plus brefs délais), on ne peut exclure certains artéfacts liés à la méthode (aération lors du tamisage des échantillons, température du laboratoire pouvant stimuler la nitrification). Une solution serait d'effectuer les extractions sur le terrain, ce qui pose des problèmes matériels non négligeables.

On a là un exemple caractéristique de la complémentarité des investigations sur les différents types de solutions dont les compositions ne reflètent généralement pas le fonctionnement de sites identiques au sein du sol.

Valeur indicatrice des solutions du sol pour la production et l'état sanitaire des peuplements forestiers

Il existe des relations évidentes entre productivité des écosystèmes forestiers et richesse du sol comme l'a démontré le dépouillement des enquêtes de terrain (citons par exemple Le Tacon et Millier, 1970) : c'est le cas dans cette étude de la relation simple entre les cations Ca et Mg échangeables et la production globale des écosystèmes non traités.

Dans le cas des sols acides, Huttermann et Ulrich (1984) ont montré l'importance de la valeur absolue des rapports Ca/Al et Mg/Al dans l'aptitude des arbres à se nourrir dans un sol donné, en liaison avec les problèmes de toxicité aluminique. La figure de synthèse (fig 7) concernant les trois sites étudiés montre l'intérêt de la prise en compte simultanée des caractéristiques de la phase solide et celles des solutions du sol, dans la discrimination des résultats.

On observe que les 2 types de solutions conduisent au même classement relatif pour le rapport Mg/Al, mais qu'un facteur intensité très net distingue les solutions libres des solutions liées ; c'est cette valeur absolue qui doit être en cause dans la différence d'état sanitaire observée pour les différents peuplements. La taille de l'échantillon réduit bien évidemment la portée des conclusions.

CONCLUSIONS

Les solutions du sol sont très hétérogènes quant à leur composition chimique. Les 2 types de solutions étudiées montrent que la distinction physique entre solution gravitaire et solution liée (ou capillaire) est pertinente au plan de leur composition. Chaque méthode d'extraction des eaux liées apporte des résultats spécifiques bien que la centrifugation ou le déplacement sur colonne conduisent à des informations voisines, surtout si l'on compare ces résultats à ceux des eaux gravitaires collectées par des lysimètres sans tension.

Fig 7. Classification des peuplements étudiés, pour la production et l'état sanitaire, à partir d'un paramètre édaphique synthétique : le rapport pondéral Mg/Al des phases solide et liquide (valeur moyenne pondérée sur l'ensemble du profil).

L'étude simultanée des solutions libres et liées permet d'élaborer un schéma de fonctionnement hydrochimique des différents types de sol. Ce schéma reste cependant spéculatif tant que les paramètres hydrodynamiques des matériaux, déterminant le temps moyen de résidence des différents types de solutions, n'ont pas été précisés. Un début d'explication aux fluctuations verticales des teneurs en nitrates (et des cations associés) observées dans les eaux libres du sol de Gemaingoutte en 1991 (observé également dans les autres sites, en particulier en 1989 au Bonhomme) est apporté. Dans ce cas particulier, l'identité des concentrations des 2 types de solutions à la base du sol ne serait pas à relier à des mécanismes biologiques particuliers à ce niveau, mais résulterait plutôt de mécanismes physiques de transfert de soluté pour un matériau et un climat donnés.

L'information issue de l'étude des solutions libres et liées peut être très différente de sorte que, dans le cas général, leur spécificité peut se définir ainsi :

- les eaux gravitaires doivent être utilisées pour l'étude quantitative des bilans entrées-sorties des écosystèmes;
- les solutions liées apportent une information plus nette que les eaux gravitaires en ce qui concerne i) les équilibres phase solide/phase liquide, ii) la localisation des mécanismes chimiques (altération, échange) ou biologiques (sites de nitrification, nitrification dans les différents horizons, y compris les horizons profonds du sol) et iii) la nutrition des plantes puisque les racines absorbantes et leur symbiotes mycorhiziens ne sont vraisemblablement pas installés dans la porosité grossière du sol où les stress hydriques sont maximum en période de végétation.

L'analyse des eaux liées pourrait d'ailleurs être facilement considérée comme un outil courant de diagnostic de l'état de fertilité du sol.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement D Gelhaye, G Nourrisson et B Pollier pour leur collaboration technique.

RÉFÉRENCES

- Adams F (1974) Soil selection. *In: Soil evolution in the plant-root and its environment* (EW Carson, ed). University Press of Virginia, 441-481
- Adams F, Burmester C, Hue NV, Long FL (1980) A comparison of column-displacement and centrifuge methods for obtaining soil solutions. *Soil Sci Soc Am J* 44, 733-735
- Barbee GC, Brown KW (1986) Comparison between suction and free drainage soil solution samplers. *Soil Sci* (141) 2, 149-154
- Berthelin J, Toutain E (1979) Biologie des sols. *In: Pédologie, 2. Constituants et Propriétés du Sol* (M Bonneau, B Souchier, eds) ch VIII, Masson, Paris, 123-160
- Bonne M, Andreux F, Vedy JC, Souchier B (1982) Étude hydrochimique saisonnière dans trois sols acides : composition des eaux gravitaires et des solutions extraites à pF 4,4. *AFES N° 4*, 275-292
- Bonneau M, Souchier B (1979) *Pédologie 2 : Constituants et propriétés des sols*. Masson, Paris, 459 p
- Bonneau M, Landmann G, Adrian M (1992) La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide : essais dans les Vosges. *RFF*, XLIV, 3, 207-224
- Calveto de Anta R, Fernandez Marcos ML, Veiga Vila MA (1987) Estabilidad mineral de suelos desarrollados a partir de rocas basicas y ultrabasicas de Galicia. *An Edafol Agrobiol* 46, 643-665
- Dambrine É, Ranger J, Pollier B, Bonneau M, Granier A, Carisey N, Lu P, Probst A, Viville D, Biron P, Garbaye J, Devevre O (1992) Influence of various stress on Ca and Mg nutrition of a spruce stand developed on acidic soil. *In: Proc EC Congress "1st European Symposium on Terrestrial Ecosystems: Forests and Woodland"* (A Teller, P Mathy, JNR Jeffers, eds), p 465-472

- Demolon A (1960) *Principes d'agronomie. T 1. Dynamique du sol*. Dunod, Paris, 322-351
- Driscoll CT (1984) A procedure for the fractionation of aqueous aluminium in dilute acidic waters. *Int J Environ Anal Chem* 16, 267-283
- Elkhatib EA, Hern JL, Staley TE (1987) A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Sci Soc Am J* 50, 297-299
- Gilman GP (1976) Centrifuge method for obtaining soil solution. Div Soils from Tropical North Queensland. *Aust J Soil Res* 16, 67-77
- Gras F (1988) L'aluminium dans les sols acides forestiers et leurs solutions : exemple de deux sols sur grès du massif vosgien. DE-FORPA, rapport 1988: 6-03, 6-23
- Gras F, Merlet D, Rouiller J, Becquer T, Bartoli F (1988) Effets des apports acides sur la libération de l'aluminium dans les sols forestiers du massif vosgien. Rapport de fin d'études, ministère de l'Environnement, 20 p
- Hetier JM, Tardy Y (1969) Présence de Vermiculite-Al, Montmorillonite-Al et Chlorite-Al et leur répartition dans quelques sols des Vosges. *CR Acad Sci Paris*, t 268 : 259-261
- Huttermann A, Ulrich B (1984) Solid phase-solution-root interactions in soils subjected to acid deposition. *Phil Trans Roy Soc London B305* : 353-368
- INRA (1979) *L'eau et la production agricole*. Editions SEI, INRA Versailles, 120 pp
- Kugler J (1988) Approche méthodologique et modélisation du transfert des nitrates vers la nappe phréatique d'Alsace. Cas de la zone inondable du Ried Central de l'Ill. Thèse université Louis-Pasteur, Strasbourg, 150 pp
- Le Tacon F, Millier C (1970) Influence des conditions de nutrition minérale sur la croissance de l'Epicéa commun sur les plateaux calcaires de l'Est de la France. *Ann Sci For* 27, 4, 335-355
- Meriaux S (1979) Le sol et l'eau. In: *Pédologie. 2. Constituants et Propriétés du sol* (M Bonneau, B Souchier, eds) chap VIII. Masson, Paris, 266-310
- Moares Dominguez C, Ranger J (1991) Estudio comparativo de dos metodos de obtencion de solucion de suelo : desplazamiento en columna y placas lisimetricas. Congrès Tene-rife (Iles Canaries), 22-28 septembre 1991
- Mohamed AD (1992) Rôle du facteur édaphique dans le fonctionnement biogéochimique de deux pessières vosgiennes : effet d'un amendement calci-magnésien. Thèse univ Nancy I, 206 p
- Mohamed AD, Ranger J, Dambrine E, Bonneau M, Granier A (1993) The current soil function of Norway spruce declining ecosystem assessed by the mass-balance technique : Effect of liming and fertilization on the soil Nitrogen. *For Ecol Manag* (sous presse)
- Probst A, Dambrine E, Viville D, Fritz B (1990) Influence of acid atmospheric inputs on surface water chemistry and mineral fluxes in a declining Spruce stand within a small granitic catchment (Vosges massif, France). *J Hydrol* 116, 101-124
- Robert M, Razzaghe-Karimi MH, Vincente MA, Veneau G (1979) Rôle du facteur biochimique dans l'altération des minéraux silicatés. *Sci Sol* 2, 3, 153-174
- Rouiller J, Guillet B, Bruckert S (1980) Cations acides échangeables et acidité de surface. Approche analytique et incidences pédogénétiques. *Sci Sol* 2, 161-175
- Shilova YEI (1955) A method of obtaining the soil solution under natural conditions. *Pochvovedeniye* 11
- Van Praag HJ, Weissen F (1984) The intensity factor in acid forest soils : extraction and composition of the soil solution. *Pédologie XXXIV-2*, 203-214
- Vedy JC, Bruckert S (1979) Les solutions du sol: composition et signification pédogénétique. In: *Pédologie, 2. Constituants et Propriétés du sol* (M Bonneau, B Souchier, eds) chap VIII. Masson, Paris, 161-186
- Zabowski D (1989) Lysimeter and centrifuge soil solutions ; a comparison of methods and objectives : 139-148. In: *Research strategies for long-term site productivity* (WJ Dyck, CA-Mees, eds), Proc IEA/BE A3 Workshop, Seattle, WA, August 1988. IEA/BE report n° 8 For Research Institute, NZ, Bull 152
- Zabowski D, Ugolini FC (1990) Lysimeter and centrifuge soil solutions : seasonal differences between methods. *Soil Sci Soc Am J* 54, 1130-1135