

BILANS COMPARES DES TRANSFERTS D'EAU ET D'ELEMENTS MINERAUX

DANS TROIS PETITS BASSINS VERSANTS A VEGETATION CONTRASTEE DU MONT LOZERE

C. DUPRAZ ⁽¹⁾ et F. LELONG ⁽²⁾

J.-F. DIDON ⁽³⁾

(collaboration technique)

RESUME

La mesure des flux d'eau et de solutés entrant par les précipitations atmosphériques et sortant par l'écoulement à l'exutoire de trois petits bassins versants couverts de végétations contrastées permet de quantifier l'influence de la nature de la végétation sur les bilans hydrochimiques et sur les taux d'altération superficielle actuelle.

Le principe de la méthode est simple : il consiste à considérer les bassins versants comme de lysimètres géants pour lesquels l'équation de conservation de masse s'applique :

Entrées (précipitations atmosphériques + altération chimique) =

Sorties (écoulement à l'exutoire ± variations de stocks

Mais sa mise en œuvre suppose les conditions appropriées suivantes :

— Les bassins représentatifs doivent avoir exactement les mêmes caractéristiques géologiques et physiographiques, sauf la végétation. Les trois bassins choisis sont situés sur le flanc du Mont Lozère, à substrat granitique homogène, avec les surfaces et les végétations distinctives suivantes :

- bassin 1 (0,81 km²) : pelouse d'altitude,
- bassin 2 (0,54 km²) : forêts de hêtres,
- bassin 3 (0,19 km²) : forêt d'épicéas.

— Les eaux écoulées à l'exutoire doivent être échantillonnées à pas de temps variable pour connaître les concentrations en solutés correspondant aux pointes de crues.

— Les programmes de calculs de flux en solution doivent être optimisés pour limiter les incertitudes de mesure, de sorte que les faibles différences de flux attendues puissent être significatives.

De cette manière, les différences mesurées de bilans hydrologiques et hydrochimiques et de taux d'altération selon la végétation s'avèrent nettes et significatives : par exemple, pour Ca, Mg et K, le taux d'altération semble plus élevé dans le bassin à forêt résineuse et à un degré moindre dans le bassin à pelouse que dans le bassin à forêt décidue.

On peut de la même manière quantifier les impacts hydrologiques et hydrochimiques de perturbations introduits par l'homme : pluies acides, écobuage, éclaircies et coupes forestières, fertilisation...

(1) L.E.C.S.A., INRA, place Vilia, 34060 Montpellier.

(2) Laboratoire d'Hydrogéologie, Université, 45046 Orléans Cédex.

(3) Maison du Parc des Cévennes, 30450 Génolhac.

INTRODUCTION

L'utilisation de bassins versants en tant qu'*hydro-systèmes* bien délimités, permettant l'évaluation assez précise des entrées et des sorties d'eau et d'éléments minéraux en solution, est apparue comme un moyen privilégié de résoudre un problème scientifique difficile, posé récemment aux pédologues forestiers : Quels sont les effets sur la fertilité à moyen et long terme du sol, de plantations de résineux purs, tels que les peuplements de pins et d'épicéas, qui se développent depuis une centaine d'années dans un contexte de recherche de production et de rentabilité accrues ? Ne doit-on pas craindre que les phénomènes d'acidification bien connus, liés à ces essences (production d'humus brut peu dégradable, diminution du taux de saturation du complexe d'échange, mobilisation croissante des sesquioxides Al et Fe...), ne provoquent à terme une altération excessive de la réserve minérale du sol et l'exportation d'éléments minéraux indispensables au bon équilibre entre le climat, le sol et la végétation ?

Depuis plus de dix ans, un important programme de recherche soutenu par la DGRST puis par le PIREN a été développé (BONNEAU *et al.*, 1977 ; BONNEAU, 1983) pour tenter de répondre à ces questions. Des bilans chimico-minéralogiques isoquartz (LELONG, 1967 ; LELONG et SOUCHIER, 1979) ont été réalisés en différentes régions de France (Vosges, Ardennes, Normandie, Val de Loire, Massif Central) sur des colonnes de sol bien en place, dérivant de roches mères diverses, réputées homogènes, évoluant sous des peuplements végétaux contrastés : peuplements purs de feuillus (chênes, hêtres, châtaigniers), peuplements purs de résineux (pins, épicéas, sapins) ou encore de peuplements mixtes. Le résultats de ces bilans paraissent alarmants : sous végétation de résineux, d'importantes pertes supplémentaires en éléments basiques et en Mn semblent exister ; pour Ca^{++} , ces pertes supplémentaires s'élèveraient à quelques dizaines de kg par hectare et par an, et pour K, elles attendraient quelques centaines de kg (BONNEAU *et al.*, 1979). L'inconvénient de cette méthode était cependant son caractère *ponctuel* dans l'espace et *intégrateur* dans le temps, qui pouvait entraîner des défauts d'homogénéité verticale et latérale des sols et fausser la valeur des bilans.

Aussi décida-t-on de tenter d'établir des bilans d'altération, à partir de mesures non plus dans les colonnes de sols, mais dans les eaux qui s'écoulent après avoir percolé à travers les écosystèmes. Cette méthode hydrochimique, contrairement à la précédente, permet de saisir les tendances évolutives *actuelles* des écosystèmes sol-végétation et d'intégrer *dans l'espace* un volume représentatif suffisant de ceux-ci (lissage des hétérogénéités ponctuelles).

I. METHODES

Cette méthode hydrochimique consiste à comparer les flux de solutés entrant et sortant de bassins versants naturels aussi semblables que possible, mais couverts de peuplements végétaux différents. Chaque bassin, avec sa végétation caractéristique, est assimilable à un lysimètre géant ; l'exutoire du bassin permet de contrôler toutes les sorties et le bilan d'altération actuelle s'écrit simplement (fig. 1), à partir de l'équation de conservation de masse :

$$(1) \text{ Entrées} = \text{sorties} + \text{variations de stock}$$

Les entrées correspondent soit aux précipitations atmosphériques, soit à l'altération chimique du substrat géologique. Les variations de stock correspondent au piégeage durable ou temporaire d'éléments dans la biomasse, dans le complexe d'échange et dans les solutions du sol. Elles sont comptées positivement quand il y a augmentation de stock et négativement dans le cas contraire.

Le principe est simple, mais la réalisation est délicate à plusieurs titres.

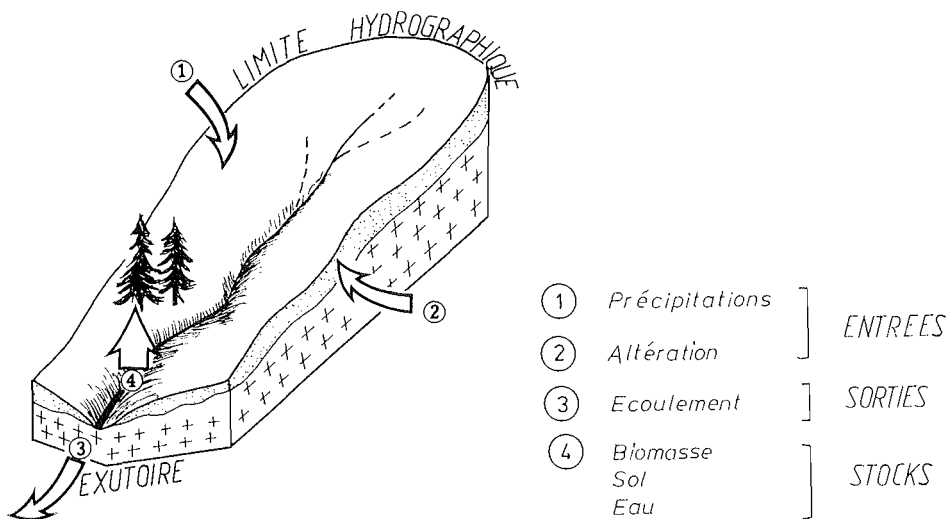


Figure 1 : Schéma représentant le principe d'établissement d'un bilan massique dans bassin versant.

Schematic representation of the mas balance evaluation in a watershed.

A) Choix des bassins représentatifs et comparatifs

Les critères à satisfaire sont les suivants :

- homogénéité du peuplement végétal sur toute l'étendue du bassin ;
- proximité géographique des bassins représentatifs des divers peuplements végétaux testés ; similitude des conditions d'altitude et d'exposition. Cela conditionne la similarité des conditions climatiques qui régissent l'altération ;
- identité des substrats géologiques et de l'évolution géomorphologique (distribution des formations d'altération et de recouvrement) ;
- similitude aussi grande que possible des conditions géométriques (forme des bassins) et des conditions topographiques.

En outre, il fallait trouver des bassins suffisamment accessibles, à l'abri des perturbations liées aux activités humaines et se prêtant aux contraintes de l'étude hydrologique (bassin à substrat imperméable, délimité par des limites nettes et à l'aval par un seuil stable).

Après de minutieuses prospections sur différents substrats cristallins de France, trois bassins comparatifs ont été retenus sur le flanc sud du Mont Lozère, entre 1 140 et 1 490 m d'altitude ; leur surface est comprise entre 0,19 et 0,80 km², et tous les trois drainés par des ruisseaux permanents :

- l'un est couvert à 80 % par une hêtraie ;
- l'autre à 85 % par une pessière (forêts d'épicéas) ;
- le troisième est une pelouse avec quelques bouquets d'arbres divers (20 % au total de la surface).

Les principales caractéristiques physiographiques de ces bassins, définies par BONNARD (1981) et par DUPRAZ (1984), sont résumées dans le tableau I. Leur représentation cartographique et les équipements hydrologiques et météorologiques qu'ils portent sont donnés dans la figure 2. On voit que le bassin de pessière est de taille nettement plus réduite et de forme plus compacte que les deux autres : il n'a pas

Tableau I : Caractères physiographiques des bassins versants comparatifs du Mont Lozère.**Le substrat est homogène (granite porphyroïde du Pont de Montvert).***Physiographic characteristics of the compared watersheds.**The substrat (porphyric granit) is the same for the three watersheds.*

Nom local et végétation	Superficie ha	Altitude moyenne m	Altitudes extrêmes m	Orientation	Pente moyenne du bassin %	Pente moyenne du ruisseau %	Longueur du cours m	Densité de drainage km/km ²
Valat de la Sapine HETRALE	54	1270	1160-1395	N → S	18	15	750	1,39
Valat de la Latte PESSIÈRE	19,5	1421	1340-1495	NE → SW	20	17	210	0,95
Valat des Cloutasses PELOUSE	81	1386	1290-1495	N → S	10	8	1825	2,43

été possible de trouver de peuplement résineux homogène couvrant un bassin plus vaste. Mais deux sous-bassins de 20 hectares ont pu être individualisés à l'amont de deux autres bassins (fig. 2) pour éventuellement pouvoir corriger ultérieurement le biais dû aux différences de surface.

D'après les observations et analyses de sols disponibles (TREVISAN, 1982 ; DURAND, 1985), les sols sont assez semblables dans les trois bassins ; on y trouve quatre types de profils selon les conditions topographiques :

- sols rocheux ou lithiques, fréquents sur les crêtes et les versants escarpés, représentant environ 10 % de la surface totale des bassins ;
- rankers humifères à sol bruns ocreux humifères, sur la majeure partie des versants (60 à 70 % de la surface), selon la profondeur de l'arénisation ;
- sols colluviaux et alluviaux sur les replats et le long des biefs des ruisseaux (10 à 20 % de la surface) ;
- tourbières, disséminées en plusieurs points sur les bassins, où la nappe d'eau reste sub-affleurante pendant la majeure partie de l'année, et dont la surface totale semble plus étendue dans le bassin de pelouse (5 % du total) que dans les deux autres (1 à 2 %).

D'une manière générale, le taux de matière organique et la composition du complexe d'échange de ces sols ne paraissent pas significativement différents d'un bassin à l'autre (DURAND, 1985).

B) Plan d'échantillonnage et programme de calculs de flux

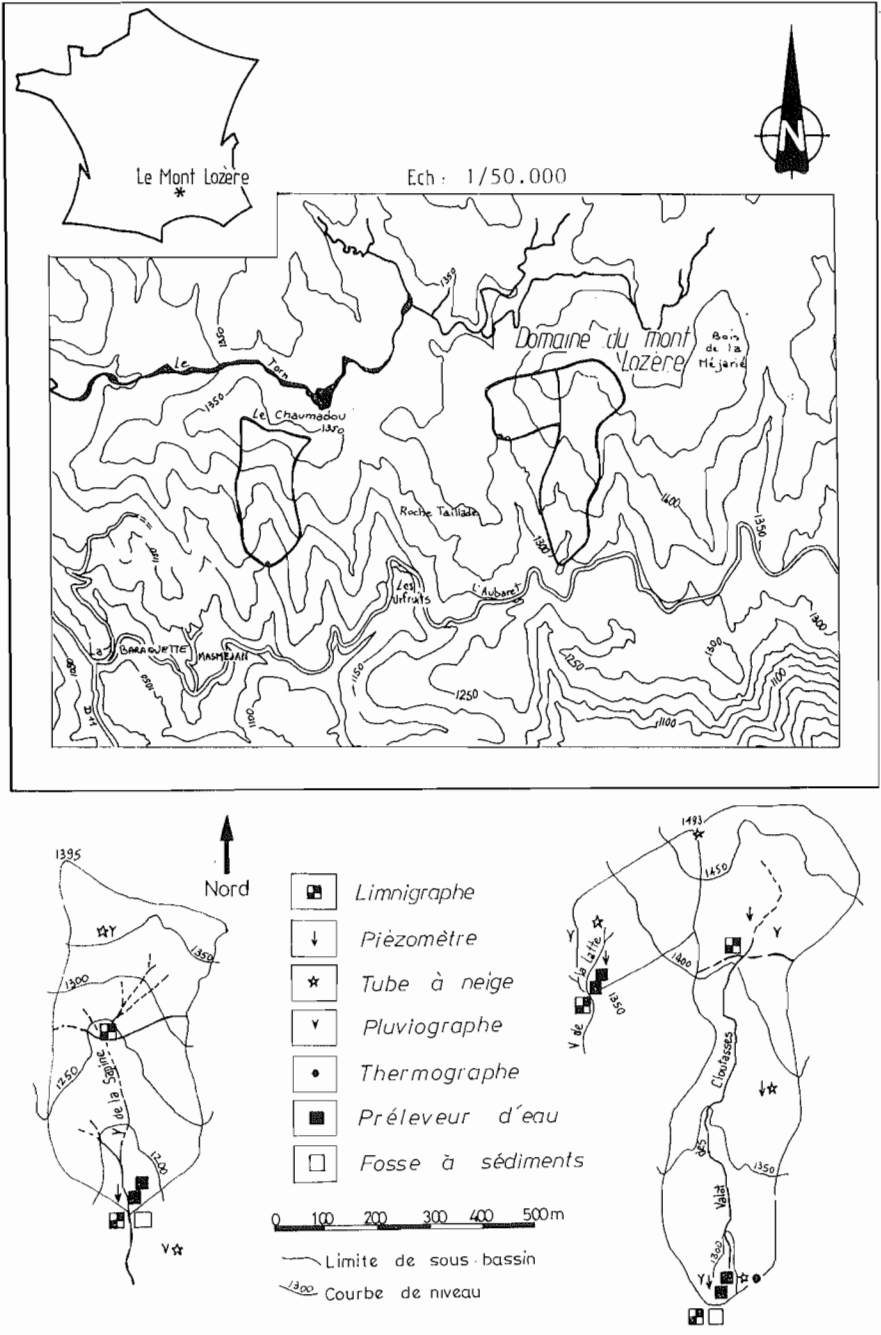
L'expression des flux sortants F_s de solutés écoulés est :

$$F_{(s)} = \int_t q(t). C_i dt$$

q : débit d'eau, est mesuré en continu dans le temps ;

C_i : concentration (de l'élément i) ne peut être connue par échantillonnage, suivant un pas de temps plus ou moins espacé. L'optimisation proposée par DUPRAZ (1984) pour estimer les flux sortants avec une erreur faible ($\pm 5\%$) et sans surcharge analytique trop lourde peut être résumée en cinq points :

— Deux échantillonnages sont réalisés en parallèle : l'un à pas de temps fixe (décadaire) permet de suivre les variations hydrochimiques lentes liées au tarissement ; l'autre à pas de temps variable permet d'échantillonner les pics de crue.



LES BASSINS-VERSANTS ET LEURS EQUIPEMENTS

Figure 2 : Localisation géographique des bassins versants sur la carte IGN 1/50 000^e de Génolhac (n° 2 735) et implantation des équipements sur ces bassins. Location of the water sheds on the IGN map (1/50,000, Genolhac) and implantation of the hydro-meteorological equipments.

L'expérience a en effet montré que pour ces petits bassins, dont les réactions hydrologiques sont très rapides (montées de crue en une heure), les relations concentration de solutés-débit sont presque toujours étroites et linéaires, mais non univoques, c'est-à-dire que d'une crue à l'autre les paramètres a et b de la relation

$$C_i = a q + b$$

peuvent varier. Il faut donc échantillonner séparément chaque pointe de crue. Un préleveur automatique dont le déclenchement est asservi au niveau d'eau du ruisseau a été spécialement conçu pour cette étude. Sa réalisation a été menée à bien par DUPRAZ et DUBREULE au CRG-CNRS de Garchy [DUPRAZ *et al.*, 1984, b].

— La séparation des composantes de l'écoulement est faite graphiquement sans trop d'incertitudes ; en effet, les limnigrammes montrent après les crues une assez nette rupture de pente qui permet de séparer le ruissellement de l'écoulement de base.

— A partir de ces données, le chémoigramme de chaque soluté peut être déduit de l'hydrogramme pour chaque ruisseau en interpolant linéairement entre les points « cerises » des limnigrammes (fig. 3).

— L'intégration des flux se fait en sommant les produits de tronçons linéarisés $q \times C_i$. Le programme de calcul de flux a été entièrement automatisé (DUPRAZ, 1984).

— Les flux obtenus doivent être ramenés en flux spécifique (par unité de surface de bassin) pour permettre la comparaison des trois bassins. L'imprécision dans l'évaluation de surface de petits bassins pèse assez lourd dans l'incertitude totale. Enfin, diverses corrections peuvent être faites pour faire abstraction des surfaces relatives de bassins couvertes de dalles rocheuses (10 % environ du total) et pour supprimer l'influence des 15 à 20 % de peuplements végétaux étrangers, dans chaque bassin, à la végétation caractéristique (DUPRAZ, 1984).

LES FLUX ENTRANT $F_{(e)}$ sous forme d'apports par les précipitations (pluies, neige) doivent être également évalués cf. formule (1)). Leur expression par unité de surface est :

$$F_{(e)} = \sum_1^n (h_j \cdot C_i)$$

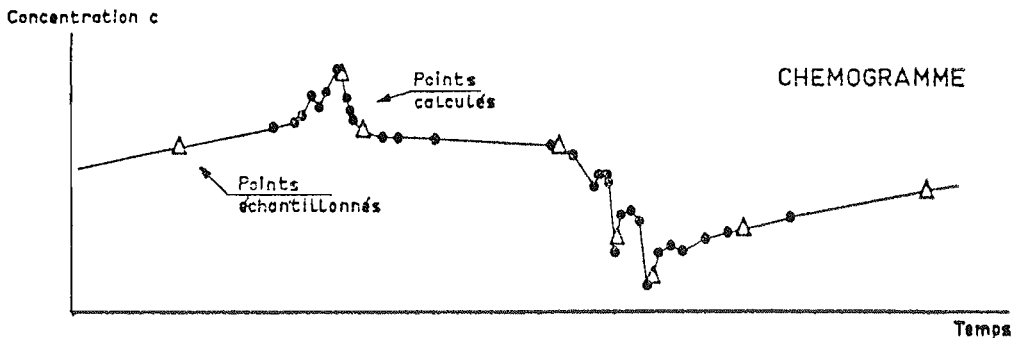
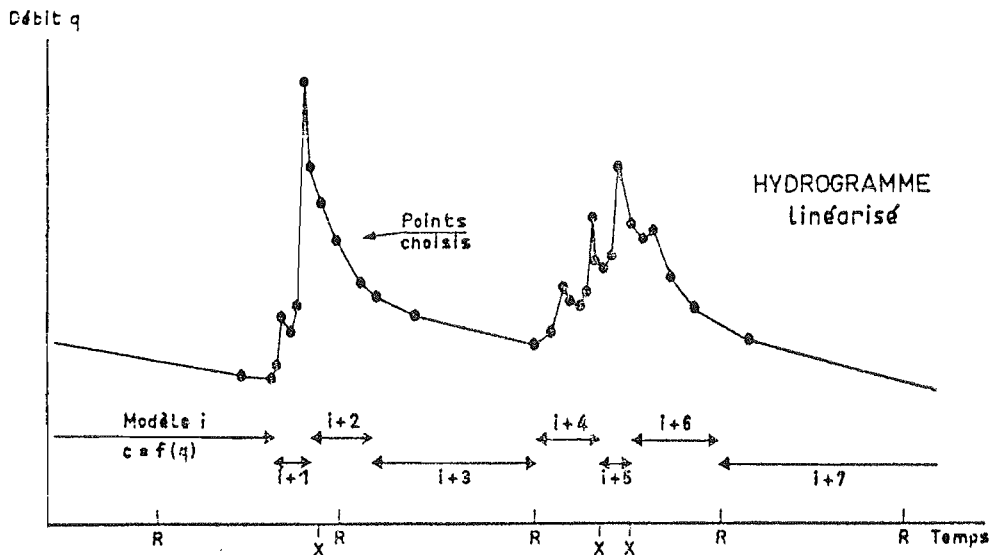
h_j : hauteur de l'averse j

C_i : concentration moyenne de l'élément i dans cette averse.

L'échantillonnage de h et de C peut être continu (ou cumulatif) dans le temps, mais il est ponctuel dans l'espace, d'où une incertitude concernant la représentativité de cet échantillonnage. Les mesures ont été faites avec 5 pluviographes et 6 tubes totalisateurs à partir desquels les isohyètes annuelles ont été tracées et la pondération des différents postes de mesure a été définie. L'expérience a montré la forte variabilité spatiale des averses, d'où une incertitude probablement plus grande dans l'évaluation des flux entrant que dans celle des flux sortant, et pouvant atteindre plus ou moins 10 %.

II. PREMIERS RESULTATS

Le dépouillement de deux années de mesures (1^{er} juillet 1981 à 30 juin 1983) a permis d'établir les bilans hydrologiques, les bilans de solutés « entrées-sorties » des trois bassins versants étudiés et d'en déduire, moyennant certaines hypothèses, les bilans d'altération et les cycles biogéochimiques des principaux éléments chimiques. Tous les chiffres présentés donnent les valeurs couvrant deux années de mesures (juillet 1981 à juin 1983) et rapportés à une année. Les précipitations correspondant à ces années de mesures sont voisines de 1550 mm (1981-1982) et de 2300 mm (1982-1983).



- Points « cerises » de l'hydrogramme
- △ Points échantillonnés pour analyse chimique
- R Instants d'échantillonnage à pas de temps fixe
- X Instants d'échantillonnage à pas de temps variable

Figure 3 : Procédé de construction du chémoigramme (courbe donnant la concentration chimique dans les eaux écoulées en fonction du temps). Le chémoigramme est construit à partir de l'hydrogramme et des concentrations mesurées sur échantillons ponctuels prélevés automatiquement soit à pas de temps fixe (échantillons R), soit lors des pics de crue (échantillon X).

Les points « cerises » de l'hydrogramme délimitent des tronçons rectilignes, le long desquels les variations de concentrations sont supposées linéaires. Les flux chimiques sont calculés en intégrant les produits de chaque tronçon linéaire.

Princip the chemogram curve plotting. The chemogram is plotted using discret concentration values of automatically sampled waters (R samples at regular time intervals, X samples at maximum floods) and the hydrogram curve for interpolation.

A) Bilans hydrologiques

Les deux écosystèmes forestiers se distinguent de l'écosystème pelouse par un écoulement de base nettement moins soutenu et un « ruissellement » plus faible (tableau II). En fait, il ne s'agit probablement pas, sauf averse exceptionnelle, de ruissellement sensu stricto, mais d'écoulements rapides par déversement direct des

Tableau II : Bilan hydrologique annuel moyen, exprimé en pour cent de précipitations. Ces pourcentages moyens correspondent aux deux années de mesure (juillet 1981 à juin 1983).

Annual mean hydrological budget. Values are expressed in % of precipitations.

These data correspond to two years of records (from July 1981 to June 1983).

	Bassin de pelouse	Bassin de hêtres	Bassin d'épicéas
« Ruissellement »	9	5	3
Écoulement de base	73	64	63
Évapotranspiration	18	31	34

Précipitations annuelles moyennes 1981-82 : 1 550 mm

Précipitations annuelles moyennes 1982-83 : 2 300 mm

nappes dans les parties basses des bassins, comme cela semble fréquent dans les bassins versants à terrains peu perméables (COSANDEY, 1983 ; GASCUEL-ODOUX *et al.*, 1984) où existent des sources diffuses drainant des nappes à surface variable (HEWLETT et TROENDLE, 1975). L'ETR de la pelouse paraît très réduit, de sorte que, chaque année, pour 2 000 mm de précipitations moyennes annuelles, la lame écoulée y est de 200 mm supérieure à celle correspondant aux peuplements forestiers. Ceci n'est sans doute pas sans incidence sur les bilans de solutés (voir ci-après).

Les trois bassins se distinguent aussi par l'intensité des crues et par les vitesses de tarissement. L'intensité des crues est la plus forte dans le bassin de pelouse, quoique plus long et moins pentu que les autres, en relation sans doute avec la surface plus importante de zones basses à nappes sub-affleurantes ; mais l'intensité des crues n'est pas la moins forte dans le bassin de hêtraie où la part des surfaces basses est la plus réduite.

En ce qui concerne les tarissements, la décroissance plus rapide des débits en saison chaude qu'en saison froide dans les trois bassins semble due à la part importante prise par l'ETR dans la décharge estivale de la nappe ; mais le tarissement semble toujours plus lent dans le bassin de résineux, et ce comportement paraît davantage lié aux caractéristiques géomorphologiques propres au bassin qu'à la nature de la végétation (DUPRAZ *et al.*, 1984, a).

B) Bilans de solutés entrées-sorties

Le tableau III et la figure 4 montrent que les bilans hydrochimiques sont voisins de l'équilibre (entrées-sorties du même ordre de grandeur), sauf pour Si qui est nettement exporté. Cependant, il apparaît de faibles différences d'un écosystème à l'autre, mais, compte tenu des marges d'incertitudes, il faut attendre le dépouillement d'années de mesures supplémentaires avant de pouvoir conclure. Provisoirement, on peut dégager les tendances suivantes :

— Pour les cations Ca, Mg, Na et K, les bilans hydrochimiques sont négatifs et les valeurs absolues sont plus fortes sous pessière et à un degré moindre sous pelouse que sous hêtraie ; ce résultat est à mettre en relation avec des concentrations de soluté plus élevées sous résineux et avec des débits écoulés plus importants sous pelouse.

— Pour les anions Cl⁻ et SO₄⁻², le sens des bilans semble différer selon la nature de la végétation ; ces bilans seraient négatifs sous pessière et positifs dans les deux autres écosystèmes. Ce résultat pourrait s'expliquer par la part — non comptabilisée dans les flux d'entrée — des précipitations sèches, qui seraient davantage interceptées par le système foliaire permanent et très divisé des conifères. Mais les écarts sont faibles, inférieurs aux fourchettes d'incertitude.

Ces tendances sont tout à fait conformes à celles décrites par FELLER et KIMMINS (1979) dans leur étude comparée des bilans chimiques annuels des petits bassins versants forestiers non perturbés. Le fonctionnement hydrochimique de l'écosystème pelouse étudié ici ne paraît pas fondamentalement différent de celui des écosystèmes forestiers.

C) Bilan d'altération

L'évaluation de l'altération chimique actuelle à partir des bilans de solutés entrées-sorties est possible moyennant certaines données ou hypothèses complémentaires.

— Les différences de stock d'éléments, dans chaque écosystème, pendant le laps de temps où est effectué ce bilan, doivent être évaluées (cf. équation 1). Ces stockages concernent :

- l'accumulation d'éléments dans la biomasse. Les quantités d'éléments ainsi immobilisées ont été tirées des valeurs citées dans la littérature (KREUTZER, 1976) ; les quantités ne sont notables que pour les éléments nutritifs principaux (Ca, K...);

- L'adsorption ou la désorption du complexe d'échange du sol. Au vu des analyses de sols disponibles (DURAND, 1985), on a admis qu'il n'y avait pas d'écart sensible d'un bassin à l'autre et que l'état des complexes d'échange était, depuis la plantation des résineux, quasi stationnaire dans le temps. La litière végétale est un peu différente sous ce peuplement, mais on supposera que les masses d'éléments stockées ne sont pas significativement différentes. De même, les variations de stockage d'éléments en solution dans l'eau du sol sont faibles pour un cycle annuel et elles seront négligées.

— Les entrées et les sorties autres que les pluies (ou neiges) et que l'écoulement à l'exutoire doivent être définies. Comme entrées, il faut tenir compte des précipitations sèches, et comme sorties, des exportations sous forme solide (érosion) ou gazeuse, ou encore des sorties « agricoles » (exportations des récoltes ou des troupeaux).

- On a tenté l'évaluation des précipitations sèches en postulant que l'altération chimique est nulle pour Cl et pour S, donc que les précipitations humides et sèches (inconnues) doivent équilibrer les sorties (mesurées) au stockage près dans la biomasse (évaluée). Les valeurs trouvées ne sont appréciables que pour le bassin de résineux ; ailleurs, les valeurs trouvées sont faibles, souvent négatives et sans signi-

Tableau III : Bilans hydrochimiques entrées-sorties : moyennes annuelles correspondant à deux années de mesure (juillet 1981 à juin 1983).

(a) Bassin de pelouse.

(b) Bassin de hêtraie.

(c) Bassin de pessière.

Tous les chiffres sont exprimés en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. La seconde ligne indique les fourchettes d'incertitude.

Input output hydrochemical budgets : annual mean values corresponding to two years of records (from July 1981 to June 1983).

(a) grass land watershed

(b) beech forest watershed

(c) spruce forest watershed.

Tableau III a

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

BASSIN DE PELOUSE

Tableau III b

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

BASSIN DE HETRAIE

Tableau III c

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

BASSIN D'EPICEAS

BILANS COMPARES DES TRANSFERTS D'EAU ET D'ELEMENTS MINERAUX

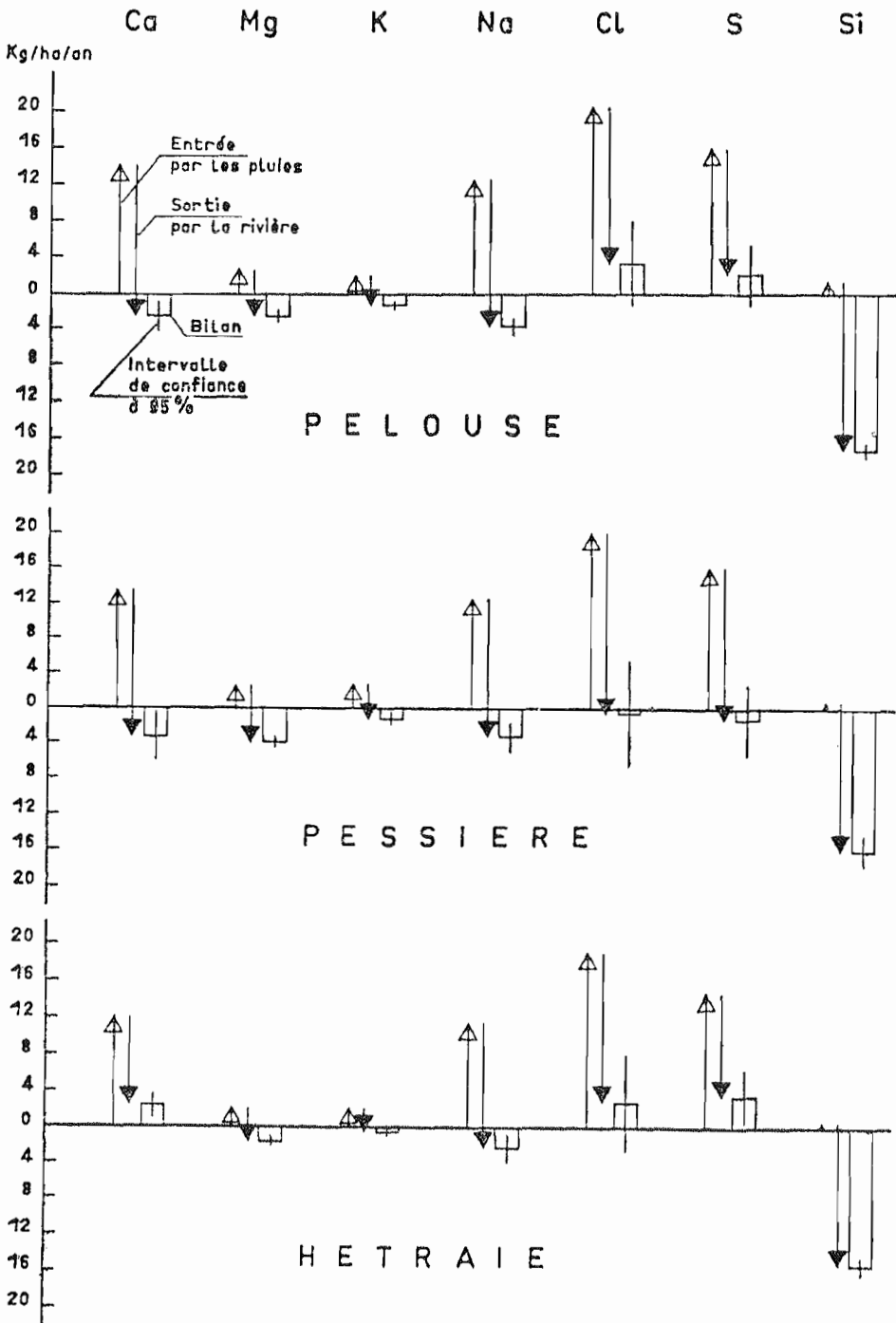


Figure 4 : Représentation des bilans hydrochimiques entrées-sorties et des marges d'incertitude sur les bilans.

Les valeurs sont exprimées en $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ (valeurs moyennes correspondant à deux années de mesure : juillet 1981 à juin 1983).

Hydrochemical budgets with range of error for the three compared watersheds. Values are expressed in $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

fication précise car en deçà de la marge d'incertitude de l'évaluation des termes du bilan. Rappelons que les précipitations pluvieuses et neigeuses, étudiées en détail par DUMAZET-WEDRAOGO (1983), sont de composition chimique très variable dans le temps, mais elles sont toujours acides (pH entre 3,6 et 5,9) et marquées par la dominance des ions H^+ , NH_4^+ , SO_4 — et Cl. On peut supposer que les précipitations sèches ont aussi cette composition

- Les sorties gazeuses concernent principalement l'azote et le carbone (CO_2). Faute de mesure précise, le bilan de ces éléments n'a pas été tenté.

- L'érosion mécanique est difficile à évaluer. D'après les premières observations faites, les transports solides ont lieu surtout sous forme de saltation, essentiellement lors de crues exceptionnelles, et ils concernent des matériaux de tailles variées (sables fins à blocs), dont la composition chimique globale diffère peu de la composition du substrat granitique (DUC, 1984); l'érosion mécanique ne modifierait donc pas beaucoup la composition du sol des écosystèmes. Par contre, l'érosion des litières végétales appauvrit significativement l'écosystème hêtraie en azote et en calcium (SCHALLER, 1982). Le bilan d'altération calculé pour cet écosystème doit donc prendre en compte ces sorties supplémentaires (cf. tableau IV et fig. 5).

Moyennant toutes ces simplifications et hypothèses, l'altération chimique peut être calculée, pour chaque élément, selon l'expression :

$$\text{Altération chimique} = \text{sorties hydrologiques} + \text{autres sorties (exportation par les troupeaux, érosion...)} - \text{entrées atmosphériques} + \text{stockage dans la biomasse.}$$

Pour les éléments dont les flux provenant de l'altération chimique peuvent être considérés comme négligeables (Cl, S, le terme inconnu devient les précipitations sèches, évaluées comme suit :

$$\text{Précipitations sèches} = \text{sorties hydrologiques} - \text{précipitations humides} + \text{autres sorties} + \text{stockage dans la biomasse.}$$

Les valeurs trouvées sont données dans le tableau IV et illustrées sur les figures 5, 6 et 7. Celles-ci représentent respectivement le cycle biogéochimique du calcium, du silicium et du chlore, éléments au comportement relativement bien tranché. Le cycle biogéochimique des autres éléments peut être établi de la même façon à partir des chiffres du tableau IV. On voit sur ces tableaux et schémas :

- que l'altération chimique reste modérée (max. : 12,2 kg/ha/an pour Ca sous la pessière), mais que le contraste d'un écosystème à l'autre est plus fort que d'après les simples bilans entrées-sorties; l'altération sous pelouse, malgré l'humus doux des graminées, paraît presque aussi forte que sous pessière (9,2 kg/ha/an contre 12,2) en relation probable avec l'importance de la lame écoulée. La hêtraie, par contre, est très économe et semble vivre pratiquement sans puiser sur la réserve minérale.
- que Ca, Mg et K, et à un degré moindre Si, sont fortement impliqués dans les cycles biologiques. Ainsi, pour le potassium, l'accumulation de la biomasse annuelle représente dans les écosystèmes forestiers des quantités de matières du même ordre de grandeur que celles fournies par l'altération. Les cycles internes (prélèvements racinaires, pluviolessivats, retombées végétales...) doivent être encore bien plus intenses, malgré la faible productivité de ces écosystèmes : DUMAZET-WERDRAOGO (1983) a montré que les concentrations en solution augmentent fortement des eaux de précipitations aux pluviolessivats (1,5 fois sous hêtraie et 2,5 fois sous pessière) et de celles-ci aux solutions du sol (6 à 12 fois respectivement) avant de revenir dans les eaux de nappe à des valeurs à peine supérieures à celles des eaux incidentes. Il reste à mesurer les débits correspondant à ces différentes catégories d'eau pour quantifier les flux et évaluer ainsi l'importance de ces cycles biologiques internes par rapport aux flux entrant et sortant.
- que certains éléments ont surtout une origine météorique (Cl, S...), d'autres une origine surtout lithique (Si...), le calcium et le potassium sont intermédiaires (moitié météorique, moitié lithique).

BILANS COMPARES DES TRANSFERTS D'EAU ET D'ELEMENTS MINERAUX

Tableau IV : Bilans d'altération annuels moyens, correspondant à deux années de mesure (juillet 1981 à juin 1983).

(a) Bassin de pelouse.

(b) Bassin de hêtraie.

(c) Bassin de pessière.

Pour Cl et S, on postule que l'altération est nulle, ce qui permet d'évaluer les précipitations sèches.

Tous les chiffres sont exprimés en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Annual mean weathering balances, corresponding to two years of records (from July 1981 to June 1983).

(a) grass land watershed

(b) beech forest watershed

(c) spruce forest watershed.

For Cl and S, it is supposed that the weathering of rock mineral = 0; therefore the estimation of dry fallout is possible. All the values are in $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Tableau IV a

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
ENTREES (1)							
Précipitations humides	14,00	2,22	2,54	13,20	21,15	16,63	0,40
Précipitations sèches	0	0	0	0	-2,92	-1,20	0
SORTIES (2)							
Lixiviation	19,63	5,19	4,49	18,87	18,03	15,29	20,50
Fixation par les animaux	0,34	0,01	0,06	0,06	0,04	0,14	ε
Transfert de déjection	1,80	0,20	2,90	0,10	0,16		ε
AUGMENTATION DE STOCK (3)							
Biomasse pérenne (genêts)	1,40	0,90	1,40	1,20	ε	ε	ε
ALTERATION (4)							
= (2) - (1) + (3)	9,17	4,08	5,81	7,03	0	0	20,10

BASSIN
DE
PELOUSE

Tableau IV b

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
ENTREES (1)							
Précipitations humides	12,10	2,00	2,32	11,95	19,63	15,45	0,40
Précipitations sèches	0	0	0	0	-0,94	-3,00	0
SORTIES (2)							
Lixiviation	7,97	3,74	2,60	14,49	18,69	11,95	17,50
Erosion de la litière	1,50	0,10	0,20	0,02	ε	ε	ε
AUGMENTATION DE STOCK (3)							
Biomasse pérenne	4,00	0,80	3,00	1,00	ε	0,50	1,00
ALTERATION (4)							
= (2) - (1) + (3)	1,37	2,64	3,45	3,56	0	0	18,10

BASSIN
DE
HETRAIE

Tableau IV c

	Ca	Mg	K	Na	Cl	S	Si
ENTREES (1)							
Précipitations humides	13,62	2,18	2,51	12,97	20,84	16,45	0,40
Précipitations sèches	ε	ε	ε	ε	4,42	6,32	ε
SORTIES (2)							
Lixiviations	19,86	8,00	3,92	17,42	25,26	20,77	18,40
AUGMENTATION DE STOCK (3)							
Biomasse pérenne	6,00	1,00	5,00	1,00	ε	2,00	2,00
ALTERATION (4)							
= (2) - (1) + (3)	12,24	6,82	6,41	5,45	0	0	20,00

BASSIN
D'EPICEAS

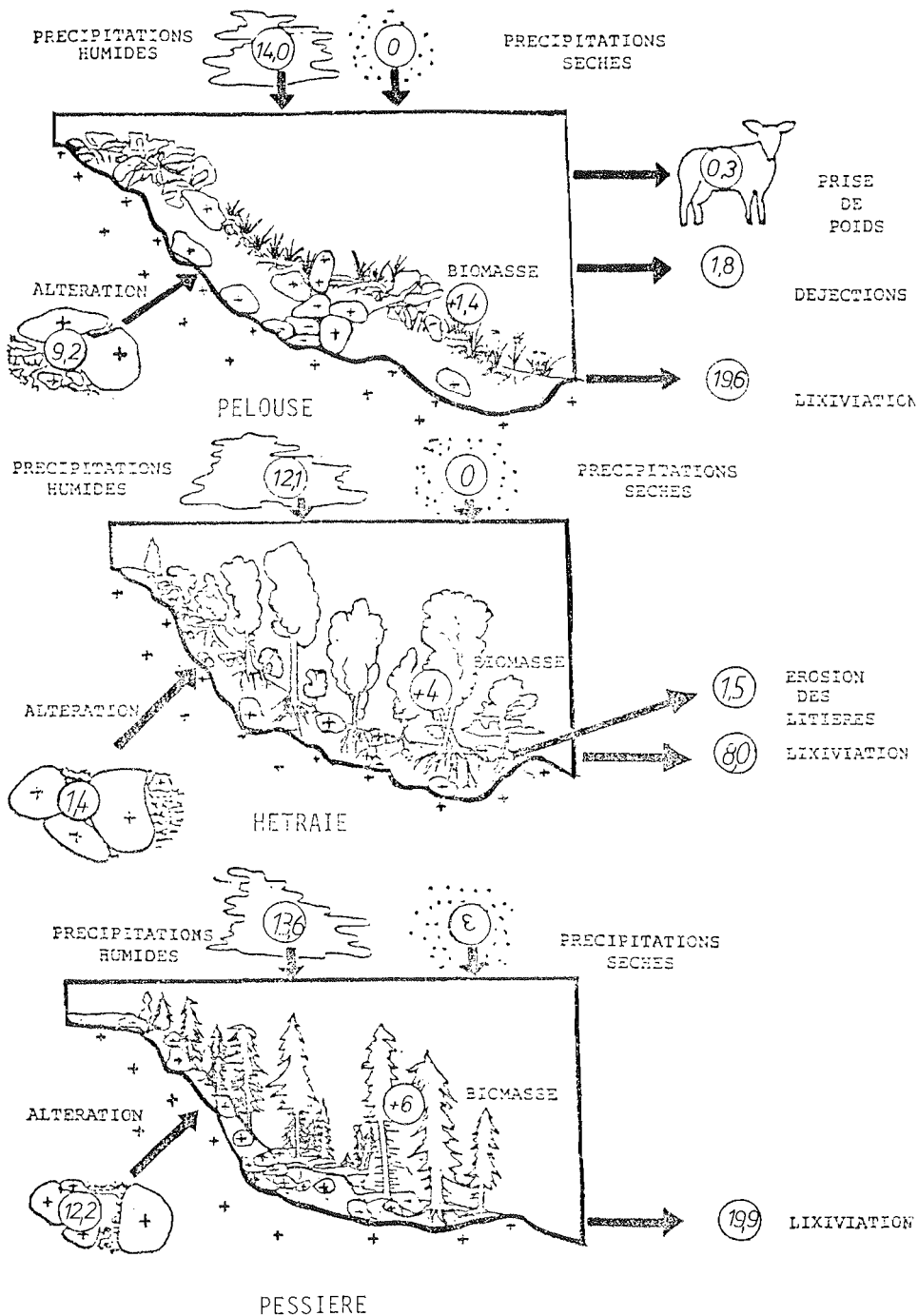
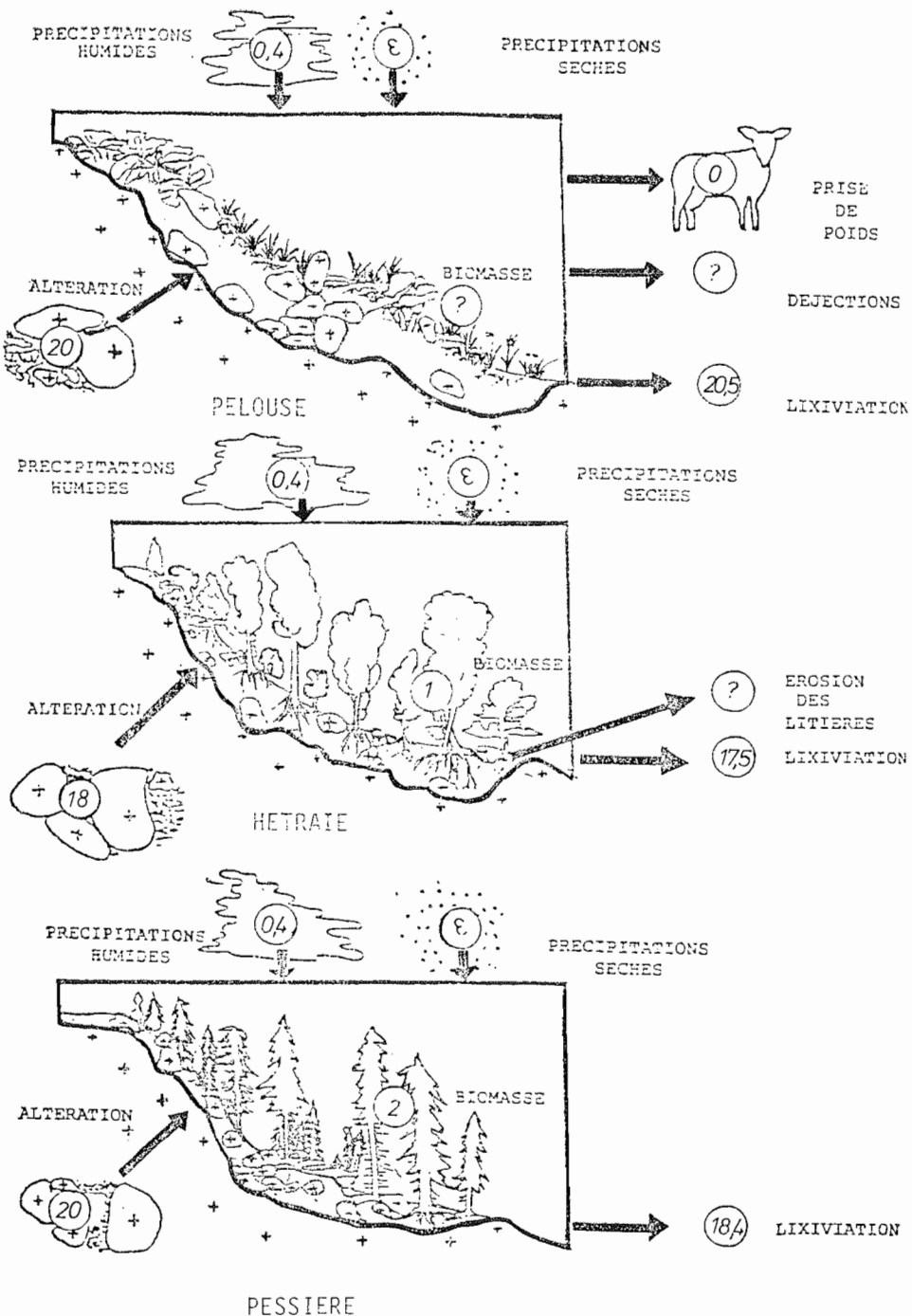


Figure 5 : Cycles biogéochimiques comparés du calcium dans trois écosystèmes du Mont Lozère.

Toutes valeurs sont exprimées en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (valeurs moyennes correspondant à deux années de mesure : juillet 1981 à juin 1983). Pour le principe des calculs, voir texte et tableau IV (figure d'après DUPRAZ, 1984, modifiée).

Comparison of the calcium biogeochemical cycle in the three ecosystems of Mont Lozère. Values are expressed in $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (fig. after DUPRAZ, 1984, modified).



PESSIÈRE

Figure 6 : Cycles biogéochimiques comparés du silicium dans les trois écosystèmes du Mont Lozère.

Toutes valeurs sont exprimées en kg·ha⁻¹·an⁻¹ (valeurs moyennes correspondant à deux années de mesure : juillet 1981 à juin 1983). Pour le principe des calculs, voir texte et tableau IV (figure d'après DUPRAZ, 1984, modifiée).

Comparison of the silica biogeochemical cycle in the three ecosystems of Mont Lozère. Values are expressed in Kg·ha⁻¹·an⁻¹. (fig. after DUPRAZ, 1984, modified).

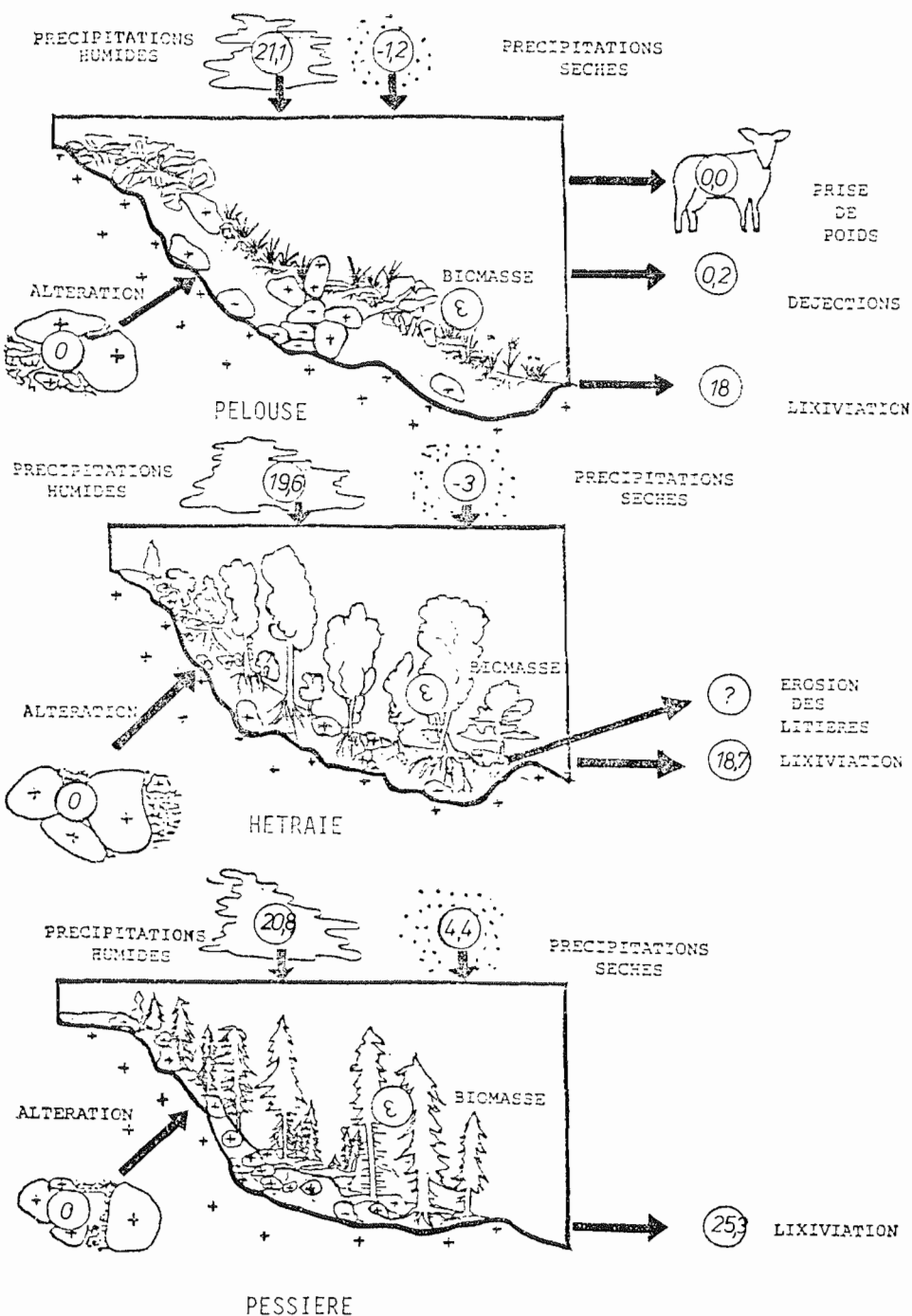


Figure 7 : Cycles biogéochimiques comparés du chlore dans les trois écosystèmes du Mont Lozère.

Toutes valeurs sont exprimées en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (valeurs moyennes correspondant à deux années de mesure : juillet 1981 à juin 1983). Pour le principe des calculs, voir texte et tableau IV (figure d'après DUPRAZ, 1984, modifiée).

Comparison of the chlorine biogeochemical cycle in the three ecosystems of Mont Lozère. Values are expressed in $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. (fig. after DUPRAZ, 1984, modified).

CONCLUSION

L'évaluation comparée des entrées (précipitations) et des sorties (écoulement) à l'échelle de petits bassins versants lithologiquement et bioclimatiquement homogènes permet de chiffrer le **FONCTIONNEMENT GEOCHIMIQUE ACTUEL** d'écosystèmes terrestres, du moins pour les éléments chimiques qui sont mobilisés et déplacés essentiellement en phase aqueuse. Les bilans hydrogéochimiques (entrées-sorties) ainsi obtenus illustrent bien les particularités fonctionnelles de ces écosystèmes, liées aux interactions climat-végétation-sol.

Cette méthode a le double avantage :

- de décrire la dynamique pédologique actuelle et même ses variations saisonnières, voire instantanées (réponses hydrochimiques correspondant aux crues, par exemple) ;
- et d'en donner une image globale, intégrant un volume spatial assez étendu (de l'ordre de l'hectare ou du kilomètre carré) pour être représentatif d'ensembles sols-végétations qui sont toujours plus ou moins différenciés latéralement.

Moyennant certaines hypothèses (état stationnaire des compartiments du sol, par exemple), et certaines évaluations complémentaires (stockage dans la biomasse, importations ou exportations autres que météorologiques ou hydrologiques), on peut en déduire l'intensité de l'altération chimique actuelle. On peut faire ainsi des prévisions sur les variations de réserves minérales du sol et sur l'évolution de la fertilité du sol. L'écosystème hêtraie s'avère le plus économe, mais les pertes supplémentaires mesurées sous peuplement de résineux apparaissent faibles.

La méthode s'applique aussi parfaitement à la quantification des effets hydrologiques et hydrochimiques dus à des perturbations involontaires (précipitations acides, par exemple) ou volontaires (coupes forestières, écobuage, fertilisation...) apportées par l'homme au fonctionnement biogéochimique des écosystèmes naturels. C'est vers les applications, en collaboration avec la Cellule Recherche du Parc National des Cévennes, que le programme des bassins versants comparatifs du Mont Lozère va se tourner dorénavant, dès que le calage de leur fonctionnement hydrochimique naturel sera suffisamment bien établi.

Reçu pour publication : Septembre 1985
 Accepté pour publication : Novembre 1985

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier du PIREN (CNRS) et de l'appui technique et matériel du Parc National des Cévennes d'une part et de l'Office National des Forêts de l'autre.

COMPARED BUDGETS OF WATER AND SOLUTE INPUTS AND OUTPUTS IN THREE SMALL WATERSHEDS WITH CONTRASTED VEGETATION OF MONT LOZERE (FRANCE)

Measurements of water and solute inputs and outputs in three small watersheds covered with distinctive vegetations permit to quantify the effect of the vegetation on the hydrochemical budgets and on the rate of present day weathering.

The approach is simple, the watershed are considered as giant lysimeters for which the mass conservation equation is suitable :

Inputs (atmospheric precipitation + chemical weathering) =

Outputs (discharge) ± stock variations

But the following conditions are to be satisfied :

— The representative watersheds must have exactly the same geological and physiographical characteristics, except vegetation. The three selected watersheds are located on the south slope of Mont Lozere (France), with homogenous granitic basement, and with the distinctive vegetations and areas :

- watersehd 1 (0.81 km²) : grass land,
- watersehd 1 (0.54 km²) : beech forest,
- watersehd 1 (0.19 km²) : spruce forest.

— The water discharge at the exutory must be sampled with variable time intervals to obtain the solute concentrations corresponding to the flood maxima.

— The solute flux calculations must be optimized to reduce the measurement errors, so that small differences of calculate fluxes might be significant.

Following this way, the differences of hydrological and hydrochemical budget and of weathering rates according to the vegetation proved to be marked and significant : e.g. for Ca, Mg and K, the weathering rate seems to be higher in the resinous forest watershed and at a lesser extent in the grass land watershed than in the deciduous forest one.

Similarly the hydrological and hydrochemical impacts of anthropic perturbations (acid rains, land burning, forest clear-cutting, fertilization...) can be quantified.

BIBLIOGRAPHIE

- BONNARD A. (1981). — Comportement hydrologique et hydrochimique de trois bassins versants du Mont Lozère. Rapport de stage de DEA, Univ. d'Orléans.
- BONNEAU M., LACAZE J.-F., LELONG F., LEVY G., NYS C., SOUCHIER B., BRETHERS A. (1977). — Modification de fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs. Compte rendu de fin d'étude. Direction régionale de la Recherche scientifique et technique, 88 p.
- BONNEAU M., BRETHERS A., LELONG F., LEVY G., NYS C. et SOUCHIER B. (1979). — Effets de boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol. Rev. forest. française, XXXI, 3, pp. 198-207.
- BONNEAU M. (1983). — Conséquences des monocultures résineuses et alternatives possibles. Rapport scientifique final. ATP Ecosystèmes, CNRS, 68 p.
- COSANDEY C.H. (1983). — Recherches sur les bilans de l'eau dans l'ouest du Massif armoricain. Thèse doctorat d'Etat, Université de Paris-Sorbonne, 515 p.
- DUC P. (1984). — Essai de quantification des pertes minérales par érosion solide sur le bassin versant des Cloutasses, Mont Lozère (France). Rapport fin d'étude ESEM, Univ. d'Orléans, 54 p.
- DUMAZET-WEDRAOGO B. (1983). — Modification de la charge chimique des eaux au cours du transit à travers trois écosystèmes distincts du Mont Lozère (France). Thèse de 3^e cycle, Univ. d'Orléans, 147 p.
- DUPRAZ C. (1984). — Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétations contrastées (Mont Lozère, France). Thèse doct. ing., Univ. d'Orléans, 363 p. + annexes.
- DUPRAZ C., DIDON J.-F. et LELONG F. (1984 - a). — Les bassins versants expérimentaux du Mont Lozère : premiers résultats sur le rôle hydrologique du couvert végétal. Bull. Hydrogéologie - Géologie de l'ingénieur, 3, pp. 217-226.
- DUPRAZ C., WEDRAOGO-DUMAZET B. et DUBREULE A. (1984 - b). — Echantillonnages adaptés et méthodes de calcul automatique pour l'évaluation de la charge soluble dans les petits bassins versants. Physio-géo, 9, pp. 99-116.
- DUPRAZ C., LELONG F. et BONNEAU M. (1986). — Effets des boisements résineux purs sur l'évolution de la fertilité du sol : les premiers résultats obtenus sur bassins versants expérimentaux du Mont Lozère (Lozère, France). Annales Forestières (sous presse).
- DURAND P. (1985). — Analyse statistique des caractéristiques physico-chimiques des sols des trois bassins versants comparatif du Mont Lozère. Rapport inédit. Labo. de l'Hydrogéologie, Univ. d'Orléans.
- FELLER M.C. et KIMMINS J.P. (1979). — Chemical characteristics of small streams near haney in southwestern British Columbia. Water Resources Research, vol. 15, n° 2, pp. 247-258.

- KREUTZER M.K. (1976). — Effect on growth of next rotation (regeneration). Symp. on the harvesting of or larger part of forest biomass. Vol. III, FAO-CEE-OIT-IURO, Hyvinkas, Finlande, 14-16 juin 1976.
- GASCUEL-ODOUX C., BRANCHARD J.-P. et MEROT P. (1983). — Essai de caractérisation globale et de modélisation du fonctionnement hydrique d'un petit bassin versant. Bull. de l'Ass. fr. pour l'étude du sol, n° 1, pp. 3-14.
- HEWLETT J.D. and TROENDLE C.A. (1975). — Non point and diffused water sources : a variable source area problem. In watershed management, Utah State University, 45 p.
- LELONG F. (1967). — Nature et genèse des produits d'altération des roches cristallines sous climat tropical humide (Guyane française). Thèse Doct. Univ. Nancy et Sci. de la Terre, Nancy, 14, 1969, 188 p.
- LELONG F., SOUCHIER B. (1979). — Les bilans d'altération dans les sols. Méthodes, résultats, perspectives. Sci. du Sol, 2-3, pp. 267-279.
- SCHALLER C. (1982). — Part des transports organiques solides dans l'érosion de trois petits bassins versants à couverture végétale contrastée (Mont Lozère, France). Mémoire fin d'étude EPF Lausanne, 60 p. + annexes.
- TREVISAN D. (1982). — Pédogenèse et typologie des sols de trois bassins versants du Mont Lozère. Rapport DEA Pédologie, Univ. de Nancy, 1, 84 p.

