



HAL
open science

Fonctionnement hydrochimique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère (France) et conséquences d'une coupe forestière

Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot

► **To cite this version:**

Claude Martin, Jean-François Didon-Lescot. Fonctionnement hydrochimique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère (France) et conséquences d'une coupe forestière. *Annales de Géomorphologie / Annals of Geomorphology / Zeitschrift für Geomorphologie*, 2003, 47 (1), pp.117-140. hal-00318523

HAL Id: hal-00318523

<https://hal.science/hal-00318523>

Submitted on 4 Sep 2008

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.

Fonctionnement hydrochimique des bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère (France) et conséquences d'une coupe forestière

par

CLAUDE MARTIN et JEAN-FRANÇOIS DIDON-LESCOT

Résumé. Les travaux de reboisement engagés dès la fin du XIX^{ème} siècle dans le haut bassin granitique du Tarn ont modifié les paysages et stabilisé les versants. Le passage d'une pelouse d'altitude broutée à des plantations d'épicéas a entraîné une modification des cycles biogéochimiques et donc une modification de la composition chimique des eaux. Les bilans hydrochimiques établis pour trois bassins versants couverts d'une pessière, d'une pelouse et d'une hêtraie non aménagée, mettent en évidence les différences de fonctionnement de ces milieux. La coupe à blanc des épicéas permet de préciser les pertes supplémentaires en produits dissous induites par cette perturbation. Enfin, les conséquences d'une exploitation du milieu en pessière ou en hêtraie sont interprétées en fonction des perspectives d'évolution de la fertilité des sols.

Summary. *Hydrochemical behaviour of the experimental research basins of Mont-Lozère (France) and consequences of a forest harvest.* – Restoration of mountains lands initiated at the end of the XIXth century in the upper part of the granitic Tarn valley has changed the landscape and stopped erosion from the catchments. The initial land cover (mountain sheep grassland) was converted by a spruce plantation. This evolution has modified the biogeochemical cycles and then the water quality. The hydrochemical budgets of three catchments, 1/ spruce plantation, 2/ natural grassland and 3/ beech forest, present differences that are interpreted as consequences of the functioning of each ecosystem. The supply of solutes in output from the spruce catchment after a whole-tree harvest has been quantified. Finally, the consequences of planting the catchments with spruce or with beech are interpreted according to the possible evolution of the soil fertility.

Zusammenfassung. *Hydrochemische Mechanismen der Versuchseinzugsgebiete des Mont-Lozère (Frankreich) und Auswirkungen eines Forstschlags.* – Die seit Ende des 19. Jh. eingeleiteten Aufforstungsarbeiten im oberen Granitbecken des Tarn haben das Landschaftsbild geändert und die Hänge stabilisiert. Der Übergang von einer abgegrasteten Höhenweide zu Fichtenpflanzungen änderte die biogeochemischen Zyklen und somit ebenfalls die chemische Wasserzusammensetzung. Die hydrochemischen Bilanzen, die für drei Wassereinzugsgebiete mit einem Fichtenhain, einer Rasenfläche und einem nicht angelegten Buchenhain aufgestellt wurden, zeigen die Funktionsunterschiede dieser Milieus. Dank des Kahlschlags der Fichten ist es möglich, die zusätzlichen Verluste aufgelöster Produkte festzulegen, die durch diese Störung hervorgerufen werden. Die Auswirkungen einer Nutzung des Fichten- oder Buchenhainmilieus werden im Zusammenhang mit den Entwicklungsperspektiven der Bodenfruchtbarkeit interpretiert.

I - Introduction

La prise de conscience de l'état de dégradation des sols de montagne dans le midi de la France a conduit à d'intenses travaux de Restauration de Terrain de Montagne (R.T.M.) dès la fin du XIX^{ème} siècle (WEID 1911). Sur le Mont-Lozère, dans le haut bassin du Tarn, des plantations de pins à crochets (*Pinus montana* Mill.) ont été réalisées entre 1890 et 1910. Ces

opérations ont entraîné la cicatrization des ravines d'érosion et la production d'un humus relativement épais, ce qui a permis d'envisager une sylviculture résineuse. Celle-ci a pris son essor avec des plantations d'épicéas (*Picea abies* (L.) Karst) de 1925 à 1935, puis celles de divers résineux en association vers 1970. Ces forêts de résineux ont donc moins de 100 ans et correspondent en moyenne à une deuxième rotation qui s'est achevée au début des années 1990 avec des coupes importantes.

Afin d'apprécier l'impact des reboisements sur les stocks d'éléments nutritifs, les flux en solution sont mesurés depuis 1981 sur des bassins versants du Mont-Lozère (fig. 1). Ces recherches permettent de comparer les comportements hydrochimiques sous différentes couvertures végétales : hêtraie, pessière et pelouse (DUPRAZ 1984, DURAND 1989, DIDON-LESCOT 1996). Une coupe à blanc réalisée, de 1987 à 1989, sur le bassin versant couvert d'épicéas a en outre été mise à profit pour étudier les effets de cette perturbation (DIDON-LESCOT 1996).

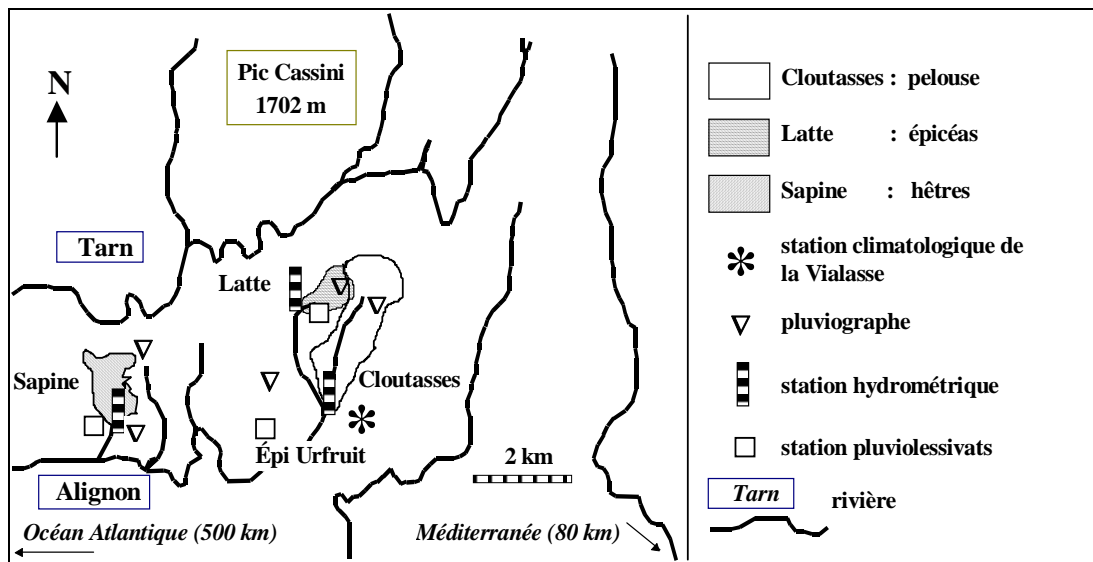


Figure 1 - Présentation du terrain d'étude.

Jusqu'en 1996, le BVRE du Mont-Lozère a été placé sous la responsabilité du Laboratoire d'Hydrogéologie puis du Laboratoire de Géologie de la Matière Organique de l'Université d'Orléans. Depuis 1997, il est piloté par un laboratoire de Géographie. Le présent article répond au souci du nouveau responsable d'effectuer la synthèse des connaissances disponibles sur les fonctionnements biogéochimiques et hydrochimiques, en vue d'établir un diagnostic sur les relations entre les pratiques agro-sylvo-pastorales et l'évolution du milieu. Il s'agit donc, à partir des informations déjà disponibles, qui résultent chacune d'une approche partielle des problèmes, d'aboutir à une vision d'ensemble d'un système considéré dans sa globalité. La démarche est à la fois périlleuse, car elle peut révéler des contradictions entre les différents résultats, et difficile, car la confrontation des informations atteint un grand niveau de complexité. Mais elle constitue la meilleure option pour dresser un état de la recherche qui puisse servir de base objective à la définition de recommandations pour la gestion du milieu. Au-delà de cette première attente, on peut bien sûr espérer qu'elle fournisse des enseignements sur les investigations à développer pour compléter utilement les connaissances.

II - Le terrain d'étude : présentation des bassins versants et des moyens d'investigation

Les recherches hydrochimiques sur le Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Mont-Lozère ont porté sur trois bassins de petite taille (fig. 1) : 19,5 ha pour le bassin de la Latte (épicéas), 54 ha pour le bassin de la Sapine (hêtres) et 81 ha pour celui des Cloutasses (pelouse pâturée).

Situé à 80 km de la Méditerranée, en exposition sud, à des altitudes comprises entre 1150 et 1500 m, le terrain d'étude subit un climat associant des caractères méditerranéens (pluies violentes, surtout en automne ; sécheresse estivale ; 2300 heures de soleil par an) et montagnards (précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 2000 mm sur la période 1981-98 ; valeurs annuelles comprises entre 1100 et 3500 mm, dont 10 à 25 % sous forme de neige ; température moyenne de 7 °C à 1300 m d'altitude).

Les bassins versants présentent un relief assez accusé. La pente moyenne des versants avoisine 12° sur le bassin de la Latte, 18° sur celui de la Sapine et 10° sur celui des Cloutasses.

Le substratum est constitué par le granite porphyroïde du Pont-de-Montvert à plagioclase de type oligoclase et à phénocristaux potassiques. Sa composition chimique en fait un granite calco-alkalin sur lequel se sont développés des sols qualifiés selon la classification française CPCS (DUCHAUFOR 1998) de rankers alpins, rankers cryptopodzoliques (bruns ou humifères) et sols bruns ocreux (DURAND 1989, VANNIER 1992). L'épaisseur des sols dépasse rarement 80 cm. Ils présentent généralement une texture sablo-limoneuse. Le taux de matière organique est élevé dans les horizons A. L'humus est de type moder. L'acidité des sols est un peu plus marquée sous pessière que sous hêtraie. Dans l'horizon A1, les pH-eau sont compris entre 4,2 et 4,8 sous les épicéas et entre 4,5 et 4,9 sous les hêtres. Quel que soit le couvert forestier, le complexe adsorbant est fortement désaturé en cations basiques, mais la désaturation est plus poussée sous hêtraie. Dans les horizons de surface (0-20 cm), le taux de saturation moyen avoisine 11 % sous pessière, contre 6 % sous hêtraie.

Avant leur coupe, à l'âge de 60 ans, les épicéas du bassin de la Latte constituaient – sur 16,8 ha (la superficie restante étant essentiellement couverte par une lande à genêt (*Cytisus purgans*, L.) Benth. et *Sarothamnus scoparius* L.) – une forêt peu dense (390 sujets/ha, dont 85 % d'épicéas et 15 % de pins à crochets) et peu productive (biomasse de 113 t/ha de matière sèche) qui a fait l'objet d'éclaircies en 1946 et en 1974-76. En 1989, après raclage et mise en andains des rémanents, le bassin a été reboisé avec différentes essences résineuses (*Picea abies*, (L.) Karst., *Pinus montana*, Mill., *Abies alba*, Mill., *Larix decidua* L.). Dans le bassin de la Sapine, la hêtraie (*Fagus silvatica*, L.), dont l'âge moyen avoisine celui de la pessière du bassin de la Latte, couvre près de 85 % de la surface. Il s'agit d'un taillis dense (4000 tiges/ha) dont la biomasse sur pied est estimée à 332 t/ha de matière sèche (HANCHI 1994). Ce taillis s'est progressivement constitué à la suite de l'abandon des activités humaines au début du XX^{ème} siècle, par colonisation spontanée des versants à partir de quelques arbres localisés en fond de vallon. Il est associé à une lande à callune (*Calluna vulgaris* L.) et à myrtille (*Vaccinium myrtillus* L.). Le bassin de pelouse [nard (*Nardus stricta* L.), fétuque (*Festuca rubra*), canche (*Deschampsia flexuosa* L.)] est parcouru par un troupeau transhumant de juin à septembre et il est partiellement écobué tous les 5 à 7 ans. La biomasse de la hêtraie de la Sapine se place dans la fourchette des données rapportées par la littérature (DUVIGNEAUD *et al.* 1971, ULRICH *et al.* 1974, HALLBACKEN 1992). Celle de la pessière de la Latte (DIDON-

LESCOT 1996) se révèle, en revanche, particulièrement faible (NIHLGARD 1972, NYS *et al.* 1983, FEGER *et al.* 1990, LE GOASTER *et al.* 1991, *etc.*).

L'évaluation des biomasses a été menée selon la méthode de BASKERVILLE (1965), qui exploite les relations liant les différents éléments de la biomasse des arbres (aiguilles ou feuilles, branches, tronc, écorce et racines) au diamètre des troncs à une hauteur de 1,30 m. Les régressions ont été établies à partir des observations effectuées sur 10 hêtres et sur 8 épicéas. Le calcul des biomasses a été mené à partir du dénombrement exhaustif des peuplements forestiers de chacun des bassins. La majeure partie des analyses chimiques destinées à l'évaluation des minéralomasses ont été réalisées au CEFÉ (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive) de Montpellier : azote (méthode KJELDAHL), calcium, magnésium, potassium, sodium (spectroscopie d'absorption atomique) et phosphore (colorimétrie), après minéralisation par voie humide à chaud aux acides nitrique et perchlorique d'un gramme de matière sèche (RAPP 1971). Le soufre a été dosé par spectrométrie d'émission atomique (torche à Plasma ICP) au Laboratoire de Géochimie de la Matière Organique d'Orléans. HANCHI (1994) évalue à ± 15 % le degré d'imprécision sur les minéralomasses.

L'équipement de base du BVRE comporte au total cinq pluviographes et, pour chaque bassin, un limnigraphe implanté au niveau d'un seuil artificiel présentant une section rectangulaire échancrée d'un déversoir triangulaire pour le suivi des basses et moyennes eaux. Ce dispositif fournit les données pluviométriques et hydrométriques nécessaires à l'établissement des bilans hydrochimiques "entrées - sorties" (LELONG *et al.* 1990). Les apports atmosphériques en terrain découvert (dépôts secs et humides) ont été collectés au moyen d'un entonnoir de 315 cm² d'ouverture relié à un bidon de stockage (matériels en PVC) à la station climatologique de La Vialasse (altitude : 1290 m) de 1981 à 1994 et sur chaque bassin de 1989 à 1994. Les pluviolessivats ont été mesurés de 1986 à 1994 sur les deux bassins forestiers : pour l'égouttement, au moyen de 6 à 12 collecteurs identiques à ceux utilisés pour les pluies incidentes et, pour l'écoulement le long des troncs, avec des collerettes de caoutchouc souple placées à une hauteur de 1,30 m (1 arbre équipé sous la pessière, 10 sous la hêtraie). En outre, pour s'affranchir des effets de lisière induits par la coupe des arbres sur le bassin de la Latte, l'égouttement a été étudié, à l'aide d'un dispositif similaire, dans une forêt d'épicéas distante de 2 km (Urfruits) de 1987 à 1992 (DIDON-LESCOT, 1998). Les échantillons d'eau de pluie, de pluviolessivat et de ruisseau ont été récoltés selon un pas de temps variable permettant de disposer de prélèvements pour chaque épisode. Les apports par les pluies et les flux dans les pluviolessivats sont déterminés en multipliant les concentrations dans chaque échantillon analysé par la hauteur d'eau correspondante. Les exportations en solution des ruisseaux sont calculées en considérant que chaque échantillon analysé est représentatif d'une phase particulière (montée de crue, décrue) d'une période hydrologique donnée (DIDON-LESCOT 1996). Les dosages ont été le plus souvent effectués par absorption atomique (Ca²⁺, Mg²⁺), photométrie de flamme (K⁺, Na⁺), colorimétrie (SiO₂, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻), turbidimétrie (SO₄²⁻) et volumétrie (alcalinité, en utilisant la fonction de GRAN). En 1989-90 et 1990-91, les cations basiques ont été dosés par spectrométrie d'émission atomique. De 1990 à 1993, les eaux très colorées (essentiellement des pluviolessivats) ont fait l'objet d'un dosage du sulfate par spectrométrie d'émission atomique. Les ions sulfate, chlorure et nitrate ont été mesurés par électrophorèse capillaire à partir de 1993.

Selon DUPRAZ (1984) et DURAND (1989), les évaluations des entrées en terrain découvert et des exportations par les ruisseaux présentent un risque d'erreur de 10 % pour le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium, de 15 % pour le sulfate, et de 20 % pour l'ammonium et le nitrate. Les flux de chlorure seraient connus à ± 20 % pour les entrées et à

$\pm 10 \%$ pour les sorties. La qualité des évaluations a peut-être été un peu surestimée pour les entrées, car la modestie des concentrations comme la variabilité spatiale des hauteurs d'eau précipitées et de la composition chimique des eaux de pluie ne rendent pas la tâche très facile. De plus, la composition chimique des eaux de pluie n'a été mesurée qu'à partir de janvier 1989 sur le bassin de la Latte et de juillet 1992 sur celui de la Sapine, ce qui oblige à des extrapolations à partir des concentrations dans les eaux recueillies à la Vialasse. En ce qui concerne les sorties, on notera que les prélèvements dans les ruisseaux ont été effectués à un rythme identique sur tous les bassins versants et que les échantillons prélevés à une date donnée ont toujours été analysés en même temps. Les comparaisons entre les bilans "entrées - sorties" des différents bassins versants sont donc significatives pour des écarts inférieurs aux intervalles de confiance sur les mesures. Enfin, DURAND (1989) considère que les incertitudes sur les flux sous couvert végétal (pluiolessivats) atteignent au moins 25 %.

III - Les exportations en solution avant la coupe

Les eaux des ruisseaux ont une charge minérale toujours très faible. Sur les trois bassins versants, cette charge est dominée par le calcium et le sodium pour les cations (68 à 77 % des cations basiques), le sulfate et le chlorure pour les anions (94 à 99 % des anions). Alors que les pluies ont, en moyenne, un pH voisin de 4,7, les ruisseaux présentent généralement des valeurs comprises entre 5,5 et 6,0. Le pH moyen des eaux de pluie se place en position intermédiaire entre les valeurs obtenues dans les Vosges (4,5), où la pollution atmosphérique engendre des pluies acides (PROBST *et al.* 1990), et dans le massif des Maures (5,2), où les effets acidifiants de la pollution atmosphérique se trouvent en partie compensés par les cations basiques fournis par des poussières d'origine saharienne ou en provenance de la Provence calcaire (MARTIN 1996).

Les bilans hydrochimiques "entrées - sorties" présentés dans le tableau 1 ont été établis à partir des entrées mesurées dans les collecteurs d'eau de pluie en terrain découvert. Ces bilans mettent en évidence les effets de l'altération des roches (pertes importantes de silice et de sodium). Pour le calcium, le magnésium et le potassium, les pertes nettes (e - s) sont minimales pour le bassin de la Sapine (hêtres), lequel enregistrerait même une accumulation de calcium et de potassium. Les pertes nettes en magnésium sont maximales pour le bassin de la Latte, celles en calcium et en potassium, pour le bassin des Cloutasses. Sur les trois bassins versants, les exportations de sulfate et de chlorure sont inférieures aux entrées. Les données disponibles montrent qu'il en est de même pour l'ammonium (entrées annuelles moyennes à la station de la Vialasse sur les années 1984-85 à 1986-87 : 9,52 kg/ha ; exportations en solution du bassin versant de la Latte : 0,24 kg/ha). Banale en ce qui concerne l'ammonium (en raison de l'intervention des cycles biogéochimiques de l'azote qui appauvrissent les eaux en cet élément), cette observation s'expliquerait pour le sulfate par la très forte potentialité de rétention offerte par les constituants organiques et minéraux des profils pédologiques (GUILLET *et al.* 1994), mais elle reste surprenante pour le chlorure, qui a la réputation de ne rencontrer aucun piège géochimique efficace.

IV - La question des pluiolessivats

Les collecteurs en terrain découvert constituant des pièges à aérosols et à poussières sèches beaucoup moins efficaces que le couvert végétal, des recherches ont été réalisées sur le Mont-Lozère pour préciser les modifications de la composition chimique des eaux et des flux de produits dissous à travers la canopée. En effet, l'étude des flux d'éléments minéraux doit

Tableau 1 -Bilans hydrochimiques annuels moyens (kg/ha) sur la période juillet 1981 - juin 1987.

Cloutasses	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1 883		0,90 *	12,3	2,25	2,78	12,8	8,41	–	22,1	–	56,8
sorties		1 470	36,1	15,7	4,43	4,37	16,2	–	–	17,2	–	42,0
e - s			-35,2	-3,37	-2,18	-1,59	-3,38	–	–	+4,83	–	+14,8
Latte	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1 880		0,87 *	13,9	2,48	2,65	13,9	9,27	–	24,4	–	60,1
sorties		1 253	34,8	17,1	6,52	3,67	16,1	–	–	20,9	–	50,9
e - s			-34,0	-3,21	-4,04	-1,01	-2,18	–	–	+3,51	–	+9,25
Sapine	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1 761		0,91 *	12,3	2,19	3,28	11,4	7,13	–	19,9	–	51,7
sorties		1 173	33,9	9,67	3,62	2,56	13,8	–	–	16,6	–	36,2
e - s			-33,0	+2,67	-1,43	+0,72	-2,44	–	–	+3,24	–	+15,5

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulee (mm). e : entrées en solution dans les collecteurs (kg/ha/an). s : exportations en solution du bassin versant (kg/ha/an). * : quelques mesures manquantes. – : mesures en nombre insuffisant.

inclure l'ensemble des apports atmosphériques les plus facilement quantifiables (PROBST *et al.* 1995). A ce sujet, il convient d'ajouter que pour le carbone, l'azote et le soufre, des échanges se réalisent sous forme gazeuse entre l'atmosphère et le bassin versant, au niveau du couvert végétal et dans les sols. Ces échanges expliquent notamment l'excès des sorties de bicarbonate par rapport aux entrées de cet élément dans les bilans hydrochimiques des bassins versants sur roches cristallines.

Le tableau 2 résume les données recueillies à la station de mesure des pluviollessivats de la Sapine (hêtraie), où étaient disposés 10 collecteurs à entonnoir pour l'égouttement et 10 collecteurs pour l'écoulement le long des troncs, et à celle des Épi Urfruits (pessière), dont l'équipement comportait 4 à 6 collecteurs à entonnoir selon les années. Les observations effectuées à la station de la Latte, dans la situation particulière d'une lisière de forêt (DIDON-LESCOT 1996), ont été écartées. Elles ont cependant permis d'estimer que l'écoulement le long des troncs des épicéas (un seul collecteur installé, sur un arbre jugé représentatif) représente moins de 1 % des arrivées d'eau au sol. Cette valeur se place parmi les plus faibles trouvées pour cette essence et pour les résineux en général (JOHNSON 1990, CAPE *et al.* 1991, HUMBERT & NAJJAR 1992).

A la station de la Sapine, sur la période 1991-94, la valeur moyenne du pH passe de 4,87 dans les pluies incidentes à 5,36 dans les eaux d'écoulement le long des troncs et à 5,16 dans les eaux d'égouttement. Les différences entre les flux de produits dissous dans les pluies incidentes et les pluviollessivats restent modestes. En règle générale, l'accroissement des flux à travers le couvert végétal résulte de l'excrétion par les feuilles, en particulier pour le potassium, mais aussi pour le calcium et pour le magnésium (NYE 1961, RAPP 1969, DAMBRINE *et al.* 1995, ULRICH *et al.* 1995), et du lavage de dépôts "secs" (ERICKSON 1960, CLARIDGE 1970, LOVETT & LINDBERG 1984). Les dépôts "secs" se subdivisent en aérosols marins (riches en sodium et en chlorure) et en poussières continentales. Les données concernant le chlorure et le sodium indiquent qu'il n'y a pas d'entrées "sèches" de ces éléments à la station de la Sapine. Les poussières continentales peuvent avoir soit une provenance extérieure au terrain d'étude, qu'elles aient été produites par les activités industrielles et

Tableau 2 - Flux d'éléments dissous annuels moyens (kg/ha) dans les pluies et les pluviollessivats aux stations de la Sapine (hêtraie) et des Epi Urfruits (pessière).

Sapine 1991-94	H(mm)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Pi	1944	16,7	2,43	3,48	12,8	6,78	11,6	22,3	25,2	48,7
Eg	1291	13,7	2,22	15,8	9,16	3,84	21,3	17,0	17,5	38,6
Ec	316	3,80	0,65	4,48	2,44	0,71	5,28	4,82	2,48	12,4
(Eg+Ec)-Pi	-337	+0,83	+0,44	+16,8	-1,15	-2,23	+14,9	-0,40	-5,23	+2,33
Epi Urfruits 1987-92	H(mm)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Pi	1623	15,7	2,36	4,32	13,3	6,65	8,87	22,7	22,9	51,0
Eg	1160	29,2	6,22	34,2	21,6	8,33	4,05	46,0	46,0	105
Eg-Pi *	-463	+13,5	+3,86	+29,9	+8,33	+1,68	-4,83	+23,3	+23,1	+54,1

Pi : pluies incidentes. Eg : égouttement sous le couvert végétal. Ec : écoulement le long des troncs. H : hauteur d'eau (mm). * : l'écoulement le long des troncs n'a pas été mesuré, mais les observations effectuées à la station de la Latte permettent de le considérer comme négligeable.

agricoles (apports d'azote, de soufre et de potassium – GALLOWAY *et al.* 1982) ou qu'il s'agisse d'éléments minéraux d'origine naturelle (par exemple des poussières sahariennes qui libèrent beaucoup de calcium – LOYE-PILOT *et al.* 1986, AVILA *et al.* 1997), soit une provenance locale qui constitue un simple recyclage. Pour l'ammonium et le nitrate, les diminutions observées à la station de la Sapine s'expliquent par l'absorption par les plantes au niveau foliaire et par le rôle de la flore épiphyte (RAPP 1969, LOVETT 1992). La diminution des concentrations en ces éléments est du reste à l'origine de l'augmentation du pH entre la pluie incidente et les pluviollessivats (PARKER 1983, FUHRER & SLANINA 1987).

A la station des Epi Urfruits, sur la période 1987-92, le pH évolue peu entre la pluie (4,73 en moyenne) et les eaux d'égouttement (4,70 – sur la même période, les valeurs moyennes atteignent respectivement 4,81 et 4,87 à la station de la Sapine). En revanche, les flux de produits dissous augmentent de façon considérable. Certes les caractères morphologiques des épicéas sont favorables à une forte captation des aérosols et des poussières sèches, mais il est impossible d'accepter l'hypothèse d'entrées importantes non mises en évidence par les collecteurs en terrain découvert, sans déséquilibrer encore plus les bilans "entrées - sorties" de chlorure. Du reste, nous verrons dans le paragraphe suivant que le rapport entre les sorties de chlorure sur les périodes 1987-94 et 1981-87 (s2/s1 – voir tab. 3) est identique, voire légèrement plus fort, pour le bassin versant de la Latte (1,01) par rapport à ceux de la Sapine (0,999) et des Cloutasses (0,97), ce qui tend à prouver que la disparition des épicéas n'a pas diminué les apports de cet élément. Il semblerait donc qu'il faille attribuer l'augmentation de certains flux dans les pluviollessivats sous épicéas au fonctionnement des cycles biogéochimiques et aux modalités du transfert des eaux et des éléments minéraux à travers la canopée.

V - Les exportations en solution après la coupe

En relation avec la coupe et la revégétalisation ultérieure du bassin, la minéralisation des eaux du ruisseau de la Latte augmente fortement de 1987 à 1991 puis amorce une décroissance régulière (fig. 2). De leur côté, les ruisseaux de la Sapine (hêtraie) et des Cloutasses (pelouse) ne montrent pas d'évolution significative. L'accroissement des exportations en solution du bassin de la Latte est particulièrement net pour le calcium et le nitrate (tab. 3 ; fig. 3). En supprimant la consommation d'éléments minéraux par la végétation

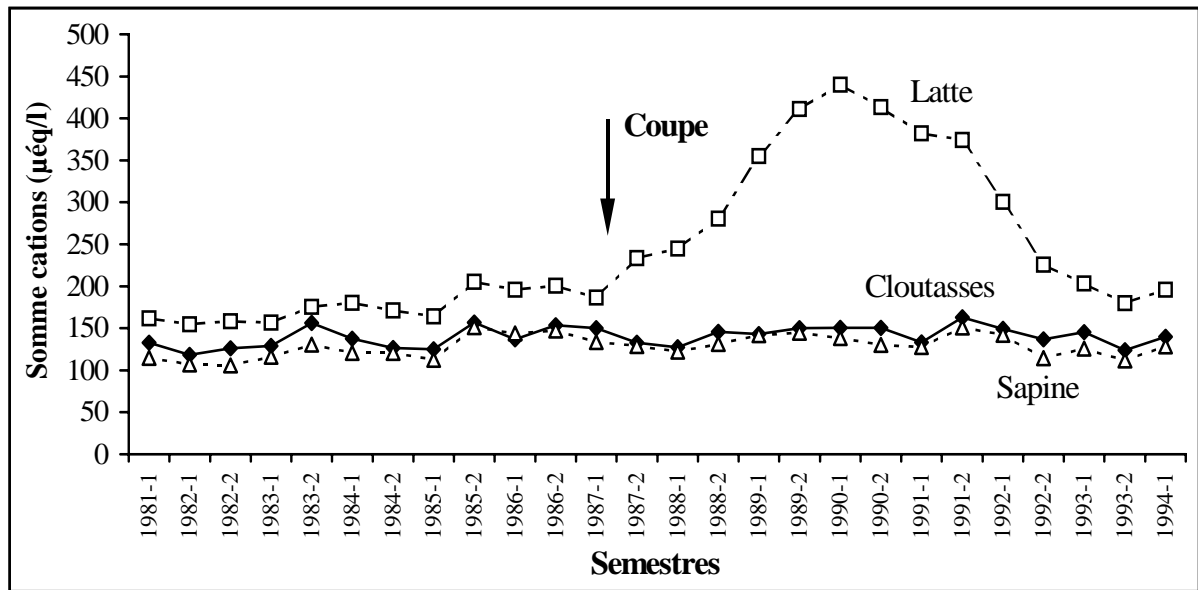


Figure 2 - Valeurs moyennes semestrielles de la somme des cations basiques ($\mu\text{eq./l}$) dans les eaux des ruisseaux des Cloutasses, de la Latte et de la Sapine.

Tableau 3 - Bilans hydrochimiques annuels moyens (kg/ha) sur la période juillet 1987 - juin 1994.

Cloutasses	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1833		1,15 *	15,9	2,43	3,7	13,8	7,72	8,34	23,2	30,0	53,6
sorties		1296	32,5	14,0	4,01	3,61	15,6	0,49	20,4	16,7	8,33	38,7
e - s			-31,4	+1,99	-1,57	+0,06	-1,83	+7,23	-12,1	+6,48	+21,7	+14,9
s2/s1			0,90	0,89	0,90	0,83	0,96	-	-	0,97	-	0,92
Latte	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1797		1,10 *	17,7	2,63	3,43	14,7	8,34	6,93	25,2	34,3	54,7
sorties		1241	37,8	30,7	11,2	5,23	19,6	0,45	8,07	21,0	122	40,1
e - s			-36,7	-13,0	-8,57	-1,80	-4,96	+7,89	-1,15	+4,18	-88,2	+14,6
s2/s1			1,08	1,80	1,72	1,43	1,22	-	-	1,01	-	0,79
Sapine	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1727		1,17 *	16,1	2,38	4,45	12,3	6,59	12,8	21,0	20,8	48,2
sorties		1060	32,4	8,84	3,32	1,85	13,7	0,30	10,0	16,6	0,72	33,8
e - s			-31,2	+7,30	-0,93	+2,60	-1,40	+6,28	+2,77	+4,44	+20,1	+14,4
s2/s1			0,96	0,91	0,92	0,72	0,99	-	-	1,00	-	0,94

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulee (mm). e : entrées en solution dans les collecteurs (kg/ha/an). s : exportations en solution du bassin versant (kg/ha/an). HCO₃⁻ : alcalinité exprimée sous forme d'ions bicarbonates. s2/s1 : sorties sur la période 1987-94 / sorties sur la période 1981-87. * : quelques mesures manquantes. - : mesures en nombre insuffisant.

et en laissant sur place une masse considérable de débris végétaux, la coupe forestière a favorisé l'exportation en solution des éléments nutritifs (ROSEN & LUNDMARK-THELIN 1987, FAHEY *et al.* 1991). L'abondance dans les eaux de drainage du nitrate produit en grande quantité par la minéralisation de la matière organique, a du reste permis – par équilibrage des charges ioniques positives et négatives – un fort entraînement des cations basiques : les

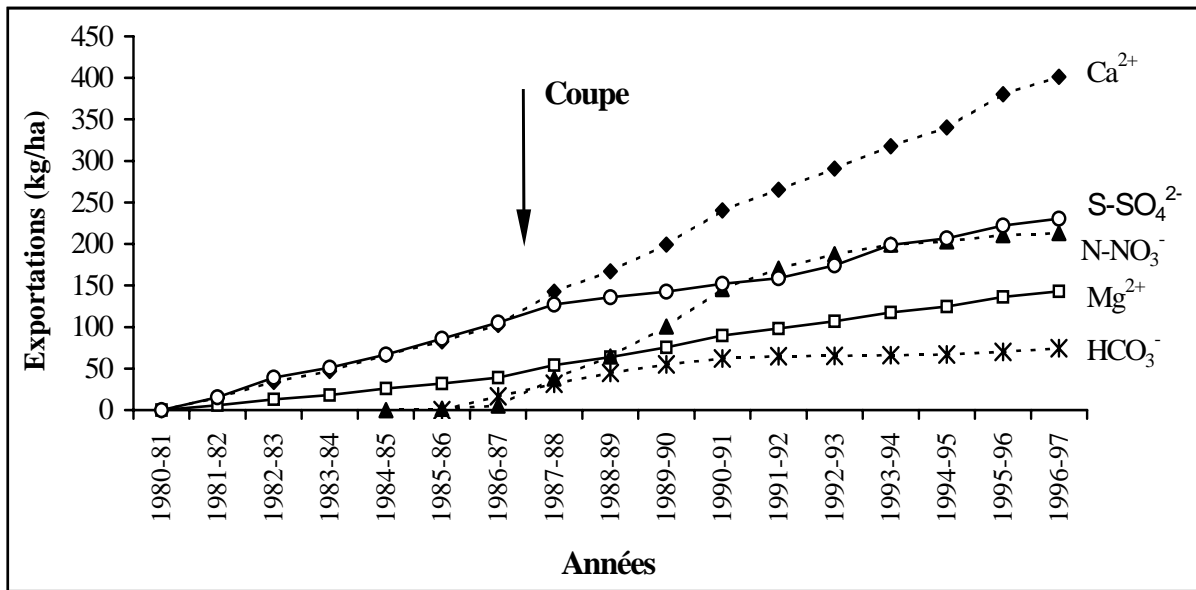


Figure 3 - Exportations en solution cumulées (kg/ha) de calcium, de magnésium et d'azote nitrique du bassin versant de la Latte.

rapports entre les valeurs des exportations de ces éléments sur les périodes 1987-94 et 1981-87 (s_2/s_1) sont compris entre 1,22 (sodium) et 1,80 (calcium) ; alors qu'ils ne dépassent pas 0,99 dans le cas des bassins de la Sapine et des Cloutasses (minimum de 0,72 pour le potassium dans le bassin de la Sapine).

Les sorties de sulfate du bassin de la Latte apparaissent plus fortes sur la période 1981-87 que sur la période 1987-94 ($s_1/s_2 = 0,79$; contre 0,92 et 0,94 pour les autres bassins). La diminution des sorties après la coupe pourrait être due à l'abondance des débris végétaux laissés sur place, lesquels auraient joué le rôle d'un apport organique favorable à l'immobilisation du soufre sous forme de composés organiques (CONESA *et al.* 1979). Toutefois l'essentiel de la diminution a été concentré sur l'année 1988-89, bien que les opérations de coupe se soient prolongées jusqu'à fin 1989. A partir de 1990-91, les exportations de sulfate sont devenues supérieures à ce qu'elles étaient avant la coupe. Leur accroissement, en compensant en partie l'abaissement des sorties de nitrate qui s'est amorcé en 1991-92 (fig. 3), a permis le maintien des exportations de calcium à un niveau élevé.

Sur la période 1987-94, les sorties de bicarbonate du bassin de la Latte ont été inférieures à celles des autres bassins (8,07 kg/ha/an en moyenne ; contre 20,4 kg/ha/an sur le bassin des Cloutasses et 10,0 kg/ha/an sur celui de la Sapine). Nous disposons de très peu de données avant la coupe (premier semestre 1986 et année 1986-87), mais les exportations de cet élément ont manifestement subi, sur le bassin de la Latte, un net fléchissement après la fin de la coupe et tout particulièrement à partir de 1991-92 (fig. 3) : alors qu'elles avoisinaient 15 kg/ha/an sur la période 1986-89, elles n'ont pas dépassé 3,0 kg/ha/an de 1991-92 à 1995-96. Cette évolution ne se retrouve pas sur les bassins des Cloutasses et de la Sapine.

La coupe a exercé une légère influence sur les exportations de silice ($s_2/s_1 = 1,08$; contre 0,90 et 0,96 pour les autres bassins). En revanche, son impact a été pratiquement nul pour le chlorure ($s_2/s_1 = 1,01$; contre 0,97 et 1,00 pour les autres bassins).

De juillet 1987 à juin 1994, les entrées moyennes de calcium et de magnésium sont sensiblement plus élevées que sur la période d'étude précédente. Cet accroissement des entrées, combiné à une légère diminution des exportations liée à des écoulements moins abondants, se traduit par une accumulation nette de calcium sur les bassins versants de la Sapine (+ 7,30 kg/ha/an) et des Cloutasses (+ 1,99 kg/ha/an). Les pertes nettes de cet élément subies par le bassin de la Latte à la suite de la coupe à blanc des épicéas (- 13,0 kg/ha/an) n'en sont que plus significatives.

Le pH moyen des eaux du ruisseau de la Latte s'établit à 5,53 sur la période 1987-94, contre 5,83 pour le ruisseau des Cloutasses et 5,76 pour celui de la Sapine. De juillet 1986 à août 1987, seule année avant la coupe pour laquelle nous disposons de mesures de ce paramètre, les valeurs moyennes s'élèvent respectivement à 5,86, 5,84 et 5,88. La coupe à blanc des épicéas du bassin versant de la Latte pourrait donc avoir provoqué un léger abaissement du pH des eaux du ruisseau, sans doute en relation avec la nitrification de l'azote organique disponible (ADAMSON *et al.* 1987). Cette hypothèse est confortée par les mesures effectuées au cours du premier semestre 1986 (valeur moyenne de 5,89 pour le ruisseau de la Latte, contre 5,66 pour celui de la Sapine). A partir de 1995-96, les eaux du ruisseau de la Latte ont présenté un pH plus élevé que celui des eaux du ruisseau de la Sapine (fig. 4) : valeurs moyennes de 5,94 contre 5,79 sur le deuxième semestre 1995, de 5,91 contre 5,81 sur le premier semestre 1997, et de 6,15 contre 5,98 sur le deuxième semestre 1997.

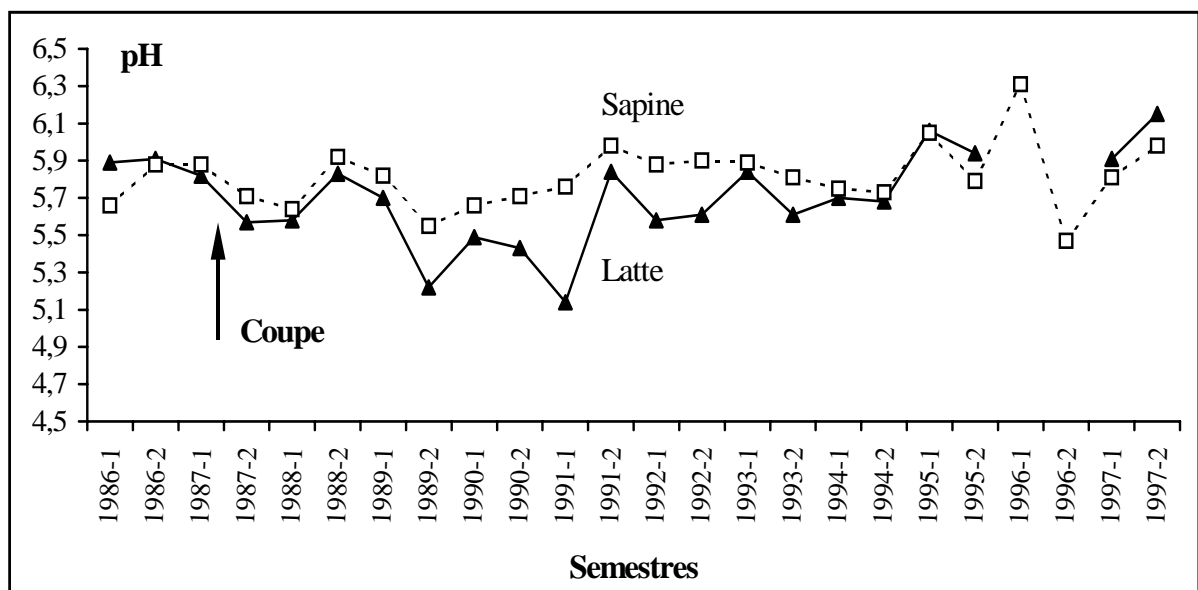


Figure 4 - Valeurs moyennes semestrielles du pH dans les eaux des ruisseaux de la Latte et de la Sapine (janvier 1986 - décembre 1997).

VI - Quantification de l'impact de la coupe

Le calcul des pertes d'éléments minéraux directement liées à la coupe des épicéas du bassin versant de la Latte, nécessite d'estimer les exportations qu'aurait subies le bassin versant sans la coupe. Pour répondre à cet objectif, nous avons étudié les relations existant, sur la période 1981-87, entre, d'une part, les exportations annuelles du bassin de la Latte et, d'autre part, les précipitations sur ce bassin et les exportations du bassin de la Sapine. Les régressions les plus satisfaisantes s'établissent entre les exportations des deux bassins :

coefficients de régression compris entre 0,938 (chlorure) et 0,992 (sodium). Toutefois, pour l'ammonium et le nitrate, pour lesquels les données sont peu nombreuses, nous devons nous contenter des relations avec les précipitations, établies à partir de deux années d'observation seulement (1985-86, précipitations sur le bassin de la Latte : 1483 mm, et 1986-87, précipitations : 1936 mm). Enfin, pour le bicarbonate, nous disposons seulement du rapport entre les exportations des bassins de la Latte et de la Sapine établi sur trois semestres (de janvier 1986 à juin 1987). Les données obtenues en appliquant ces différentes relations sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 - Comparaison des exportations en solution annuelles moyennes (kg/ha) mesurées (M) sur le bassin versant de la Latte pour les périodes 1987-94 et 1987-97 avec les valeurs calculées (C) sur les mêmes périodes à partir de régressions établies avant la coupe des épicéas.

1987-94	P (mm)	L (mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
M1	1797	1241	37,8	30,7	11,2	5,23	19,65	0,45	8,07	21,0	122	40,1
C1		1206	33,3	15,7	5,96	2,66	16,0	0,38	13,0	20,9	14,2	47,6
C1 - M1			-4,42	-15,0	-5,24	-2,58	-3,65	-0,07	+4,90	-0,14	-108	+7,56
T1			-31,0	-105	-36,7	-18,05	-25,5	-0,49	+34,3	-0,98	-758	+52,9
1987-97	P (mm)	L (mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
M2	2040	1471	–	29,8	10,4	5,49	19,3	–	–	20,3	91,8	37,5
C2		1343	–	18,9	6,75	3,71	18,1	–	–	23,1	20,0	58,5
C2 - M2			–	-11,0	-3,65	-1,78	-1,18	–	–	+2,79	-71,8	+21,0
T2			–	-110	-36,5	-17,8	-11,8	–	–	+27,9	-719	+210
1994-97			SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
T2 - T1			–	-4,76	+0,17	+0,18	+13,8	–	–	+29,0	+39,7	+157

P : précipitations annuelles moyennes (mm). L : lame d'eau écoulee annuelle moyenne (mm). M : exportations en solution mesurées (kg/ka/an). C : valeurs calculées, attendues sans la coupe des épicéas (kg/ha/an). T : pertes totales liées à la coupe sur la période considérée [T, en kg/ha = (C - M) x nombre d'années]. – : données manquantes.

Ce tableau met en évidence l'importance des pertes en cations basiques et en nitrate au cours des sept premières années (1987-94) après le début de la coupe, et un ralentissement très net des pertes liées à la coupe entre les périodes 1987-94 et 1994-97. Pour le sodium et le chlorure, la valeur algébrique de la différence entre les valeurs mesurée et calculée est plus forte sur la période 1987-94 que sur la période 1987-97, ce qui montre que les exportations mesurées au cours de la période 1994-97 ont dépassé les estimations fournies par le calcul (T2 - T1 = +13,8 kg/ha pour Na⁺ et +29,0 kg/ha pour Cl⁻). Toutefois, pour des éléments aussi mobiles, cette évolution pourrait simplement résulter d'une diminution du rapport entre les entrées sur les bassins versants de la Latte et de la Sapine au cours des années 1994-97 (la durée trop courte des périodes pendant lesquelles les entrées sur ces deux bassins versants ont été mesurées sur site, ne permet pas de conclure). On retiendra, en tout cas, que les conséquences de la coupe ont été moins sensibles pour le sodium que pour les autres cations basiques et qu'elles ont été négligeables pour le chlorure. Par ailleurs, la diminution relative des sorties de sulfate, déjà marquée immédiatement après la coupe, s'accroît encore sur la période 1994-97.

Entre 1994 et 1997, les pertes totales liées à la coupe subissent une très légère

augmentation pour le calcium ($T2 - T1 = -4,76 \text{ kg/ha}$), restent stables pour le magnésium ($T2 - T1 = +0,17 \text{ kg/ha}$) et le potassium ($T2 - T1 = +0,22 \text{ kg/ha}$), et diminuent pour le nitrate ($T2 - T1 = +38,7 \text{ kg/ha}$).

En 1996-97, les exportations mesurées du calcium (M) avoisinent les exportations qui auraient été attendues sans la coupe (C) : 20,9 contre 21,1 kg/ha. En revanche, pour le nitrate, les exportations mesurées en 1996-97 atteignent seulement 9,39 kg/ha, alors que la valeur qui aurait été attendue sans la coupe s'élève à 25,7 kg/ha. Pour cet élément, il semble donc qu'après l'activation brutale des exportations en solution qui s'est manifestée après la coupe, le comportement du bassin versant de la Latte se soit ensuite rapproché, au moins provisoirement, de celui des bassins des Cloutasses et de la Sapine. L'interprétation doit cependant rester prudente en raison du petit nombre de données sur lequel s'appuie la simulation des exportations de nitrate qui se seraient produites sans la coupe.

VII - *Le fonctionnement des bassins versants*

Les bilans hydrochimiques "entrées - sorties" montrent un déséquilibre pour le chlorure (tab. 1 et 3). Les écarts se situent dans la fourchette correspondant aux erreurs possibles sur les mesures, mais ils font peser une incertitude sur l'interprétation des données hydrochimiques. Le problème étant constant sur une longue période, seules des erreurs systématiques peuvent être envisagées pour l'expliquer :

- La première concerne la mesure des précipitations. Toutefois, sur la période 1981-94, les écarts entre les cumuls de précipitations fournis par les pluviographes du BVRE atteignent au maximum 13,4 % de la moyenne des pluies reçues par les cinq postes. De plus, on sait que les pluviographes, comme les pluviomètres, sous-estiment généralement les hauteurs de pluie (REMENIERAS 1980). La mesure des précipitations ne saurait donc avoir qu'une incidence mineure.
- La deuxième porte sur l'hétérogénéité spatiale de la composition chimique des eaux de pluie. Son rôle pourrait être sensible sur le plus grand des bassins versants étudiés, celui des Cloutasses, mais il pourrait également se faire sentir sur les bassins de la Latte et de la Sapine pour les années où les eaux de pluie n'y ont pas été collectées. Les concentrations de chlorure attribuées aux eaux de pluie du bassin la Latte sont plus fortes que celles mesurées dans les eaux recueillies à la station de la Vialasse (rapport = 1,139) et au collecteur de la Sapine (rapport = 1,152). Si une surestimation des entrées de chlorure sur le bassin de la Latte ne peut donc pas être exclue, il reste qu'une erreur sur la concentration du chlorure dans les eaux du collecteur de la Latte n'altérerait que modestement l'estimation des entrées sur le bassin des Cloutasses, les collecteurs de la Latte et de la Vialasse intervenant respectivement pour 20 et 80 % dans le calcul de la composition chimique des eaux précipitées sur ce bassin versant.
- La troisième envisage la sous-estimation des lames d'eau écoulées, qu'elle résulte de l'utilisation de courbes de tarage de qualité insuffisante ou de l'évacuation d'eau hors des limites apparentes des bassins – têtes de vallon artificiellement limitées vers l'aval – par le biais de circulations se produisant au niveau des versants situés de part et d'autre des limnigraphes. Pour appuyer cette hypothèse, on constate que le déficit d'écoulement (précipitations - lame d'eau écoulee) annuel moyen des bassins versants de la Latte et de la Sapine (607 et 631 mm sur la période 1981-94) avoisine ou dépasse légèrement l'ETP Turc à la station de la Vialasse (615 mm sur la période 1985-94). Toutefois le bassin versant des Cloutasses, sur lequel le déficit des exportations de chlorure est le plus fort, présente le déficit d'écoulement le plus faible (480 mm).

- La dernière prend en compte les difficultés que l'on peut rencontrer dans l'analyse d'eaux très faiblement minéralisées. Les données sur les entrées montrent des rapports Na^+/Cl^- très proches pour les trois bassins versants (0,58 à 0,59 sur la période 1981-94 – en utilisant les concentrations moyennes en mg/l) et supérieurs à la valeur trouvée dans l'eau de mer (0,55), ce qui ne plaide pas en faveur d'une surestimation des concentrations de chlorure dans les eaux de pluie. En 1993-94, l'utilisation de l'électrophorèse capillaire pour le dosage du chlorure n'a pas eu d'influence sur la valeur du rapport Na^+/Cl^- mesuré dans les eaux de pluie : 0,59 à la station de la Vialasse sur l'année 1993-94 comme sur la période 1981-94. Il est en outre impossible d'affirmer que les rapports entre les sorties de sodium et de chlorure aient été sensiblement modifiés par ce changement de technique d'analyse, même si, pour le bassin des Cloutasses par exemple, la valeur de ce rapport en 1993-94 (0,836) est la plus faible jamais enregistrée (0,838 à 1,05 sur la période 1981-93).

En définitive, les incertitudes sur les sorties de chlorure sont trop importantes pour que des corrections aux bilans hydrochimiques puissent être menées, pour d'autres éléments, à partir du déséquilibre entre les entrées et les sorties de chlorure (DIDON-LESCOT & MARTIN 2000).

1) Le bassin de la Latte

Pour la période 1981-94, le bilan hydrochimique annuel moyen "entrées - sorties" correspondant au fonctionnement avant coupe est établi (tab. 5) en utilisant, d'une part, les exportations mesurées de 1981 à 1987 (tab. 1) et, d'autre part, celles calculées à partir des données du bassin versant de la Sapine – en appliquant les régressions établies sur la période avant coupe – pour la période 1987-94 (tab. 4). Les résultats portent sur l'ensemble du bassin versant (19,5 ha) et non sur la seule partie sous épicéas (16,8 ha).

Tableau 5 - Bilans hydrochimiques annuels moyens (kg/ha) sur la période juillet 1981 - juin 1994.

Cloutasses	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1856		1,03	14,3	2,35	3,26	13,3	7,72·	8,34·	22,7	30,0·	55,1
sorties		1376	34,2	14,7	4,20	3,96	15,9	0,49·	20,4·	17,0	8,33·	40,2
e - s			-33,1	-0,49	-1,85	-0,70	-2,54	+7,23·	-12,1·	+5,72	+21,8·	+14,9
Latte *	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1835		0,99	15,9	2,56	3,07	13,9	8,34·	6,93·	24,1	34,3·	57,2
sorties		1228	34,0	16,4	6,22	3,12	16,1	0,38·	13,0·	20,9	14,2·	49,1
e - s			-33,0	-0,42	-3,66	-0,05	-2,14	+7,96·	-6,05·	+3,20	+20,1·	+8,07
Sapine	P(mm)	L(mm)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
entrées	1743		1,05	14,4	2,29	3,91	11,9	6,59·	12,8·	20,5	20,8·	48,8
sorties		1112	33,1	9,22	3,46	2,18	13,7	0,30·	10,0·	16,6	0,72·	34,9
e - s			-32,0	+5,16	-1,17	+1,73	-1,88	+6,28·	+2,77·	+3,89	+20,1·	+13,9

P : précipitations (mm). L : lame d'eau écoulee (mm). e : entrées en solution dans les collecteurs (kg/ha/an). s : exportations en solution du bassin versant (kg/ha/an). * : sans destruction du couvert végétal. · : sur la période 1987-94. ♂ : valeurs partiellement reconstituées.

L'évolution de la minéralomasse pérenne varie généralement avec l'âge du couvert végétal (LE GOASTER *et al.* 1991, RANGER *et al.* 1995, *etc.*). A cet égard, nous disposons

d'informations concernant la pessière de la Latte sur la période 1974-1987 (DIDON-LESCOT 1996). En exprimant les données par hectare de bassin versant sous épicéas, l'immobilisation annuelle moyenne dans les troncs et l'écorce est estimée à 1,77 kg/ha de calcium, 0,38 kg/ha de magnésium, 1,08 kg/ha de potassium, 2,99 kg/ha d'azote et 0,22 kg/ha de soufre. Les éléments ainsi accumulés ont été exportés avec les grumes lors de la coupe.

Ainsi, en compilant les données hydrochimiques et les données sur la minéralomasse, nous obtenons, pour la partie du bassin sous épicéas, des pertes nettes (immédiates : en solution, voir tableau 5 – ou différées : lors de la coupe, voir ci-dessus) annuelles moyennes de 2,19 kg/ha de calcium, 4,04 kg/ha de magnésium et 1,13 kg/ha de potassium. En revanche, les entrées dépassent la somme des sorties en solution et de l'immobilisation nette dans les troncs et l'écorce de 7,72 kg/ha/an pour l'azote et de 2,47 kg/ha/an pour le soufre.

Les éclaircies réalisées en 1946 et en 1974-1976 ayant certainement eu un effet assez faible sur le fonctionnement global du milieu tel qu'il est perçu par l'approche définie ci-dessus, les pertes nettes en 60 ans s'établissent, au moment de la coupe à blanc, à environ 131 kg/ha de calcium, 242 kg/ha de magnésium et 68 kg/ha de potassium (tab. 6, bilan partiel). En tenant compte de l'activation des exportations en solution provoquée par la coupe, les pertes totales se montent à 253 kg/ha de calcium, 283 kg/ha de magnésium et 89 kg/ha de potassium (tab. 6, bilan total). Les bilans restent positifs et traduisent une accumulation pour l'azote (+ 264 kg/ha) et le soufre (+ 170 kg/ha en 1994 ; + 231 kg/ha en 1997).

Tableau 6 Pertes nettes (kg/ha) subies par les bassins versants pour une période de 60 ans incluant une rotation forestière sur les bassins de la Latte et de la Sapine.

Bassin des Cloutasses	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	N	S
Bilan hydrochimique	- 29	- 111	- 42	+ 632	+ 298
Impact des troupeaux	- 126	- 12	- 180	- 279	–
<i>Bilan total</i>	- 155	- 123	- 222	+ 353	–
Bassin de la Latte, partie sous épicéa	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	N	S
"Entrées - sorties" hors coupe d'après les mesures hydrochimiques [1]	- 25	- 219	- 2,9	+ 644	+ 162
Accumulation dans les troncs estimée à partir des observations sur la période d'étude [2]	- 106	- 23	- 65	- 180	- 13
Minéralomasse des troncs exportés au moment de la coupe [3]	- 71	- 15	- 43	- 121	- 9
Estimation du bilan hydrochimique sur 60 ans [4] *	- 60	- 227	- 25	+ 585	+ 158
<i>Bilan partiel [1] + [2] ou [3] + [4]</i>	- 131	- 242	- 68	+ 464	+ 149
Impact hydrochimique de la coupe **	- 122	- 43	- 21	- 200	+ 21
<i>Bilan total</i>	- 253	- 283	- 89	+ 264	+ 170
Bassin de la Sapine	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	N	S
"Entrées - sorties" hors coupe d'après les mesures hydrochimiques [1]	+ 310	- 70	+ 104	+ 565	+ 279
Accumulation dans les troncs estimée à partir des observations sur la période d'étude [2]	- 547	- 40	- 207	- 223	- 93
<i>Bilan partiel [1] + [2]</i>	- 237	- 110	- 103	+ 342	+ 186

* : [1] + [2] - [3]. ** : bilan arrêté en 1994. – : données manquantes.

2) Le bassin de la Sapine

La hêtraie de la Sapine est un taillis naturel qui associe des arbres d'âges très différents, certains étant plus que centenaires. L'accroissement actuel moyen des stocks d'éléments minéraux présents dans les troncs a été déterminé à partir d'une classification des arbres par classes d'âge (HANCHI,1994). En exprimant les données par hectare de bassin versant, l'immobilisation annuelle moyenne dans les troncs est estimée à 9,11 kg/ha de calcium, 0,67 kg/ha de magnésium, 3,45 kg/ha de potassium, 0,62 kg/ha de sodium, 5,69 kg/ha d'azote et 1,55 kg/ha de soufre.

Si l'on associe à ces valeurs les données de l'étude hydrochimique (tab. 5), on obtient les pertes nettes annuelles moyennes (immédiates ou différées) de 3,95 kg/ha pour le calcium, 1,84 kg/ha pour le magnésium, 1,72 kg/ha pour le potassium et 2,50 kg/ha pour le sodium. Les entrées dépassent la somme des sorties en solution et de l'immobilisation nette dans les troncs de 3,72 kg/ha/an pour l'azote et de 3,09 kg/ha/an pour le soufre.

Dans l'hypothèse où la hêtraie subirait, comme la pessière du bassin de la Latte, une coupe à l'âge de 60 ans, les pertes totales (somme des pertes en solution sur 60 ans et des pertes avec les grumes – voir tableau 6) atteindraient 237 kg/ha de calcium (Latte : 131 kg/ha), 120 kg/ha de magnésium (Latte : 242 kg/ha) et 103 kg/ha de potassium (Latte : 68 kg/ha). Le bilan est positif pour l'azote (342 kg/ha) et le soufre (186 kg/ha).

Les valeurs présentées ci-dessus pour le bassin de la Sapine – comme celles rappelées à titre de comparaison pour le bassin de la Latte – ne prennent pas en compte l'impact hydrochimique de la coupe. Sur ce point, il faut souligner que la minéralomasse des débris végétaux laissés sur place (branches, feuilles, racines, litières) est presque aussi forte pour la hêtraie que pour la pessière, avec des différences sensibles selon les éléments : 554 kg/ha de calcium, contre 282 ; 71 kg/ha de magnésium, contre 108 ; 206 kg/ha de potassium, contre 171 ; 908 kg/ha d'azote, contre 1208 ; 99 kg/ha de soufre, contre 162 (HANCHI 1994, DIDON-LESCOT 1996). On peut donc s'interroger sur l'ampleur des exportations en solution que pourrait provoquer une coupe de la hêtraie.

3) Le bassin des Cloutasses

En tenant compte des exportations consécutives à l'activité pastorale (prise de poids des moutons et vente des déjections – DUPRAZ 1984), les pertes nettes annuelles moyennes s'élèvent à 2,59 kg/ha de calcium, 2,05 kg/ha de magnésium et 3,70 kg/ha de potassium. Le bilan est positif pour l'azote (+ 5,88 kg/ha). Sur 60 ans, les pertes totales atteindraient 155 kg/ha pour le calcium, 123 kg/ha pour le magnésium et 222 kg/ha pour le potassium (tab. 6).

4) Synthèse des résultats

Le tableau 6 compare les données recueillies sur les trois bassins versants. Par rapport au bassin des Cloutasses, ceux de la Latte et de la Sapine enregistrent des pertes de calcium beaucoup plus fortes. Le bassin de la Latte subit des pertes de magnésium très élevées. Enfin, sur le bassin des Cloutasses, la vente des déjections des moutons influence énormément le bilan du potassium.

5) L'altération des roches

Les bilans "entrées - sorties" de la silice et du sodium indiquent que l'altération des roches fournit des quantités non négligeables d'éléments minéraux. La libération du calcium du magnésium et du potassium peut être évaluée à partir, d'une part, des pertes nettes de sodium (déduites des bilans hydrochimiques, de l'immobilisation dans la biomasse et des

exportations liées à l'activité pastorale) et, d'autre part, des indices de libération des éléments tirés de l'étude géochimique de profils d'altération (MARTIN 1986). Cet indice prend en compte, pour chaque élément, la perte relative subie par les matériaux altérés (perte en g pour 100 g de roche saine / teneur dans la roche saine). Il est établi par comparaison à l'évolution du sodium, élément dont l'indice est fixé conventionnellement à 1000.

Pour les bassins du Mont-Lozère, nous ne disposons pas encore d'analyses des formations superficielles. Les calculs s'appuient sur les analyses du granite du Pont-de-Montvert et sur les indices de libération déterminés pour les arènes sur gneiss du massif des Maures : Ca^{2+} : 1130 ; Na^+ : 1000 ; K^+ des biotites : 365 ; Mg^{2+} : 116 (MARTIN 1986). Les résultats obtenus par cette approche sont présentés dans le tableau 7. Le bassin de la Latte ne figure pas dans ce tableau, le sodium n'ayant pas été dosé dans les tissus des épiceas.

D'après les valeurs obtenues, l'altération du granite du Pont-de-Montvert fournit des quantités appréciables de calcium (117 à 121 kg/ha en 60 ans) et de potassium (28 à 29 kg/ha en 60 ans). En revanche, la libération de magnésium apparaît très modeste (9 à 10 kg/ha).

Ces résultats doivent être considérés comme des estimations à prendre avec prudence. En effet, la libération de calcium et, plus encore, de potassium et de magnésium, est plus active au niveau des sols que plus bas dans les arènes. En outre, par rapport au massif des Maures, l'altération des biotites et donc la libération de magnésium et de potassium sont favorisées, sur le Mont-Lozère, par la plus grande acidité du milieu. Toutefois les estimations des quantités de calcium, de magnésium de potassium libérées par l'altération des roches, sont loin d'atteindre les valeurs qui seraient nécessaires pour couvrir les besoins d'une gestion forestière avec coupe périodique des arbres, et même ceux d'une gestion pastorale avec exportation des déjections.

Tableau 7 - Valeurs annuelles moyennes estimées (kg/ha) de la libération de cations basiques par l'altération du granite du Pont-de-Montvert sur les bassins versants des Cloutasses et de la Sapine.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
Cloutasses	2,01	0,16	0,48	2,74
Sapine	1,95	0,15	0,47	2,66

VIII - Conclusion

En terme de fertilité, le terrain d'étude constitue un milieu extrêmement pauvre et très fragile. En effet, l'abondance des précipitations favorise une intense lixiviation des sols et des altérites développés sur le granite du Pont-de-Montvert, roche peu altérable, surtout dans les conditions de température du Mont-Lozère. Dans ce contexte, l'extension des forêts à la place des landes et des pelouses pâturées peut représenter un élément positif, dans la mesure où – en permettant des remontés d'éléments minéraux par la végétation – elle est susceptible de limiter les pertes en solution. A cet égard, les bilans hydrochimiques indiquent que la hêtraie joue un rôle beaucoup plus favorable que la pessière. Cette dernière favoriserait même l'exportation de calcium et de magnésium.

Les coupes forestières constituent des perturbations graves. Les exportations d'éléments minéraux avec les troncs sont particulièrement fortes dans le cas des hêtres. Il s'y ajoute les effets sur les fonctionnements hydrochimiques, mis en évidence pour la pessière mais qui restent à définir pour la hêtraie. Au total, l'activation des pertes de cations basiques est très

nette. Le bassin de la Latte a perdu beaucoup de calcium et de magnésium. Sur le bassin de la Sapine (hêtraie), les pertes les plus importantes concernent le calcium et le potassium.

Les pertes liées aux coupes sont suffisamment élevées pour que l'on puisse se poser la question de la mise en péril de la fertilité des sols, d'autant que les réserves exploitables dans les premiers 60 cm de sol sont faibles : 224 kg/ha de calcium, 56 kg/ha de magnésium et 235 kg/ha de potassium dans le bassin de la Latte avant la coupe ; 441 kg/ha de calcium, 40 kg/ha de magnésium et 184 kg/ha de potassium dans le bassin de la Sapine (DIDON-LESCOT 1996).

Cependant quelques incertitudes demeurent que les recherches futures devront s'attacher à lever :

- D'une part, le rôle de l'altération des roches est encore mal connu.
- D'autre part, les entrées d'éléments minéraux atmosphériques livrent difficilement leurs secrets, qu'ils concernent la part des recyclages locaux dans les entrées mesurées dans les collecteurs (légère surestimation des apports sur les bassins versants), les pluviollessivats sous épicéas (possible sous-estimation des apports du fait que l'on ne tient pas compte de l'enrichissement des eaux en certains éléments au cours de la traversée de la canopée) ou l'influence des poussières à dissolution lente, d'origine saharienne notamment (sous-estimation des apports de calcium).
- Enfin, la quantification de cations échangeables des sols mériterait une étude plus poussée. On s'étonnera en particulier de la faiblesse des estimations actuelles des stocks de magnésium et de potassium dans les sols du bassin de la Sapine.

Du fait des exportations d'éléments minéraux liées à l'activité pastorale, le bassin versant des Cloutasses ne se trouve pas dans une situation d'équilibre avec le mode de gestion du milieu. De plus, les pertes provoquées par le pacage des moutons sont connues de façon approximative. Le bassin versant des Cloutasses ne constitue donc pas une référence très sûre en matière de fonctionnement géochimique non perturbé. La modestie des exportations de magnésium en liaison avec le pastoralisme permet cependant de considérer que les pertes spécifiques totales en cet élément que subit le bassin versant, avoisinent la valeur maximale permettant le maintien des stocks dans cette partie du Mont-Lozère. Dans cette hypothèse, la gestion forestière entraînerait une diminution des stocks de magnésium sous hêtraie (dans le cas de coupes) et sous épicéas (même sans coupes).

Remerciements

Nous sommes reconnaissants à F. LELONG et à B. GUILLET de la part qu'ils ont prise dans la conduite des travaux sur le Mont-Lozère lorsqu'ils assuraient la direction du BVRE. Nous associons à ces remerciements tous ceux dont les travaux ont contribué à faire avancer les connaissances concernant les fonctionnements hydrochimiques et biogéochimiques sur le Mont-Lozère, et tout particulièrement C. DUPRAZ, P. DURAND, A. HANCHI et C. VANNIER.

Références

ADAMSON J.K., HORNUNG M., PYATT D.G. & ANDERSON A.R. (1987): Predicting the effects of different harvesting regimes on forest floor dynamics in northern hardwoods. – *Can. J. For. Res.* **8**: 306-315.

- AVILA A., QUERALT-MITJANS I. & ALARCON M. (1997): Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. – *J. Geophys. Res.* **102** (D18): 21,977-21,996.
- BASKERVILLE G.I. (1965): Estimation of dry weight of tree components and total standing in conifer stand. – *Ecology* **46**: 867-869.
- CAPE J.N., BROWN A.H.F., ROBERTSON S.M.C., HOWSON G. & PATERSON I.S. (1991): Interspecies comparisons of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain. – *For. Ecol. Manag.* **46** (3-4): 165-177.
- CLARIDGE G.G.C. (1970): Studies in element balances in a small catchment of Taïta, New Zealand. – *IAHS Publ.* **96** (Proc. Wellington Symp.): 523-540.
- CONESA A.P., FARDEAU J.C. & SIMON-SYLVESTRE G. (1979): Le phosphore et le soufre. – *In : Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol*, Edit. Masson: 395-407.
- DAMBRINE E., ULRICH E., CENAC N., DURAND P., GAUQUELIN T., MIRABEL P., NYS C., PROBST A., RANGER J. & ZEPHORIS M. (1995): Atmospheric deposition in France and possible relation with forest decline. – *In : Forest decline and air pollution. Effects in the French mountains*, LANDMANN G. & BONNEAU M. édit., Edit. Springer Verlag:177-200.
- DIDON-LESCOT J.F. (1996): *Forêt et développement durable au Mont-Lozère. Impact d'une plantation de résineux, de sa coupe et de son remplacement sur l'eau et sur les réserves minérales du sol*. – Thèse de l'Université d'Orléans, 161 p.
- DIDON-LESCOT J.F. (1998): The importance of throughfall in evaluating hydrological fluxes: example of a coniferous catchment (Mont-Lozère, France). – *In : Catchment and biogeochemical processes in changing environment*, Conference of the European Network Experimental and Representative Basins (ERB) (Liblice, Czech Republic, 1998), Livre des résumés (BUCEK J. & Sir TESAR M. édit.): 17-20.
- DIDON-LESCOT J.F. & MARTIN C. (2000): Etude du fonctionnement hydrochimique des bassins versants du Mont-Lozère et des conséquences d'une coupe forestière: résultats et enseignements. – *Forêt méditerranéenne XXI* (2), Actes du colloque "Foresterrané'99" (Arles, 1999): 156-162.
- DUCHAUFOUR Ph. (1998): Réflexions sur les classifications des sols. – *Etude et Gestion des Sols* **5** (3): 201-205.
- DUPRAZ C. (1984): *Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétation contrastée (Mont-Lozère)*. – Thèse Docteur-Ingénieur, Université d'Orléans, 363 p.
- DURAND P. (1989): *Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France)*. – Thèse de l'Université d'Orléans, 186 p.
- DUVIGNEAUD P., KESTEMONT P. & AMBROES P. (1971): Productivité primaire des forêts tempérées d'essences feuillues caducifoliées en Europe occidentale. – *In : Productivité des Ecosystèmes forestiers* (Colloque, Bruxelles), Edit. UNESCO: 259-270.
- ERICKSON E. (1960): The yearly circulation of chloride and sulphur in nature: Meteorological, geochemical and pedological implications. Part. 2. – *Tellus* **12**: 63-109.
- FAHEY T.J., STEVENS P.A., HORNUNG M. & ROWLAND P. (1991): Decomposition and nutrient release from logging residue following conventional harvest of Sitka spruce in North Wales. – *Forestry* **64** (3): 271-288.

- FEGER K.H., BRAHMER G., BAUR S., RASPE S. & ZÖTTL (1990): *Excursion guide to the Experimental Watersheds Areas Schluchsee and Villingen (Black Forest)*.
- FUHRER J. & SLANINA J. (1987): Pollution climates in Europe: deposition in ecosystems. Report on the session. – *Symposium on effects of air pollution on terrestrial and aquatic ecosystems* (Grenoble, 1987), Report n° 7, Air pollution and ecosystems, MATHY édit.: 50-55.
- GALLOWAY J.N., LIKENS G.E., KEENE W.C & MILLER J.M. (1982): The composition of precipitation in remote areas of the world. – *J. Geophys. Res.* **87** (C11): 8771-8786.
- GUILLET B., VANNIER C. & LELONG F. (1994): Sulphur stored in forest soils and the relative importance of organic and inorganic forms. Examples at the Mont-Lozère. – *In : Forest decline and air pollution effects in the french mountains*, LANDMANN G. & BONNEAU M. édit., Edit. Springer Verlag: 226-232.
- HALLBACKEN L. (1992): Long term changes of base cation pools and biomass in a beech and spruce forest of Southern Sweden. – *Z. Pflanz. Bodenk.* **155**: 51-60.
- HANCHI A. (1994): *Cycle de l'eau et des éléments biogènes dans un bassin versant forestier: cas d'une hêtraie au Mont-Lozère*. – Thèse de l'Université de Bourgogne, 232 p.
- HUMBERT J. & NAJJAR G. (1992): *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*. – Edit. CEREG, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 85 p.
- JOHNSON D.W. (1990): The interception throughfall and stemflow in a forest of Highland Scotland and the comparison with other upland forest in the UK. – *J. Hydrol.* **118**: 281-287.
- LE GOASTER S., DAMBRINE E. & RANGER J. (1991): Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. I - Evolution de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. II - Prélèvement racinaire et translocation d'éléments minéraux au cours de la croissance. – *Acta Oecologica* **2** (6): 771-789 et 791-808.
- LELONG F., DUPRAZ C., DURAND P. & DIDON-LESCOT J.F. (1990): Effects of vegetation type on the biogeochemistry of small catchments (Mont-Lozère, France). – *J. Hydrol.* **116**: 125-145.
- LOVETT G.M. (1992): Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen. – *In : Atmospheric deposition and forest nutrient cycling*, JOHNSON D. & MILLER H.G. édit., Edit. Springer Verlag, Ecological Studies **91**: 153-164.
- LOVETT G.M. & LINDBERG S.E. (1984): Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. – *J. Appl. Ecol.* **21**: 1013-1027.
- LOYE-PILOT M.D., MARTIN J.M. & MORELLI J. (1986): Influence of saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. – *Nature* **321**: 427-428.
- MARTIN C. (1986): *Contribution à l'étude de la dynamique des versants de roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures*. – Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Paris I, 935 p.
- MARTIN C. (1996): Apports d'éléments minéraux atmosphériques et pluviolésivats dans la partie occidentale du massif des Maures. – *Et. Géog. Phys.* **XXV**: 3-23.
- NIHLGARD B. (1972): Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and planted spruce in south Sweden. – *Oikos* **23** (1): 69-81.
- NYE Ph. (1961): Organic matter and nutrient cycle under moist tropical forest. – *Plant and Soil* **13** (4): 333-346.

- NYS C., RANGER D. & RANGER J. (1983): Minéralomasse et cycle biologique d'une pessière de 50 ans. – *Ann. Sci. For.* **40** (1: "Etude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises"): 41-66.
- PARKER G.G. (1983): Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. – *Advances in ecological Research* **13**: 57-113.
- PROBST A., DAMBRINE E., VIVILLE D. & FRITZ B. (1990): Influence of acid atmospheric inputs on surface water chemistry and mineral fluxes in declining spruce stands within a small granitic catchment (Vosges Massif, France). – *J. Hydrol.* **116** (2): 101-124.
- PROBST A., LELONG F., VIVILLE D., DURAND P., AMBROISE B. & FRITZ B. (1995): Comparative hydrochemical behaviour and element budgets of the Aubure (Vosges Massif) and Mont-Lozère (Southern Massif Central) Norway spruce forested catchments. – *In: Forest decline and air pollution. Effects in the French mountains*, LANDMANN G. & BONNEAU M. édit., Edit. Springer Verlag: 203-225.
- RANGER J., MARQUES R., COLIN-BELGRAND M., FLAMMANG N. & GEHAYE D. (1995): The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. – *For. Ecol. Manag.* **72**: 167-183.
- RAPP M. (1969): Apport d'éléments minéraux au sol par des eaux de pluviollessivage sous des peuplements de *Quercus ilex* L., *Quercus lanuginosa* Lamk et *Pinus halepensis* Mill. – *Oecol. Plant* **4** (1): 71-92.
- RAPP M. (1971): Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens. – *In: Caractéristiques pédologiques en climat méditerranéen tempéré*, Recherche coopérative sur programme n° 40 du CNRS: "Ecologie du sol", Edit. CNRS: 19-184.
- REMENIERAS G. (1980): *L'hydrologie de l'ingénieur*. – Edit. Eyrolles, Paris, 456 p.
- ROSEN K. & LUNDMARK-THELIN A. (1987): Increased nitrogen leaching under piles of slash. A consequence of modern forest harvesting techniques. – *Scand. J. Forestry Res.* **2**: 21-29.
- ULRICH B., MAYER R. & HELLER H. (1974): Data analysis and data synthesis of forest ecosystems. – *Göttinger Bodenkundliche Berichte* **30**: 459 p.
- ULRICH E., LANIER M. & SCHNEIDER A. (1995): *Dépôts atmosphériques et concentrations des solutions du sol*. – Réseau RENECOFOR, sous-réseau CATAENAT, Rapport scientifique sur les années 1993-1994, Edit. ONF, 165 p.
- VANNIER C. (1992): *Les modalités de la rétention du soufre dans les sols de deux bassins versants forestiers du Mont-Lozère*. – Thèse de l'Université d'Orléans, 113 p.
- WEID P.M. (1911): *Les forêts de la Lozère*. – Edit. Paris-Lille, 416 p.

Adresse des auteurs : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie, Université de Nice-Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Edouard Herriot, BP 3209, 06204 NICE cedex 03, FRANCE. Courriel : martincl@infonie.fr