

UNIVERSITE D'ORLEANS  
U.F.R. FACULTE DES SCIENCES

---

T H E S E

Présentée pour l'obtention du Doctorat de Sciences de la Terre  
de l'Université d'Orléans

par

Patrick DURAND

BIOGEOCHIMIE COMPAREE DE TROIS ECOSYSTEMES  
(PELOUSE, HETRAIE, PESSIERE)  
DE MOYENNE MONTAGNE GRANITIQUE.  
(MONT-LOZERE, FRANCE)

Soutenue le 1er Décembre 1989 devant le Jury suivant :

|             |   |             |
|-------------|---|-------------|
| F. LELONG   | } | Président   |
| M. BONNEAU  |   | Rapporteurs |
| G. BOURRIE  | } |             |
| B. FRITZ    |   |             |
| J.P. LEGROS | } | Examineurs  |
| C. NEAL     |   |             |
| F. RODA     |   |             |
| C. DUPRAZ   |   |             |

## REMERCIEMENTS

Les bijoux les plus précieux de toute entreprise humaine sont les qualités des hommes et des femmes qu'elle nous permet de découvrir, et à ce titre plus qu'à tout autre, ce travail m'a beaucoup enrichi. Que chacun trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

-C'est M. François LELONG qui m'a permis de participer à l'aventure des Bassins-versants du Mont-Lozère, et il a été ensuite un directeur de thèse ayant su doser l'exigence et l'indulgence, les encouragements et la patience.

-Rien de ce qui est rapporté ici n'aurait été possible sans la passion et l'acharnement de Jean-François DIDON-LESCOT, qui oeuvre sans relâche pour le maintien et le bon fonctionnement de ce programme. Que chaque mot de ce mémoire lui porte témoignage de mon amitié.

-Derrière une grande partie des résultats analytiques qui forment le squelette de ce document se cache le travail patient et soigné de Gilles DROUET, dont la chaleureuse hospitalité m'est toujours allée droit au coeur.

-C'est grâce au prodigieux travail de Christian DUPRAZ qu'existent les bassins du Mont-Lozère, et ce fut un réel plaisir de partir sur de telles bases. Je lui dois mes progrès à marche forcée en informatique et ses conseils et son soutien amical m'ont sorti de bien des impasses.

-Ce travail a été soutenu financièrement par le programme DEFORPA, et son directeur, M. Maurice BONNEAU, m'a fait l'honneur de le juger.

-Le SRETIE (ministère de l'environnement) m'a également fourni des moyens de travail grâce à l'intérêt porté à nos travaux par MM CHABASSON et MULLER.

-Par sa relecture scrupuleuse du manuscrit, par ses conseils avisés et ses critiques affûtées, Guilhem BOURRIE, de l'INRA de RENNES, a beaucoup contribué à cette version définitive.

-Les rencontres avec l'équipe du Bassin-versant d'Aubure, B. AMBROISE, E. DAMBRINE, B. FRITZ, A. PROBST et D. VIVILLE ont toujours été amicales et très riches d'enseignements.

-J.P. LEGROS m'a fourni une aide précieuse dans les tâtonnements des débuts comme dans les peaufinages de la fin, avec compétence et bonhomie.

-Ferràn RODA et Anna AVILA de Barcelone, Colin NEAL de Wallington et Jan MULDER de Wageningen m'ont montré le visage d'une recherche européenne fraternelle et pleine d'avenir.

-Les géographes du CNRS de Meudon, P. BERNARD-ALLEE, C. COSANDEY, T. MUXART, B. VALADAS, P. MIELLET et V. SCHMITT m'ont apporté une autre vision d'un terrain que je croyais connaître, et leurs séjours à Gourdouze me furent très agréables.

-Grâce à P. RIBSTEIN (ORSTOM MONTPELLIER) et R. GONZALES

(Univ. ORLEANS), j'ai gagné un temps précieux dans le choix et l'utilisation des logiciels.

-Lors de mes passages à Orléans, j'ai pu apprécier la gentillesse et la compétence de M. LEPILLER, S. CASSAULT, P.H. MONDAIN, MMes HUE et FERRAND.

-Le Parc National des Cévennes m'a fourni hébergement, voiture, accueil administratif et une multitude d'aides en tous genres qui furent indispensables à la poursuite de mon travail. Puisqu'il m'est impossible de tous les citer, je charge Raymond DEJEAN, qui fut un interlocuteur passionné et chaleureux, de remercier ses collègues pour leur patience et leur compréhension.

-Les nombreux étudiants ayant travaillé sur le Mont-Lozère furent de bons compagnons et d'excellents collaborateurs, en particulier J.M. DAUGE, P. DUC, A. CABURET, D. BOUDJEMLINE, C. VANNIER, F. GUERIN, H. CHRETIEN.

-MM. FONTON et CHAMBON, de l'ONF, M. BRES de La Vialasse et M. VIENNOT des Urfruits nous ont laissé nous amuser sur leurs domaines en toute impunité, et j'espère que nos résultats pourront leur être de quelque utilité.

-Yves PELLEQUER, habitant permanent de La Vialasse, ne fut pas seulement un précieux auxiliaire de terrain, ni le seul être humain à qui parler dans la solitude des hivers lozériens. Son amitié fut un soutien des plus précieux.

-Rien de tel qu'un refuge solitaire pour réellement rencontrer les gens. Merci à tous ceux, stagiaires, objecteurs, visiteurs, touristes, qui m'ont empêché de devenir un vieux sanglier solitaire par la chaleur de leur présence, et particulièrement à Bertrand, Viviane, Michel, Sylvie, Gaby, Laurent, Marianne, Eric, Remy, Alain, Chantal, Bruno...

A Anna pour sa patience et son courage, à Youri dont les premiers sourires ont ensoleillé mes derniers efforts.

## ABSTRACT:

### COMPARED BIOGEOCHEMISTRY OF THREE GRANITIC MIDDLE-MONTANE ECOSYSTEMS (GRASSLAND, BEECH AND SPRUCE FORESTS) (MONT-LOZERE, FRANCE)

Based on 7 years of hydrochemical data from three small watersheds with contrasting vegetation and two years of throughfall and soil water analysis in four forest stands, this study aims at precisising the atmospheric input level and its effects on the ecosystems, especially in terms of acidification of soils and mineral stocks dynamics.

The soils of the area are not very different from one type of vegetation to another. They are coarse-textured, humic (10% of organic matter in the A1 horizon), and are lacking in cations (total exchangeable cations  $\approx 1 \text{ meq}/100\text{g}$ ). Thanks to their high permeability, nearly all the water flows through the rhizosphere and granitic sand, but their water reserve is low (50 to 100mm).

The input by bulk precipitation is heavy due to a high rainfall (1950mm) and a strong rate of sea salts (30% of the total charge), but poorly acidic (mean pH of 4.87).

Dry deposition still remains badly known, but seems to be two times greater in spruce forest than in beech forest. Thus, for 20kg/ha/yr of sulfur input by bulk precipitation, dry deposition would equal 10kg/ha/yr on beech and 20kg/ha/yr on spruce.

On the whole, atmospheric inputs represent about 50% of total proton sources in these ecosystems.

The pH of soil water at the bottom of the A1 horizon is however equal to or higher than the soil pH, and alkalinity increases quickly without drastic leaching of cations.

Input-output budgets of the basins exhibit moderate losses of cations and silica (less than 5kg/ha/yr of Ca, Mg and Na, less than 2kg/ha/yr of K, and about 15kg/ha/yr of Si). They are a little greater in spruce and grassland catchment than in beech catchment.

We notice also a heavy accumulation of S (between 10 and 15kg/ha/yr, at least), that means an important proton sink, but also a long-dated threat of acidification of soils.

These trends can be modified by climatic stresses (long droughts are followed by phases of cations and sulfate leaching) or by human activities (the recent clearcutting of the spruce forest involved a strong increase of acidity due to the mineralization of organic pools, and therefore a drastic increase of nitrate and cations losses).

These results and the remaining uncertainties justify in carrying on the study of these nearly undisturbed sites, very sensitive to natural or anthropogenic perturbations.

**KEY WORDS:** ACIDIFICATION, ATMOSPHERIC INPUT, HYDROCHEMICAL BUDGETS, PROTONS BUDGETS, WATERSHEDS, SPRUCE, BEECH, SULPHUR, GRANITE.

## RÉSUMÉ:

### BIOGEOCHIMIE COMPARÉE DE TROIS ECOSYSTEMES (PELOUSE, HETRAIE, PESSIERE) DE MOYENNE MONTAGNE GRANITIQUE (MONT-LOZERE, FRANCE)

Ce travail basé sur 7 ans de suivi hydrochimique de trois petits bassins-versants à végétation contrastée, et deux ans d'étude des pluviollessivats et des eaux du sol de quatre stations forestières, vise à préciser le niveau des apports atmosphériques et leurs effets sur les écosystèmes, plus particulièrement en terme d'acidification des sols et de dynamique des réserves minérales.

La couverture pédologique des sites est peu différente d'un type de végétation à l'autre, et se compose de sols à texture grossière, très humifères (10% de matière organique dans l'Al), acides ( $4.3 < \text{pH}_{\text{eau}} < 5.1$ ), pauvres en cations (Somme des bases échangeables  $\approx 1 \text{ meq}/100\text{g}$ ). Leur forte infiltrabilité permet à la quasi-totalité des eaux de transiter par la rhizosphère et l'arène, mais leur réserve utile est faible (50 à 100mm).

Les apports atmosphériques en solution sont abondants du fait d'une lame d'eau incidente élevée (1950mm) et d'une forte contribution des sels marins (30% de la charge totale), mais peu acides (pH moyen de 4,87).

Les apports occultes sont encore mal connus, mais semblent deux fois plus forts dans la pessière que dans la hêtraie. Ainsi pour 20kg/ha/an de soufre apporté par les pluies, il s'en déposerait 10kg/ha/an supplémentaires sur les hêtres et 20kg/ha/an sur les épicéas. Au total les apports atmosphériques représentent environ 50% de l'ensemble des sources de protons.

Cependant, à la base de l'horizon holorganique, le pH des eaux gravitaires est égal ou supérieur à celui du sol, et leur alcalinité croît rapidement, sans qu'il y ait de lixiviation importante de cations.

Les bilans entrées-sorties des bassins versants montrent des pertes en cations et en Silice limitées (moins de 5kg/ha/an de Ca, Mg et Na, moins de 2kg/ha/an de K et environ 15kg/ha/an de Si). Elles sont légèrement plus fortes dans les bassins en épicéas et en pelouse que dans la hêtraie.

On observe aussi une forte accumulation de soufre (entre 10 et 15kg/ha/an, au minimum), qui représente un important puits de protons, mais aussi un risque d'acidification des sols à plus longue échéance.

Ce comportement peut être modifié par les stress climatiques (les sécheresses accentuées sont suivies de phases de lixiviation de cations et de sulfates) ou par l'action de l'homme (la récente coupe rase de la pessière a entraîné une forte augmentation de l'acidité par minéralisation des pools organiques des sols, d'où une forte augmentation des exportations de nitrates et de cations.).

Les résultats obtenus actuellement et les incertitudes qui subsistent justifient la poursuite de l'étude de ces sites en tant que milieux peu exploités, très sensibles aux perturbations d'origine naturelle ou anthropique.

MOTS CLES: ACIDIFICATION, APPORTS ATMOSPHERIQUES, BILANS HYDROCHIMIQUES, BILANS DE PROTONS, BASSINS-VERSANTS, HETRE, EPICEA, GRANITE.

\*\*\*\*\*  
\*\*\* SOMMAIRE \*\*\*  
\*\*\*\*\*

INTRODUCTION

1.1. OBJECTIFS.PRESENTATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE.

1.2. MÉTHODES

1.2.1. Bilans entrées-sorties de bassins-versants.

1.2.2. Les entrées atmosphériques

1.2.3. Effets de l'acidité d'origine atmosphérique sur le sol

1.3. PRESENTATION DES SITES

1.3.1. Situation, physiographie, Climat

1.3.2 Substrat rocheux

1.3.3 Sols et formations superficielles: voir chap. I

1.3.4 Végétation

1.4. MÉTHODES ANALYTIQUES

1.4.1 Vérifications internes à l'équipe.

1.4.2 Calibration inter-laboratoires.

1.4.3 Utilisation de la balance ionique

1.4.4. conclusion sur les analyses

I.5. MOYENS STATISTIQUES ET INFORMATIQUES

CHAPITRE I. LES SOLS DES BASSINS-VERSANTS

I.1. APERCU GÉOMORPHOLOGIQUE

I.2. PRÉSENTATION PÉDOGÉNÉTIQUE ET MORPHOLOGIQUE

I.3. CHIMIE DES SOLS

*I.3.1 Matière organique*

*I.3.2 pH, Aluminium échangeable*

*I.3.3 garniture du complexe adsorbant*

*I.3.4 Autres paramètres*

I.4. PROPRIÉTÉS HYDRIQUES

I.4.1 réserve utile

*I.4.2. infiltrabilité et naissance du ruissellement*

*I.4.3 conclusion*

I.5. CONCLUSION

## CHAPITRE II. LES ENTREES ATMOSPHERIQUES ET LEUR DEVENIR DANS LE SOL

### II.1. LES FLUX HYDRIQUES

- II.1.1 Introduction: Un pays d'extrêmes
- II.1.2 Le réseau pluviométrique
- II.1.3 Le régime des pluies
- II.1.4 Les flux hydriques sous couvert forestier

### II.2. LES FLUX CHIMIQUES

#### II.2.1 LES APPORTS HORS COUVERT

- II.2.1.1 Données disponibles
- II.2.1.2. La composition chimique des pluies
  - II.2.1.2.1 *Variations temporelles et saisonnières*
  - II.2.1.2.2. *Relations Hauteur-Concentrations*
    - a) à l'échelle de l'épisode
    - b) à l'échelle annuelle
  - II.2.1.2.3 *Relations entre éléments*
    - a) *Généralités*
    - b) *La composante marine des pluies*
    - c) *L'acidité de la pluie et les apports anthropiques*
  - II.2.1.2.4. *Comparaison avec les pluies sans poussières*
- II.2.1.3. Les flux hydrochimiques hors couvert
  - II.2.1.3.1. *Méthode de calcul et erreurs*
  - II.2.1.3.2. *Résultats*

#### II.2.2. LES APPORTS SOUS COUVERT

- II.2.2.1. Données disponibles
- II.2.2.2 Généralités
  - II.2.2.2.1. *Variations temporelles et saisonnières*
  - II.2.2.2.2 *Relations entre éléments*
- II.2.2.3. Les flux sous couvert et les dépôts occultes
  - II.2.2.3.1 *Méthode de calcul et incertitude*
  - II.2.2.3.2 *Résultats (Tab. II.2.10 et Fig. II.2.11)*

### II.3 LES EAUX DU SOL

- II.3.1 introduction et justification des choix adoptés
- II.3.2 Composition chimique des eaux du sol
  - II.3.2.1 les eaux gravitaires
    - II.3.2.1.1 *généralités*
    - II.3.2.1.2 *Les relations entre éléments*
  - II.3.2.2 les eaux liées
    - II.3.2.2.1 *Comparaison des deux méthodes d'extraction*
    - II.3.2.2.2 *Résultats*
- II.3.3 Synthèse et estimation des flux à 20cm.

## CHAPITRE III. LES FLUX ECOULES ET LES BILANS DES BASSINS-VERSANTS

### III.1 LES VOLUMES D'EAUX ECOULES

- III.1.1. Rappels sur les moyens de mesure
- III.1.2 Généralités
- III.1.3. Lames d'eau et déficit d'écoulement
- III.1.4 Conclusions

### III.2. LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE RIVIERES

- III.2.1 Données disponibles
- III.2.2 Généralités
- III.2.3 Variations des concentrations avec les débits.
- III.2.4 Variations temporelles et saisonnières
- III.2.5 Relations entre éléments

### III.3. LES BILANS ENTREES-SORTIES

- III.3.1. Evaluation des flux exportés
- III.3.2 Bilans entrées-sorties annuels
  - III.3.2.1 Sept années de bilans
  - III.3.2.2. Prise en compte des dépôts occultes
- III.3.3. Les bilans mensuels
  - III.3.3.1 tendances générales
  - III.3.3.2 Variations en fonction des aléas climatiques
- III.3.4 CONCLUSION

## DISCUSSION

### A. PROFILS DE CONCENTRATIONS

- a. Cas de la hêtraie*
- b. La pessière "saine"*
- c. La pessière déperissante*
- d. synthèse*

### B. LES BILANS DE PROTONS

- a. Mode de calcul*
- b. interprétation*

## CONCLUSION GENERALE

### A. RÉCAPITULATIF: SITUATION DES TROIS ÉCOSYSTÈMES SUR LE CHEMIN DE L'ACIDIFICATION ET SCÉNARIOS POSSIBLES

### B. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

## INTRODUCTION

### i.1. OBJECTIFS.PRESENTATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE.

Le programme de recherche "Bassins-versants du Mont-Lozère" a vu le jour en 1981, dans le cadre du programme PIREN (CNRS) "forêts". Piloté par le Laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Orléans (UA 724 du CNRS), il a bénéficié de la collaboration de nombreux organismes et équipes de recherche: Parc National des Cévennes, Office National des Forêts, ENGREF, ORSTOM, CEMAGREF, UA 141 du CNRS, etc. Il est intégré dans le programme national DEFOR-PA (DEpérissement FOrestier attribué à la Pollution Atmosphérique) et dans le réseau français des bassins-versants représentatifs et expérimentaux.

Son premier objectif fut d'évaluer l'impact de l'enrésinement en zone montagnarde sur la réserve minérale des sols, à partir d'une approche à l'échelle du paysage, en comparant trois petits bassins-versants différant essentiellement par la végétation qui les recouvre: une plantation d'épicéas, un taillis de hêtre et une pelouse pâturée. La première phase de cette étude a permis dans une large mesure de répondre à cette question, et a confirmé l'intérêt de ce type d'approche à bien des égards (DUMAZET, 1983, DUPRAZ, 1984):

-D'un point de vue fondamental, il s'agit d'une approche très synthétique de l'écologie d'écosystèmes peu perturbés, bien adaptée pour étudier les tendances actuelles de leur dynamique biogéochimique. De nombreux programmes ont été et sont menés dans un esprit analogue dans le monde (LIKENS et al., 1977, JOHNSON et SWANK, 1975, FELLER et KIMMINS, 1979, FOSTER, 1978, PACES, 1982, RODA, 1983, etc.), ce qui permet des comparaisons très fructueuses.

-D'un point de vue plus appliqué, on a là un outil pour suivre de façon synchrone et en vraie grandeur la réponse d'un milieu donné à un stimulus *sensu lato*, que ce soit un facteur de stress (fluctuations climatiques, coupe forestière, feu, pollution...), ou une intervention destinée à accroître sa productivité (irrigation, fertilisation), voire les deux à la fois (changement d'essence forestière par exemple) (RAPP, 1983, VITOUSEK, 1983, PACES, 1986, SWANK et DOUGLASS, 1985...).

Mais ce premier volet du programme a également soulevé un grand nombre de questions et d'autres préoccupations sont venues s'ajouter au premier sujet de recherche. Ainsi la pessière a été victime d'une attaque parasitaire qui a entraîné sa coupe à blanc, dont les effets physiques (éro-

sion des sols) et hydrogéochimiques sont en cours d'étude. D'autre part, la mise en évidence de dépérissements forestiers dans l'hémisphère Nord, en liaison probable avec la dégradation de la qualité de l'air et des eaux météoriques (les fameuses "pluies acides" que le grand public a découvert au début des années 80), a fait du site du Mont-Lozère un lieu intéressant pour étudier d'une part, le "bruit de fond" de la pollution atmosphérique (étant éloigné des foyers principaux de pollution), et d'autre part le fonctionnement d'écosystèmes peu touchés par les symptômes du "mal des forêts". Il joue donc le rôle, dans le cadre du programme DEFORPA, de témoin par rapport au bassin-versant d'Aubure, installé dans les Vosges en zone dépérissante, et suivi de manière comparable.

Le présent travail s'inscrit dans ce cadre général (dont on trouvera la liste complète des publications en annexe) avec un triple objectif:

- 1-Mise à jour des connaissances sur le fonctionnement hydrogéochimique des bassins, après sept années de suivi, les cinq premières constituant en quelque sorte l'état initial avant le début de manipulation du bassin en épicéas.
- 2-Essai de caractérisation des flux chimiques entrants d'origine atmosphérique, sous forme soluble ou non soluble (dépôts occultes).
- 3-Tentative d'identification des effets de ces entrées sur le sol, avec au préalable une synthèse des études pédologiques menées sur le site.

## 1.2. MÉTHODES

### 1.2.1. Bilans entrées-sorties de bassins-versants.

On se contentera ici d'un bref rappel de l'esprit de ce type d'approche.

Les bassins-versants sont considérés comme des "mégalysimètres" pour lesquels on établit une comptabilité des flux hydriques et chimiques entrants et sortants. Dans le cas de bassins-versants *comparatifs*, on suit simultanément le comportement de plusieurs bassins différant essentiellement par le facteur dont on veut étudier l'effet (ici, la végétation). Dans le cas de bassins-versants *expérimentaux*, le suivi se fait avant et après l'intervention (ici, la coupe forestière). Le dispositif du Mont-Lozère est donc mixte, la comparaison des trois bassins-versants à végétation contrastée se croisant avec l'étude des modifications de la pessière avant et après la coupe.

Le principal intérêt de ce type d'approche réside dans le fait que l'on travaille à l'échelle d'une unité naturelle de paysage: ainsi, le système étudié est relativement bien défini, et possède des limites aussi peu arbitraires que possible; d'autre part, son étendue permet une intégration des phénomènes et l'on s'affranchit en partie des problèmes d'hétérogénéité spatiale et de représentativité de

la station étudiée.

Mais les contraintes et les limitations sont nombreuses. On ne peut isoler parfaitement l'effet du facteur à étudier des autres différences entre les bassins, inévitables même en choisissant des sites très voisins. Ce choix est en outre soumis à la nécessité d'un bon contrôle des entrées et des sorties (substrat imperméable, limites hydrologiques nettes, exutoire bien fermé, etc.)

Un tel suivi est assez lourd, les sources d'erreurs et les paramètres difficilement mesurables sont nombreux, et seules les longues chroniques apportent des résultats réellement fiables.

Enfin, cette approche de type "boîte noire" ne permet pas d'appréhender les échanges internes au système, soit entre compartiments (végétation/sol ou sol/substrat p. ex.), soit entre différents points (migrations verticales ou latérales dans les sols p. ex.).

Cette dernière difficulté peut être partiellement contournée de diverses façons. En restant à l'échelle du bassin-versant, en utilisant un modèle à compartiments et en appliquant à chacun la formule:

Entrées-sorties = variations de stock

on peut quantifier certains processus, tels que l'altération chimique du substrat (DUPRAZ, 1984, LELONG et al, 1987, PACES, 1985, BOUCHARD, 1986, VELBEL, 1985...). On est toutefois obligé pour cela d'extrapoler le résultat de mesures ponctuelles dans le temps et l'espace (immobilisation dans la biomasse, garniture cationique des sols, ...) à l'ensemble du bassin et de la période considérée. On peut aussi compléter le suivi du bassin par des études stationnelles des transferts internes. Il se pose alors également le problème de la représentativité des stations choisies, mais cette approche est mieux adaptée à la comparaison de la dynamique des phénomènes aux deux échelles considérées. Elle a été adoptée ici pour l'étude des apports atmosphériques et de leurs effets sur le sol.

#### i.2.2. Les entrées atmosphériques

Avec le développement des études sur les effets de la pollution sur les écosystèmes terrestres, il est apparu que l'on pouvait distinguer quatre types de transferts de l'atmosphère vers le sol ou la végétation (d'après RODA, 1983)(\*):

(a) précipitations humides: les éléments chimiques sont apportés sous forme généralement très diluée, dans l'eau de pluie (ou assimilé: grêle, neige).

(b) sédimentation: il s'agit du dépôt, principalement sous l'action de la gravité, de particules surtout solides (taille >20µm).

(\*) N.B.: cette classification sommaire ne concerne que les modalités d'apports aux écosystèmes, et non l'origine, la formation et le transport des différents éléments.

(c) fixation d'aérosols: le "moteur" de ce type d'apport non gravitaire est constitué par les turbulences de l'air provoquant l'impact de petites particules ( $<20\mu\text{m}$ ) sur des surfaces passives.

(d) transferts gazeux: Ici les modalités peuvent être variables: fixation biologique, mise en solution par augmentation de la pression partielle, "sorption" dans les stomates des végétaux, etc.

Les apports de type a et b sont assez facilement mesurables (collecteurs en entonnoirs ouverts en permanence ou à ouverture et fermeture en fonction des averse), bien que leur variabilité spatiale en qualité et en quantité puissent être parfois élevée. Les choses se compliquent avec les deux autres catégories, car alors l'intensité du flux dépend des caractéristiques physiques et biologiques du récepteur. C'est pourtant en quantités non négligeables que les polluants arrivent sous ces formes, en particulier dans les frondaisons forestières, qui semblent être à cet égard des capteurs efficaces. Dans ce cas il est très difficile de discerner ce qui est importé et ce qui est d'origine locale: récrétion foliaire, lixiviation des constituants des tissus végétaux et des déchets des animaux présents sur les feuilles.

Les modifications de la composition chimique de la pluie après son passage dans la canopée résultent donc du jeu de nombreux phénomènes, et les tentatives faites pour quantifier leur importance relative sont encore peu sûres. Mais leur étude demeure quand même la méthode la plus simple à mettre oeuvre pour estimer la totalité des entrées, et offre l'intérêt de nous renseigner sur la composition des eaux arrivant au sol, et de permettre de discuter de leurs effets sur celui-ci.

### 1.2.3. Effets de l'acidité d'origine atmosphérique sur le sol

Dans un écosystème naturel, les sources d'acidification sont multiples: assimilation de cations par la végétation, production d'acides organiques, nitrification, déprotonation de l'acide carbonique, etc. (PACES, 1985, VAN BREEMEN et al, 1984, BINKLEY et RICHTER, 1987).

Lorsque l'acidité incidente provenant de l'atmosphère augmente, comme cela a été le cas durant le dernier siècle dans la majeure partie de l'hémisphère Nord, les réactions qui consomment des protons sont favorisées: solubilisation des cations par altération des minéraux ou à partir du complexe adsorbant des sols, insolubilisation d'anions, etc.

Les bilans de bassins-versants permettent de contrôler dans un premier temps si les phénomènes se compensent entièrement (et donc s'il n'y a pas d'acidification des eaux de surface), et si cet équilibre ne s'établit pas au prix d'une dilapidation de la réserve minérale globale du système.

Mais il est aussi important de rechercher à quel niveau et dans quelles conditions cette acidité supplémentaire est neutralisée, pour pouvoir répondre aux questions suivantes:

-Les végétaux sont-ils susceptibles d'en souffrir?

Rappelons que le dépérissement des forêts observé durant la dernière décennie dans l'hémisphère Nord, dont les principaux symptômes sont des pertes foliaires et des jaunissements de feuillage, s'est surtout développé sur des peuplements installés sur sols pauvres, dans des régions où les niveaux de pollution ne sont pas forcément très élevés. Il semble dû en grande partie à des déficiences nutritionnelles en Magnésium et parfois en Potassium, dont les causes sont vraisemblablement multiples: pauvreté du substrat accentuée par une longue exploitation sylvicole sans fertilisation et/ou par la lixiviation résultant de l'acidification des sols, stress hydrique, mycorrhization insuffisante, pathogènes racinaires, toxicité aluminique. A cela s'ajouterait un effet direct des polluants atmosphériques gazeux (ozone, SO<sub>2</sub>, PAN...) sur les parties aériennes des arbres, conduisant à des désordres métaboliques et à une destruction de la cuticule des feuilles (d'après DEFORPA, 1989 et UIFRO, 1989). Si le "front d'acidification" se situe en dessous de la rhizosphère, il peut donc en résulter des déséquilibres dans la microflore des sols, des pertes en nutriments par lixiviation et une augmentation des teneurs en Aluminium soluble, ce qui peut déterminer l'apparition des symptômes de dépérissement même en l'absence de fortes teneurs en polluants.

-Quels sont les risques à long terme et les chances de réversibilité en fonction des divers scénarios possibles pour le futur (diminution, poursuite ou augmentation des émissions de polluants) (BARTH, 1987, HAUHS et WRIGHT, 1988)? Cela dépend de l'état actuel des sols, de la dynamique et de la nature des processus d'acidification et de neutralisation.

Il était donc naturel de faire ici le point des connaissances acquises depuis huit ans sur les caractéristiques de la couverture pédologique des trois bassins étudiés, et de compléter le suivi entrées-sorties par un essai de caractérisation des flux internes aux écosystèmes.

### 1.3. PRESENTATION DES SITES

la zone d'étude, située sur le versant Sud du Mont-Lozère (SE du Massif-Central, (fig.1) a vu son extension varier en fonction des sujets abordés:

-Depuis 1981, sont équipés trois petits bassins-versants ("Les Cloutasses" (pelouse), "La Sapine" (hêtraie) et "La Latte" (pessière) pour des mesures climatiques, hydrologiques et hydrochimiques.



| Nom local            | 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 <sup>2</sup> |
|----------------------|---------------|--------------------|----------------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| Valat de la Sapine   | 54            | 1270               | 1160-1395            | N → S       | 18                        | 15                          | 750                 | 1,39                                   |
| Valat de la Latte    | 19,5          | 1421               | 1340-1495            | NE → SW     | 20                        | 17                          | 210                 | 0,95                                   |
| Valat des Cloutasses | 81            | 1386               | 1290-1495            | N → S       | 10                        | 8                           | 1825                | 2,43                                   |

Tableau 1: Principales caractéristiques physiographiques et recouvrement des formations végétales des bassins-versants (in DUPRAZ, 1984)

| VALAT DE LA SAPINE   | VALAT DE LA LATTE                                       | VALAT DES CLOUTASSES   |
|--|---|--|
| <i>Fagus sylvatica</i> L.<br>(taillis) ..... 80 %                | <i>Picea excelsa</i> Lx.<br>(futaie équienne) 80 %      | <i>Festuca</i> sp.<br><i>Nardus stricta</i> L.<br>(Pelouse) ..... 60 % |
| <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull<br>(Lande) ..... 15 %          | <i>Pinus montana</i> Mill. ...<br>..... 5 %             | <i>Plantago recurvata</i> L.<br>(Pelouse) ..... 15 %                   |
| <i>Cytisus purgans</i> (L.) Benth<br>(Lande) ..... 3 %           | <i>Abies alba</i> Mill.<br>(Fourré) ..... 1 %           | <i>Fagus sylvatica</i> L.<br>(Bosquet) ..... 5 %                       |
| <i>Sarothamnus scoparius</i> (L.)<br>Wimmer<br>(Lande) ..... 2 % | <i>Fagus sylvatica</i> (L.)<br>(Taillis) ..... 1 %      | <i>Pinus montana</i> Mill. ...<br>..... 5 %                            |
|  | <i>Cytisus purgans</i> (L.) Benth<br>(Lande) ..... 12 % | <i>Cytisus purgans</i> (L.) Benth<br>(Lande) ..... 10 %                |
|  | Tourbière ..... 1 %                                     | Tourbière ..... 5 %  |

-de septembre 1981 à juillet 1982, deux placettes de collecte de pluviollessivats ont été installées l'une dans le bassin en hêtre, l'autre dans le bassin en épicéas. Ces placettes ont été reprises à partir de juillet 86 pour cette étude, et ont été équipées une autre station sous hêtre (août 86), puis une nouvelle dans un autre peuplement d'épicéas dit "des Urfruits" (juillet 87), ceci en raison de la prochaine disparition des épicéas de La Latte.

-de août 84 à septembre 85, un petit bassin-versant de 9ha, situé à 6km à l'Est des Cloutasses a été équipé sommairement pour le suivi hydrochimique d'un écobuage (mise à feu de la lande à des fins pastorales) (DAUGE, 1986).

-Sur la même période, extension des mesures pluviométriques à tout le quart Sud-Est du Mont-Lozère (DIDON, 1985).

-Sporadiquement, mesures hydrochimiques en étiage estival sur les cours d'eau des massifs granitiques du Sud-Est du Massif-Central, pour évaluer la représentativité des bassins-versants dans le contexte régional (DUMAZET, 1983, FA-RAH, 1988).

Ces sites ayant été présentés dans le détail dans les travaux précédents, nous nous contenterons ici d'en rappeler les caractéristiques principales.

#### i.3.1. Situation, physiographie, Climat

Le tableau 1 résume les caractéristiques physiographiques des bassins-versants. Le Mont-Lozère est un massif d'altitude moyenne, culminant à 1700m, limité, surtout au Sud, par des versants abrupts, les terres au dessus de 1000m présentant des formes plus arrondies. Il est au carrefour des influences méditerranéennes, océaniques et montagnardes, d'où un climat assez froid (température moyenne annuelle de 6,5°C à La Vialasse (1300m), de 1981 à 1986), venteux, aux changements souvent brutaux. Le nombre de jours avec gel dépasse les 150, mais l'insolation est supérieure à 2000h/an. La répartition des pluies est très irrégulière, avec des maximas d'automne et de printemps et une sécheresse estivale marquée. Nous y reviendrons en détail au chapitre II.

#### i.3.2 Substrat rocheux

Le batholite granitique du Mont-Lozère est formé essentiellement de deux type de granites:

-Granite des Signaux, non porphyroïde, dans la moitié Ouest de massif.

-Granite du Pont-de-Montvert, porphyroïde, dans la moitié Est. Il constitue le substrat des bassins-versants.

J. Pellet (1972) donne du granite du Pont-de-Montvert la description pétrographique suivante:

"Leucocrate, gris-clair, parfois mésocrate. grain fin à moyen. Phénocristaux automorphes à sub-automorphes de feldspath, allongés ou trapus, de taille comprise entre 3 et

5cm (voire 10cm), d'orientation quelconque. Composition: Quartz, oligoclases, Feldspaths potassiques, assez souvent perthitiques, maclés Carlsbad. Quadrillage de microcline plus rare ou absent. Les phénocristaux sont toujours potassiques. Biotite peu abondante, chloritisée. Amphibole rare. (...) La composition du granite du Pont-de-Montvert est celle d'un granite calco-alcalin monzonitique tendant vers une grano-diorite."

|          | Al2O3 | SiO2 | Fe2O3 | FeO  | MgO  | CaO  | Na2O | K2O  | P2O5 | MnO   | TiO2 |
|----------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| n        | 5     | 5    | 5     | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5     | 5    |
| Moy. (%) | 68,5  | 15,9 | 0,8   | 2,11 | 1,8  | 2,84 | 3,37 | 4,27 | 0,28 | 0,05  | 0,42 |
| σ        | 0,53  | 0,24 | 0,44  | 0,16 | 0,48 | 0,2  | 0,26 | 0,46 | 0,02 | 0,005 | 0,02 |

Tableau n°2: Composition chimique du granite du Pont-de-Montvert  
Moyennes des données de BUSSIERES, 1955 et VAN MOORT, 1965.  
D'après PELLET, 1972.

Ce granite est réputé homogène dans sa composition chimique (tab. 2). Sur le terrain, on repère néanmoins des filons de quartz laiteux, des enclaves sombres grenues, des zones rubéfiées. D'autre part, des zones de fracturation plus intenses, qui recoupent transversalement les bassins, sont visibles (GUERIN, 1987, MIELLET et SCHMITT, 1988). Il ne faut donc pas exclure que le substrat puisse induire des différences entre les bassins, tant dans l'hydrologie que dans l'hydrochimie. Nous tendons cependant à penser que la variabilité due au granite reste petite par rapport à celle due aux formations superficielles, au sol et à la végétation.

i.3.3 Sols et formations superficielles: voir chapitre I.

i.3.4 Végétation

Les principaux faciès de végétation présents sur les bassins sont les suivants:

-Le taillis de hêtres (*Fagus sylvatica L.*): Dû à l'exploitation en bois de feu de l'essence naturellement présente entre 1000 et 1500m d'altitude, il est formé de rejets sur souche et de semis spontanés. Dans le bassin de La Sapine, la plupart des tiges ont entre 50 et 80ans. L'examen des cadastres révèle une évolution d'une pâture parsemée de bosquets à un peuplement fermé au cours de la première moitié de ce siècle (MIELLET et SCHMITT, 1988). Le sous-bois est quasi inexistant. Les clairières sont peuplées de myrtilliers (*Vaccinium myrtillus L.*), et de genêts (*Cytisus purgans (L.) Benth.*) et *Sarothamnus scoparius (L.)*.

-Les prairies. On peut en distinguer trois types princi-

paux:

-La festucaie: Dominée par la fétuque ovine (*Festuca ovina* L.) et la fétuque rouge (*Festuca rubra* L.), elle se localise dans les parties basses du bassin des Cloutasses, à l'emplacement d'anciennes terres labourées. C'est un faciès très fermé.

-La nardaie: Caractérisée par le nard raide (*Nardus stricta* L.), elle occupe les parties plus élevées, sur sols plus superficiels, associée à des plantes à rhizome (ex. *Plantago recurvata* L.), voire à la callune (*Calluna vulgaris*). La couverture est souvent discontinue.

-On observe souvent le faciès intermédiaire entre les deux précédents, la nardaie-festucaie.

-Les prairies hygrophiles et les tourbières, dont le cortège floristique dépend de la durée et de l'importance de l'engorgement. On y trouve *Carex*, joncs et sphaignes, accompagnées de *Pedicularis palustris* L., *Drosera intermedia* Hayne, etc.

-les landes: deux types principaux se côtoient, la lande à *Cytisus purgans* (L.) Benth., dans les pâtures où la pression pastorale a baissé, qui cède la place à une formation rase à *Calluna vulgaris* dans les parties les plus hautes et sur sols squelettiques.

-Les peuplements forestiers artificiels: les seuls représentés dans l'aire d'étude sont les futaies équiennes et monospécifiques d'épicéas (*Picea excelsa* Lx.). Celle du bassin de La Latte est âgée de 55 ans, dense, peu productive. On y trouve quelques *Sorbus* disséminés, et en bordure quelques taches de pins à crochets (*Pinus montana* Mill.), qui se régénère et conquiert peu à peu les anciennes pâtures. À partir de 1984, le peuplement a commencé à être infesté par un scolyte du genre *Dendroctonus*, qui s'est brusquement multiplié durant l'été 1986. Une coupe rase s'est alors avérée inévitable; elle a débuté au printemps 1987, et 50% des arbres étaient abattus avant la fin de l'automne. À la fin du printemps 88, il en restait environ 10%. Pour continuer l'étude des pluviolésivats et des eaux du sol sur des épicéas sains, une nouvelle station a donc été installée, sans suivi de bassin-versant, sur un peuplement voisin. Il s'agit d'un bosquet d'épicéas au sein d'un reboisement plurispécifique (sapin, douglas, épicéas), plus jeune (≈35 ans), non éclairci. Les arbres y sont de meilleure venue, le site étant un peu plus protégé et plus humide.

#### 1.4. MÉTHODES ANALYTIQUES.

Prélevés dans des flacons en PVC, les échantillons sont ramenés au laboratoire de terrain installé à 30 km des sites où ils sont stockés à 4°C, si les mesures de pH et d'alcalinité ne sont pas possibles immédiatement (les tournées de terrain prenant souvent la journée). Ces mesures sont donc réalisées au plus tôt, ainsi que la filtration. Sont ensuite déterminées les teneurs en nitrate,

ammonium, silice dissoute et chlorure, par colorimétrie. Les dosages de sulfates (néphélométrie) et de calcium, magnésium (absorption atomique), potassium, sodium (émission) sont effectués, dans un délai de quelques mois, au laboratoire d'hydrochimie d'Orléans.

La précarité du laboratoire de terrain, le nombre élevé d'analyses, les éventuels changements d'opérateurs et les difficultés liées aux teneurs très faibles à mesurer (sensibilité des méthodes, pollutions...) sont autant de facteurs pouvant nuire à la qualité des résultats, aussi un contrôle sévère s'avère-t-il nécessaire. Ce problème a été abordé de trois façons: vérifications internes à l'équipe, calibration avec un autre laboratoire, balances ioniques.

#### i.4.1 Vérifications internes à l'équipe.

Les analyses sont en général effectués par les deux mêmes personnes, l'une à Génolhac (Laboratoire de terrain), l'autre à Orléans. Toutefois, à l'occasion de stages de courte durée ou dans le cadre des thèses, des étudiants ont participé à cette tâche, et il importait de tester à la fois les installations "de fortune" de Génolhac et l'influence des opérateurs. Sans entrer dans le détail des résultats, on a pu déceler les faits suivants:

- une légère pollution en Sodium, et dans une moindre mesure en Chlorure, liée à un système de filtration défectueux, a eu lieu entre septembre 86 et juillet 1988. Elle intéresse presque uniquement les eaux de pluies, et les échantillons nettement atteints ont été éliminés. Pour le calcul des apports et des moyennes, mais non pour les traitements statistiques, les concentrations ont été reconstituées au moyen des corrélations multiples établies sur les 5 années précédentes, soit:

$$\begin{aligned} \text{Na} &= 2,44\text{Mg} - 0,13\text{Ca} + 0,04\text{SO}_4 + 1,41 & r^2 &= 0,55 \\ \text{Cl} &= 1,56\text{Mg} - 0,08\text{Ca} + 0,35\text{K} + 0,07\text{SO}_4 + 5,98 & r^2 &= 0,51 \end{aligned}$$

- le dosage des sulfates pose parfois des problèmes pour les faibles teneurs, la répétabilité des mesures n'étant pas très bonne. En procédant dans un environnement très stable (local isolé), et selon un protocole très rigoureux, on ne parvient toutefois pas, par cette méthode, à des précisions inférieures à 20% pour les teneurs inférieures à 5mg/l de SO<sub>4</sub>.

- Les dosages colorimétriques effectués à Génolhac sont incontestablement moins précis que s'ils étaient réalisés à Orléans (CHRETIEN, 1988), surtout pour les chlorures et les faibles teneurs en silice, ceci étant dû à un appareillage moins précis et un local mal adapté (température instable et trop basse en hiver, en particulier). La détermination du pH souffre des mêmes faiblesses, auxquelles s'ajoutent les problèmes spécifiques d'une telle mesure (manque de stabilité, standardisation des électrodes à l'aide

X  
X

|                       | H+   | Alc.  | Ca    | Mg    | K    | Na   | Cl   | S04   | NO3   |
|-----------------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| n                     | 17   | 17    | 18    | 18    | 18   | 18   | 18   | 18    | 18    |
| Moy. Mt-Loz           | 12,5 | 3,7   | 1,49  | 0,42  | 0,54 | 2,03 | 2,55 | 1,26  | 0,98  |
| écart-type            | 1,8  | 16,0  | 1,17  | 0,35  | 0,64 | 1,16 | 2,22 | 0,50  | 1,09  |
| Moy. Barcelone        | 5,8  | 31,0  | 1,68  | 0,45  | 0,64 | 1,99 | 2,41 | 1,38  | 1,02  |
| écart-type            | 1,06 | 14,2  | 1,11  | 0,34  | 0,78 | 1,13 | 2,08 | 0,53  | 1,05  |
| Moy. écarts           | 6,7  | -27,3 | -0,19 | -0,03 | -0,1 | 0,04 | 0,14 | -0,12 | -0,04 |
| t                     | 6,97 | 5,12  | 2,00  | 2,43  | 2,02 | 0,85 | 0,58 | 1,78  | 0,88  |
| B (pour écart de 10%) | -    | -     | 60%   | 20%   | 60%  | 20%  | 80%  | 50%   | 80%   |

Tab. n° 3 : Calibration Mont-Lozère/Barcelone: moyennes, écarts-types, moyennes des écarts, résultats du test de Student: différence significative si  $t > 2,88$  ( $\alpha = 0,05$ )  
 Risque  $\beta$  d'accepter l'égalité alors que l'écart entre les moyennes est de 10%.

de tampons de forces ioniques très différentes de celles des échantillons...). Le compromis entre des temps de stockage réduits et des mesures de qualité n'est pas facile à trouver...

#### i.4.2 Calibration inter-laboratoires.

Une série de 18 échantillons de tous les types d'eau étudiés (pluies, pluviocessivats, rivières, eaux du sol) a été analysée par notre équipe et le laboratoire d'écologie de l'Université autonome de Barcelone. Les méthodes de dosage utilisées sont les mêmes pour les cations, mais différent pour les anions (chromatographie liquide) et pour l'alcalinité (conductivité). Les résultats de la comparaison sont exposés au tableau 3. Il en ressort que mis à part pour le pH et l'alcalinité, les différences entre les moyennes des deux laboratoires ne sont pas significatives. Il faut toutefois noter l'importance du risque  $\beta$  de seconde espèce (risque d'accepter l'égalité alors qu'il existe un écart égal à 10% de la moyenne la plus forte) due au faible nombre de degrés de liberté et surtout à la forte dispersion des écarts. Ainsi, pour le calcium, par exemple, 4 échantillons présentent des différences de plus de 30% entre les mesures des deux séries. Il n'en reste pas moins que ces résultats sont satisfaisants, d'autant que les échantillons n'ont pas eu le même temps de conservation: quelques jours (pH, anions) et quelques semaines pour notre équipe, plusieurs mois pour l'équipe de Barcelone, ce qui peut peut-être expliquer la différence d'une demi-unité sur les mesures de pH. Il en est de même pour l'alcalinité, avec en plus une possibilité de biais systématique entre les deux modes de détermination, la méthode de Gran étant la plus juste (KELLER et al, 1987).

#### i.4.3 Utilisation de la balance ionique

Si les analyses sont totales et correctes, la relation suivante est vérifiée (BOURRIE, 1976):

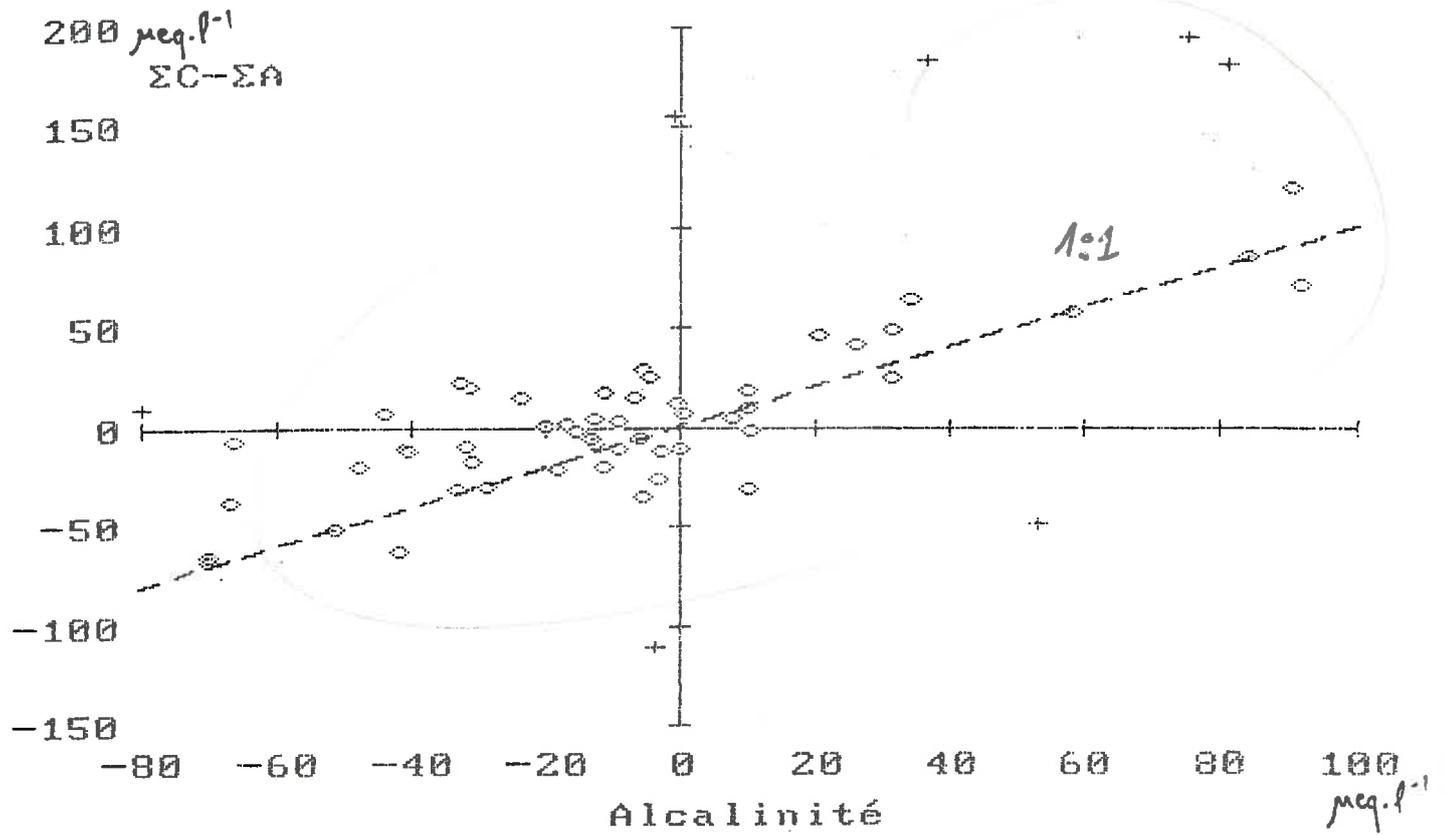
$$\text{Alcalinité} = \Sigma \text{Cations} - \Sigma \text{Anions}$$

(anions et cations non susceptibles d'accepter des protons)

Comme il a été dit plus haut, l'alcalinité a été mesurée depuis 1986 par la méthode de Gran, la mieux adaptée pour les eaux acides. Cette alcalinité peut être positive, nulle, ou négative. Sa valeur minimale est  $\sim [H^+]$ , quand il n'y a aucun accepteur de protons dans la solution (car  $\text{Alcalinité} + [H^+] = \Sigma \text{bases faibles}$ ).

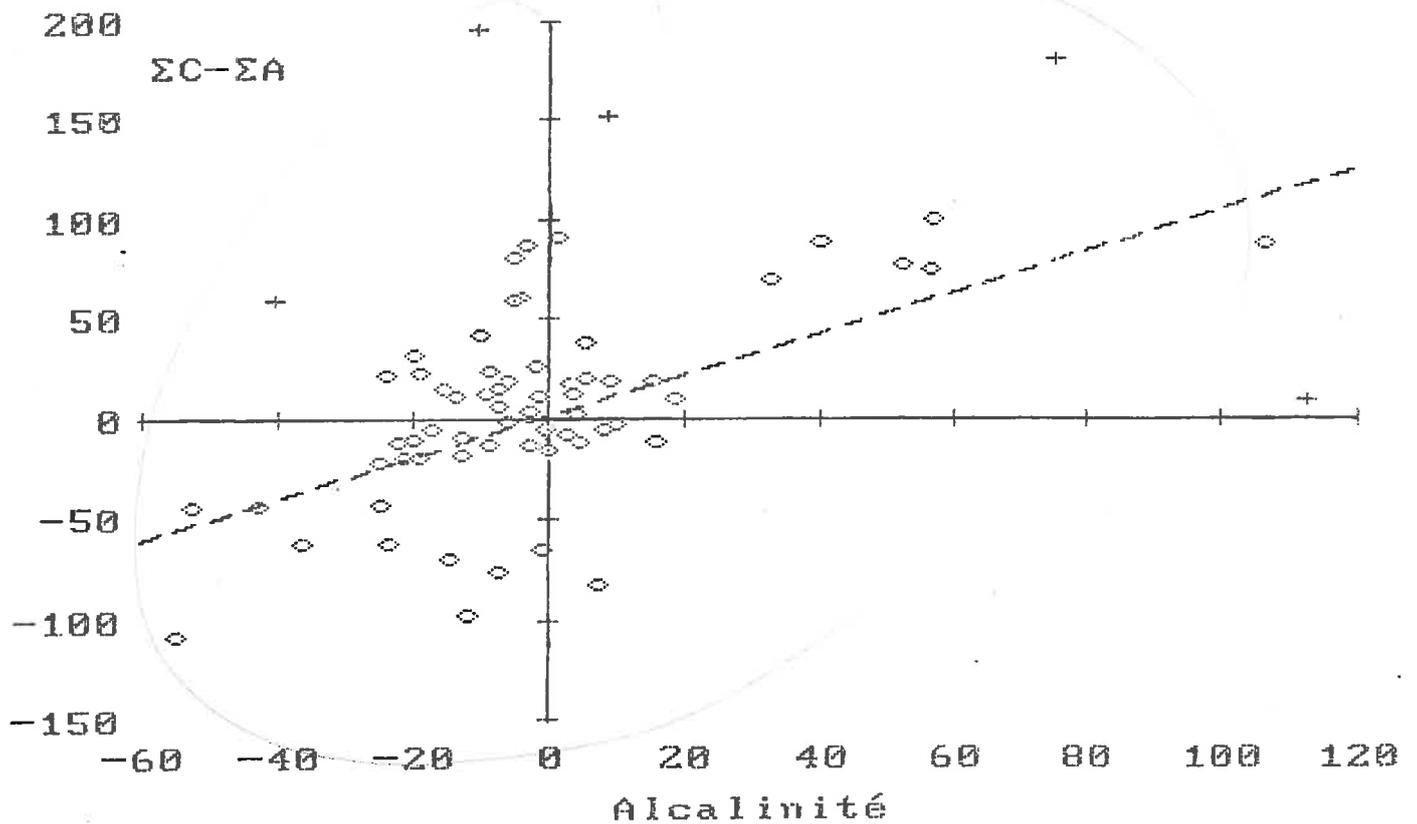
Pour contrôler la qualité de nos analyses, on a donc dessiné pour chaque population le nuage de points alcalinité=f(C-A) (Fig.2). On observe dans chaque cas une forte dispersion, due essentiellement aux erreurs analytiques. On a éliminé des traitements les échantillons correspondant

Figure 2: relation alcalinité-balance ionique.  
a. eaux de pluie



+ : échantillons exclus

b. pluvioléssivats de hêtres



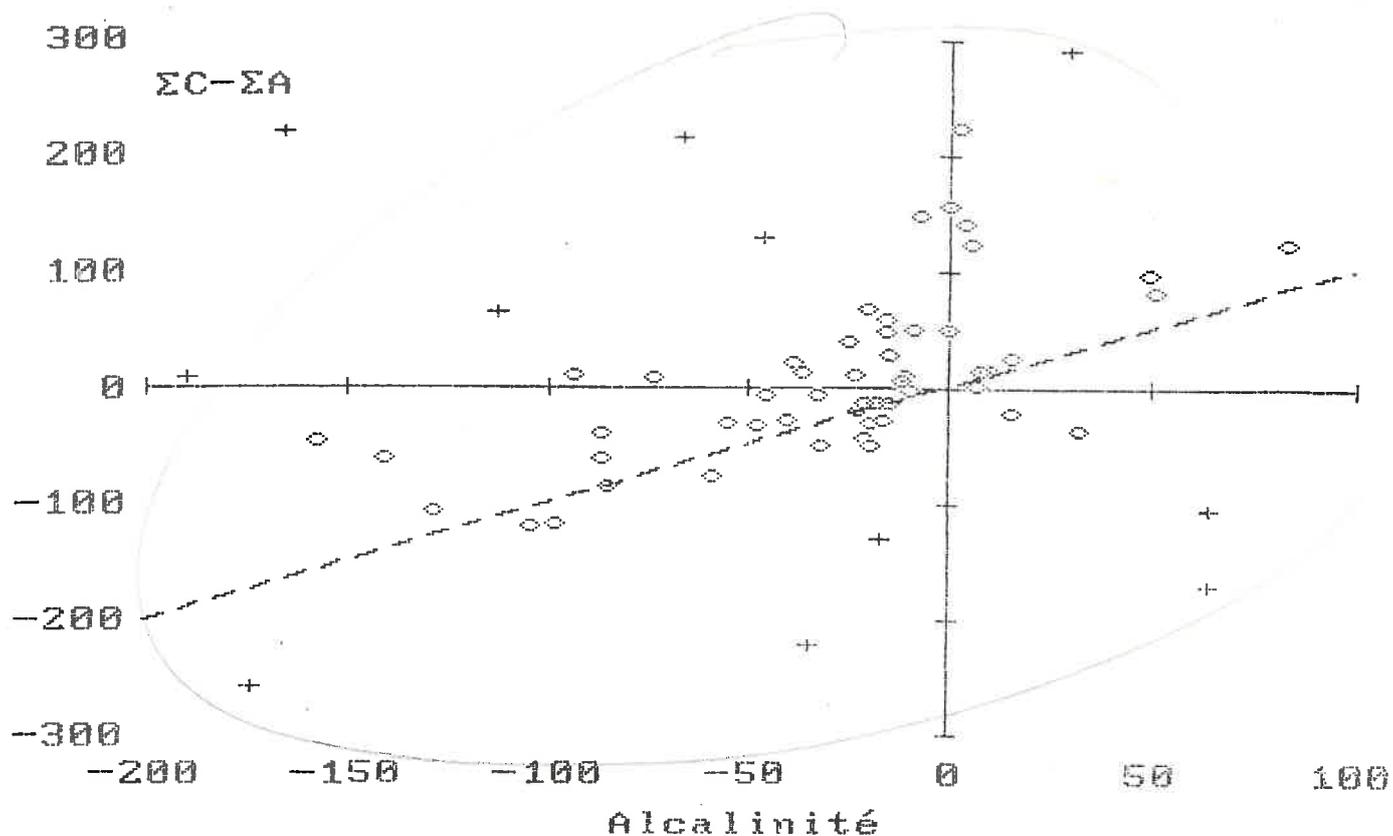
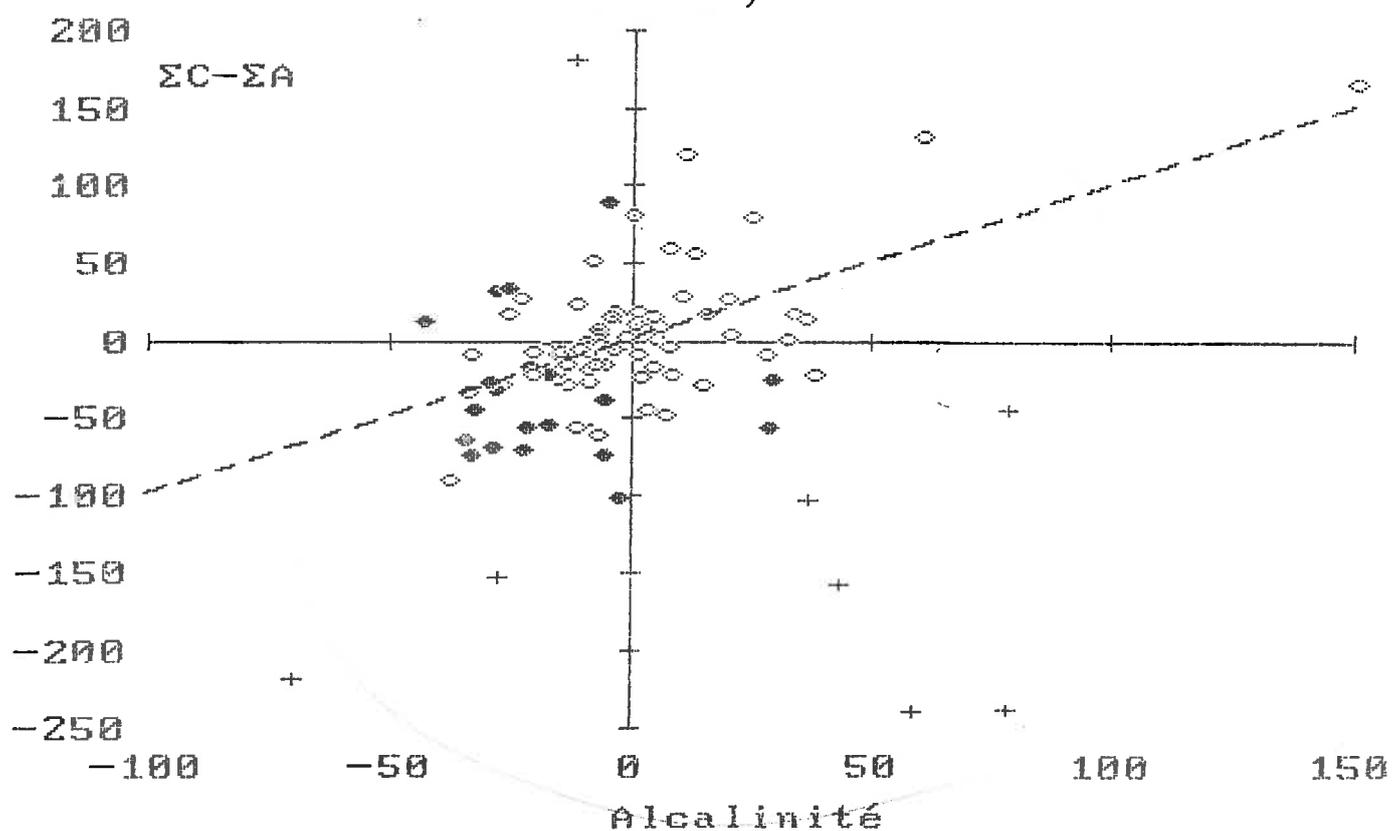


Figure 2: relation alcalinité-balance ionique.  
c. pluviollessivats d'épiceas



d.eaux du sol: ● Latte ○ autres  
+ exclus

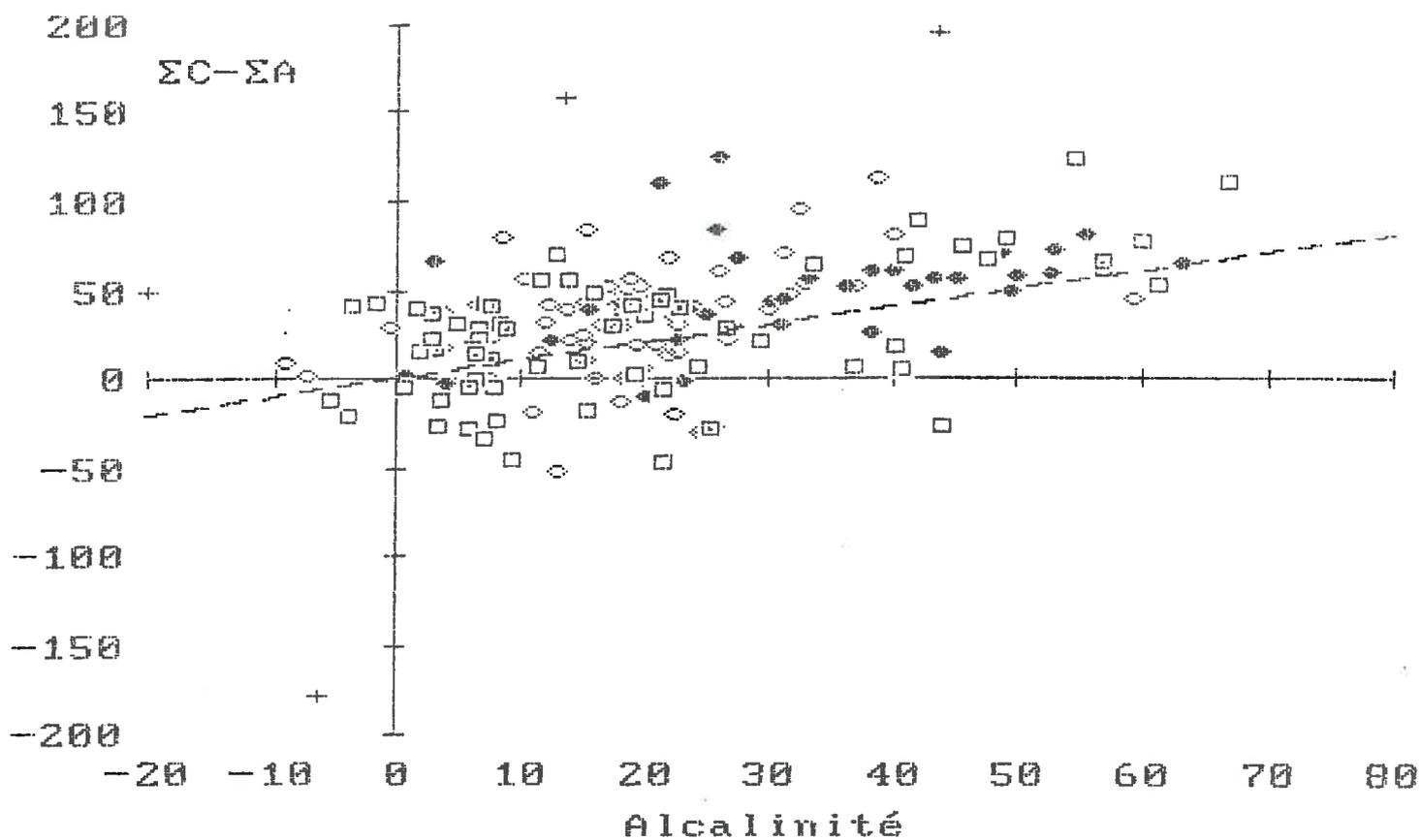


Fig.2 (fin): relation alcalinité-balancé ionique.  
e.eaux de rivières

- : Cloutasses
- : Sapine
- : Latte
- + : exclus

aux points qui s'écartaient trop de ce nuage (soit environ, 1% des analyses). D'autre part, selon le type d'eau, ces nuages sont plus ou moins décalés par rapport à la première bissectrice. Dans la majorité des cas, ce décalage traduit une sous estimation des anions ou une surestimation des cations (C-A>alcalinité), en supposant que la mesure de l'alcalinité ne présente pas de biais systématique. C'est le cas surtout pour les eaux du sol et les pluviollessivats, et dans une moindre mesure pour les rivières. Il est probable que cela soit dû à la présence d'acides organiques, non dosés ici. Pour les eaux du sol de La Latte et les eaux de pluie, le décalage est inverse, et l'interprétation est moins évidente: pollution en chlorure, très possible pour les eaux très diluées des pluies, présence d'aluminium et imprécision des méthodes colorimétriques sur les eaux du sol, qui présentent souvent une forte coloration due à la matière organique.

En l'absence d'analyses complètes (échantillons antérieurs à 1986), certains résultats ont été également considérés comme aberrants, et éliminés des calculs. Il ne s'agit que des quelques cas où les concentrations mesurées n'étaient manifestement pas plausibles.

#### i.4.4. conclusion sur les analyses

Comme on le voit, de nombreuses imperfections subsistent dans la détermination des compositions chimiques des eaux prélevées, malgré l'attention et le soin qui y ait apporté. Il est certes difficile d'assurer l'analyse rapide et correcte d'un nombre aussi élevé d'échantillons, surtout quand le laboratoire est si loin du terrain. Si des améliorations sont possibles, elles devront en priorité porter sur les points suivants:

- pH et alcalinité
- faibles teneurs en Silice
- faibles teneurs en sulfates
- Chlorures

#### i.5. Moyens statistiques et informatiques

La quasi-totalité des traitements statistiques a été réalisée au moyen du logiciel SAS. L'ensemble des données recueillies sur le terrain, des programmes de gestion et de traitement des données est implanté sur micro-ordinateur compatible PC. Outre les logiciels commerciaux, la programmation développée par l'équipe est en langage GWBASIC.

## I. LES SOLS DES BASSINS-VERSANTS

### I.1. APERCU GÉOMORPHOLOGIQUE

Les sols de ce secteur se sont développés sur des formations arénacées ayant subi un remodelage intense au cours du Quaternaire. Les formes d'ablation et d'accumulation sont aujourd'hui un trait marquant de la couverture pédologique, constituée de sols peu évolués, aussi l'apport de la géomorphologie est-il essentiel à la compréhension de son organisation. Les faits exposés ici sont tirés de travaux récents réalisés dans ce domaine (MIELLET ET SCHMITT, 1988).

On s'accorde maintenant à penser que le Mont-Lozère a connu un englacement localisé à sa partie sommitale au cours de la dernière glaciation. Ses versants ont subi une dynamique périglaciaire avec gélomobilisation des arènes en période froide et humide (déplacements grain à grain sur de courtes distances, "cryoreptation") et gélifluxion lors de froids plus intenses (déplacements en masse intéressant de faibles épaisseurs de matériaux sur des distances pouvant atteindre quelques centaines de mètres) (VALADAS, 1987).

Mais si ces événements sont responsables des grandes formes du relief actuel, les activités humaines ont ensuite profondément marqué ce milieu dont les fortes pentes, la faible cohésion des sols et l'agressivité du climat font la fragilité. En effet, le peuplement des "Hautes-Terres Cévenoles", dont les origines remontent vraisemblablement à la fin de l'âge du bronze, a atteint un niveau très élevé au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, d'où une pression agricole et pastorale considérable. Cette surexploitation, et la déprise brutale qui lui a succédé, ont fortement remanié la couverture superficielle, comme le dénotent les nombreuses cicatrices de ravines sur les versants et les fortes accumulations de matériel organominéral en bas des pentes.

Ces différents facteurs morphogénétiques se sont relayés avec des intensités diverses sur une roche mère pouvant présenter des variations dans sa fracturation, dans le modelé et la profondeur du front d'arénisation, et ont ainsi individualisé des bassins-versants d'aspects variés:

Les pentes du valat des Cloutasses sont peu accusées, le talweg peu creusé et organisé d'amont en aval en trois parties séparées par des "verrous" successifs. Cela semble avoir quelque peu limité le départ des matériaux, c'est ainsi que des lobes de gélifluxion sont reconnaissables sur les versants tandis que le ruisseau coule souvent sur des accumulations alluvio-colluviales d'épaisseurs non négligeables.

A l'opposé, le bassin de la Sapine semble avoir été le plus "nettoyé" des trois, avec de nombreux affleurements en dalles, des versants à pentes fortes, au profil subrectiligne, finissant dans un talweg resserré où le ruisseau coule souvent sur la roche.

Le bassin de la Latte constituerait un cas intermédiaire, car là aussi les pentes sont fortes et les formes d'accumulations rares, mais il semble que l'ablation ait été moindre qu'à la Sapine, car la couverture pédologique y est plus épaisse et plus continue.

## I.2. PRÉSENTATION PÉDOGÉNÉTIQUE ET MORPHOLOGIQUE

De prime abord, la morphologie de ces sols donne une impression de grande uniformité. La texture est sablo-limoneuse, et les éléments grossiers de toutes tailles, du gravier au bloc, sont très abondants. La couleur dominante est le brun-noir, brun foncé jusqu'à l'arène, trahissant la présence en grande quantité de matière organique. La structure est toujours mal exprimée, fine et peu cohérente. Les différents horizons sont le plus souvent mal individualisés.

Les quelques observations rapportées ci-dessous vont cependant nous permettre de distinguer les principaux types morphologiques et génétiques et leur organisation spatiale.

-L'histoire géomorphologique mouvementée de ces matériaux rend difficile l'interprétation des courbes granulométriques réalisées (TREVISAN, 1983, VANNIER, 1987, MIELLET ET SCHMITT, 1988). On a toutefois pu identifier une faible migration d'argile dans certains profils évolués (sous couvert forestier en particulier) et TRÉVISAN détecte en outre une argilisation un peu plus forte aux Cloutasses, ce qui pourrait être le résultat d'une meilleure conservation du manteau d'arènes remaniées.

-Sur les sols de versants, l'humus est de type mull-moder à couches L+F peu épaisses, avec parfois une couche H très fine et discontinue. Sous épiceas, cet humus est plus épais, et la couche H plus continue. Dans les zones humides, les tourbières sont de faible épaisseur et riches en matière minérale.

-La forte teneur en matière organique dans l'ensemble des profils s'explique d'une part par un blocage climatique et chimique de son évolution ("rankérisation" et hydromorphie) et d'autre part par l'accumulation colluviale d'origine anthropique (cf § 1).

-La fraction argileuse est dominée par des interstratifiés mica-vermiculite, chlorite-vermiculite et vermiculites hydroxy-alumineuses. La présence de kaolinite semble caractériser les sols forestiers, et les vermiculites hydroxy-alumineuses paraissent un peu plus abondantes sous hêtraie. On note également la présence de gibbsite, en quantité croissant avec la profondeur, (jusqu'à 5% dans l'arène), plus importante à la Sapine. Malgré ces légères différences, dont on trouvera le détail dans le travail de VANNIER (1987), ce spectre minéralogique dénote la similarité de l'histoire pédogénétique et géochimique de l'ensemble du site.

-On trouvera en Annexe n°1 la description sommaire des profils caractéristiques, qui se différencient essentiellement par la présence ou non d'un horizon minéral

Figure 3 :

CARTE DES SOLS  
BASSIN - VERSANT DES CLOUTASSES

LEGENDE :

code : X α/β ← % de blocs  
 ↑     ↑  
 type profondeur  
 de sol moyenne

sols humifères de versants : "R"

-  α > 50cm et/ou β < 40%
-  α < 50cm et/ou β > 40%
-  β > 60%

sols à horizon (B) moins humifères : "B"

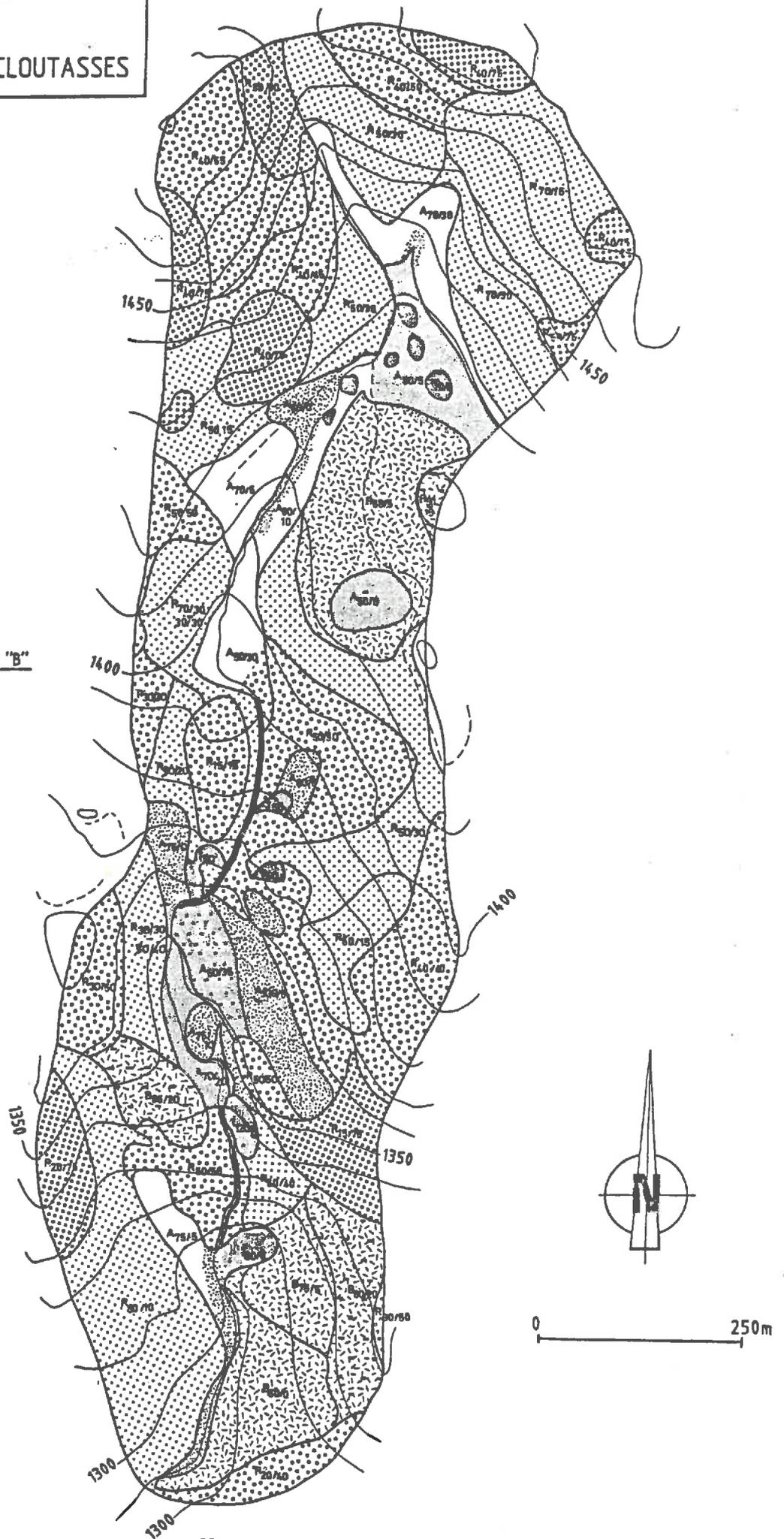
-  modal (β ≥ 18% : "- - -")

sols alluviaux / colluviaux : "A"

-  non hydromorphes
-  légère hydromorphie au delà de 50 cm de profondeur
-  forte hydromorphie (gley de surface)
-  β > 30%

sols tourbeux : "T"

-  tourbeux
-  berges très enrochées



de type (B), A3/(B) ou Bs, et le degré d'hydromorphie. D'après la classification française (CPCS, 1967), les sols de versants s'apparentent aux rankers modaux, aux sols cryptopodzoliques bruns et cryptopodzoliques humifères, et aux sols bruns ocreux, avec parfois un caractère colluvial marqué. La podzolisation semble plus avancée dans certaines zones du bassin de la Latte, peut-être là où les résineux ont succédé à d'anciens bosquets (GUILLET, comm. or.). Les sols de bas-fonds sont tourbeux ou pseudotourbeux (JAMAGNE, 1968) là où l'engorgement est permanent, et humiques à gley quand l'horizon de surface s'assèche périodiquement. Les horizons profonds sont constitués de formations d'accumulation alluvio-colluviales présentant souvent une superposition de lits graveleux et de lits organiques.

En résumé, la couverture pédologique de ce secteur est une mosaïque de sols présentant une certaine homogénéité dans leur aspect, mais aussi de brusques variations spatiales de profondeur, de pierrosité, de degré d'évolution et de régime hydrique (voir Fig. 3). Cette dualité se retrouve également dans les propriétés chimiques, que nous allons maintenant examiner.

### I.3. chimie des sols

L'Annexe n°3 regroupe l'ensemble des résultats d'analyses de sols réalisées, synthétisés dans le tableau n°4. On dispose d'un échantillonnage important (≈100 analyses pour 250 ha) et assez bien réparti (Fig. n°4), mais cette information abondante est difficilement exploitable à cause de la forte variabilité des paramètres et du manque de cohérence dans les buts poursuivis et les protocoles de prélèvement adoptés pour chaque campagne d'analyses. Néanmoins, nous avons tenté de tirer partie de cette disparité de façon à utiliser au mieux les spécificités de chaque série:

- Caractère aléatoire et population importante pour la série de 1984.
- Liaison avec des observations pédogénétiques pour les séries de 1982 et 1987.
- Approche de l'impact de l'enrésinement sur la désaturation du complexe adsorbant pour la série de 1985.

La confrontation de ces différentes sources, en donnant pour chaque problème un plus grand poids à la plus adéquate, amène aux conclusions suivantes:

#### I.3.1 Matière organique

les teneurs en matière organique (Carbone méthode Anne x1.72) sont toujours fortes et décroissent régulièrement avec la profondeur. Il semble pour ce paramètre les trois végétations se rangent comme suit: pessière > pelouse > hêtraie, mais le manque de précision dans le repérage en profondeur de bon nombre d'échantillons rend les compa-

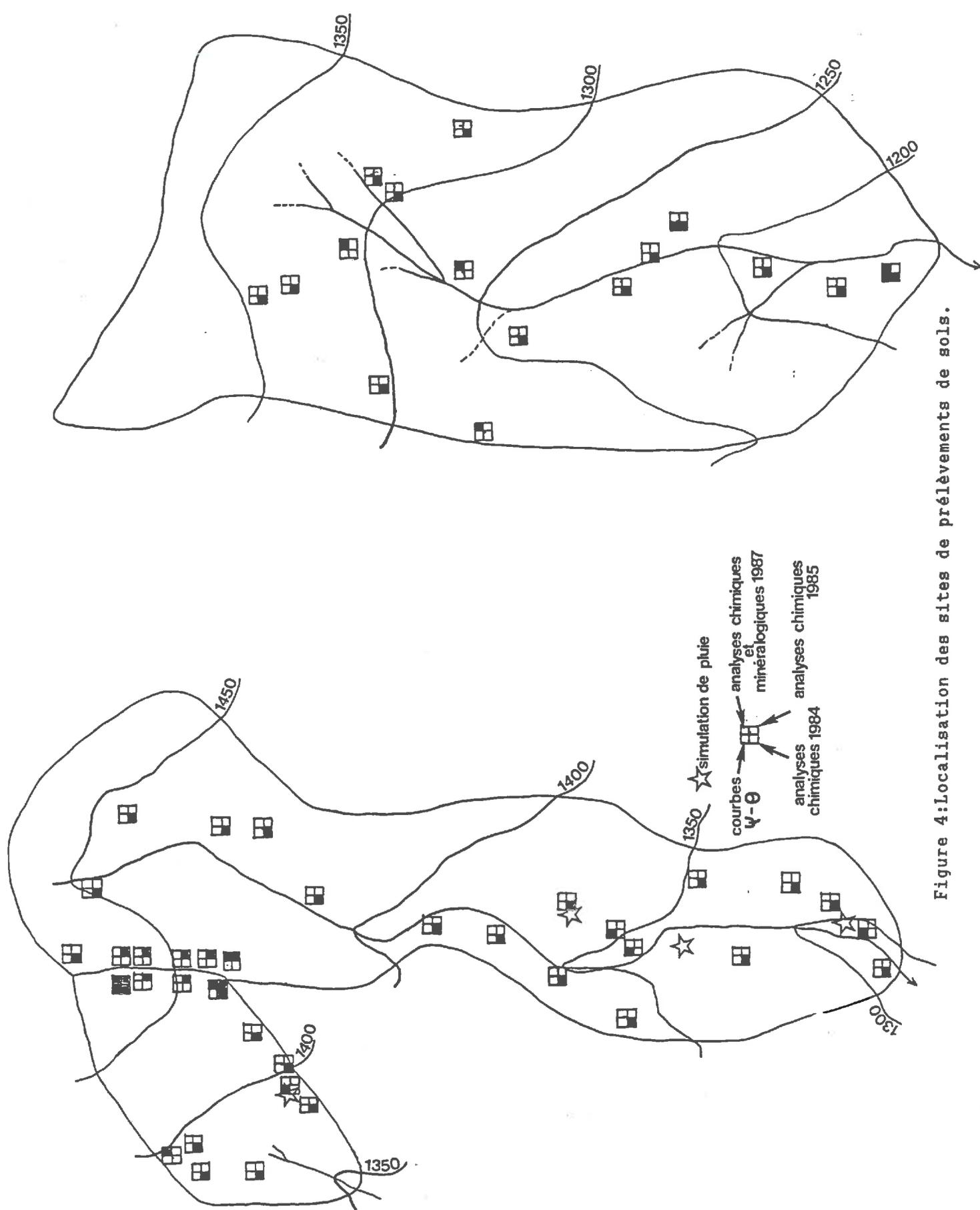


Figure 4: Localisation des sites de prélèvements de sols.

raisons difficiles (près de la surface, les teneurs peuvent varier du simple au double en quelques cm.). Le rapport C/N semble paradoxalement plus élevé dans les sols de hêtraie, signe d'un humus évoluant moins vite, mais les rapports Carbone Anne/Carbone extractible au pyrophosphate ne montrent pas un degré d'évolution différent pour les trois bassins.

### *1.3.2 pH, Aluminium échangeable*

A l'intérieur de chaque série d'analyses, les valeurs de  $pH_{\text{eau}}$  et  $pH_{\text{Ca}}$  sont très groupées, mais on note un écart systématique de 0.5 unités entre les séries de 1983 et 1986 d'une part et de 1984 et 1987 d'autre part (ce qui ne recoupe ni les changements de laboratoire, ni aucune autre source "évidente" d'erreur systématique). On peut toutefois noter dans tous les cas une croissance régulière avec la profondeur et une différence  $pH_{\text{eau}} - pH_{\text{Ca}}$  d'environ 1 unité pH. Les pH mesurés sous pessière semblent légèrement plus acides, corrélativement à des valeurs d'Al échangeable plus fortes (mais qui elles aussi diffèrent sensiblement d'une série à l'autre). Les sols hydromorphes sont moins acides que les sols de versants d'environ 1 unité pH.

### *1.3.3 garniture du complexe adsorbant*

La faible capacité d'échange cationique (T) et le taux de saturation très bas (Somme des bases (S)/T, tous deux mesurés ici à pH7) sont assurément l'une des caractéristiques majeures de ces sols. Connaître le stock de cations "basiques" échangeables et son évolution au cours du temps revêt une grande importance dans la discussion en termes de bilans du fonctionnement géochimique des écosystèmes (voir chap. III). On admet classiquement que le couvert de résineux a un effet désaturant sur le complexe d'échange par la plus grande acidité des composés humiques produits (SOUCHIER 1971, LELONG et SOUCHIER, 1979, BONNEAU, 1983).

Les premières analyses effectuées (TREVISAN, 1983) allaient dans ce sens en dénotant une plus grande pauvreté en bases des sols sous pessière par rapport au sol sous pelouse: en postulant un état initial identique il y a 60 ans, avant l'implantation des épicéas DUPRAZ (1984) concluait à une désaturation annuelle de  $6 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de Ca,  $0.25 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de Mg et  $1,4 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de K.

Mais ces résultats ne portaient que sur l'analyse de trois profils sous chaque végétation, de morphologie assez différentes. Et si les analyses de VANNIER (1987) donnaient des résultats comparables, sur un nombre également réduit d'analyses, les deux autres campagnes de prélèvements amènent à nuancer fortement cette observation, en particulier la campagne réalisée en 1985 sur des échantillons prélevés suivant deux toposéquences situées de part et d'autre de la lisière du peuplement, en contrôlant leur ressemblance pédologique. Les tests statistiques réalisés sur les résultats de ces deux campagnes (DURAND, 1986) ne montraient aucune différence significative entre les

| horizon   | Bassin     | Corg.<br>(%) | C/N         | pHeau     | pHKCl     | T pH7       | Ca          | Mg          | K<br>méq./100g de sol | Na          | S           | Al ech.   |
|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------|
| A1        | Cloutasses | 4.5 à 6.0    | 13.1 à 15.6 | 4.3 à 4.9 | 3.7 à 4.0 | 13.6 à 16.4 | 0.4 à 0.61  | 0.14 à 0.25 | 0.16 à 0.34           | 0.04 à 0.07 | 0.75 à 1.36 | 3.9 à 7.5 |
|           | Latte      | 4.0 à 6.8    | 15.6 à 20.6 | 4.2 à 4.8 | 3.6 à 3.9 | 13.5 à 17.7 | 0.2 à 0.7   | 0.1 à 0.23  | 0.14 à 0.45           | 0.04 à 0.09 | 0.5 à 1.28  | 4.7 à 8.4 |
|           | Sapine     | 5.1 à 6.7    | 20.5 à 20.8 | 4.5 à 4.9 | 3.9 à 4.1 | 16.1 à 16.8 | 0.32 à 0.50 | 0.15 à 0.24 | 0.2 à 0.39            | 0.04 à 0.09 | 0.90 à 1.0  | 5.0 à 7.2 |
| A3        | Cloutasses | 2.8 à 5.9    | 14.3 à 21.3 | 4.4 à 5.0 | 3.9 à 4.3 | 13.5 à 19.2 | 0.1 à 0.5   | 0.05 à 0.17 | 0.06 à 0.32           | 0.04 à 0.1  | 0.25 à 0.99 | 3.1 à 5.5 |
|           | Latte      | 2.9 à 6.6    | 15.8 à 19.3 | 4.4 à 4.9 | 3.9 à 4.1 | 14.7 à 17.6 | 0.05 à 0.8  | 0.04 à 0.28 | 0.07 à 0.21           | 0.02 à 0.08 | 0.18 à 1.37 | 4.7 à 5.6 |
|           | Sapine     | 4.9 à 5.3    | 19.3 à 29.7 | 4.7 à 5.0 | 4.1 à 4.2 | 16.2 à 16.3 | 0.3 à 0.4   | 0.13 à 0.15 | 0.18 à 0.25           | 0.04 à 0.08 | 0.68 à 0.88 | 4.5 à 5.7 |
| (B)-Bs    | Cloutasses | 1.9 à 4.2    | 13.3 à 20.2 | 4.4 à 5.0 | 4.0 à 4.3 | 10.6 à 24.8 | 0.15 à 0.6  | 0.08 à 0.11 | 0.05 à 0.30           | 0.04 à 0.08 | 0.38 à 0.91 | 3.6 à 5.2 |
|           | Latte      | 1.6 à 4.9    | 18.8 à 33.8 | 4.3 à 4.8 | 4.1 à 4.0 | 15 à 15.6   | 0.05 à 0.3  | 0.02 à 0.12 | 0.03 à 0.19           | 0.05 à 0.33 | 0.28 à 0.64 | 4.1 à 5.7 |
|           | Sapine     | 2.0 à 3.5    | 20.0 à 25.0 | 4.8 à 5.0 | 4.3       | 10.4 à 14.3 | 0.08 à 0.3  | 0.04 à 0.09 | 0.06 à 0.15           | 0.03 à 0.07 | 0.43 à 0.46 | 3.5 à 4.1 |
| C-A/C-B/C | Cloutasses | 0.6 à 1.9    | 14.4 à 17.5 | 4.9 à 5.1 | 4.3 à 4.4 | 7.1 à 12.2  | 0.1 à 0.56  | 0.04 à 0.07 | 0.04 à 0.2            | 0.02 à 0.08 | 0.2 à 0.68  | 2.6 à 2.8 |
|           | Latte      | 0.9 à 1.5    | 16.3        | 4.7 à 4.9 | 4.1 à 4.3 | 7.7 à 10.8  | 0.04 à 0.6  | 0.03 à 0.07 | 0.04 à 0.1            | 0.03 à 0.08 | .28 à 0.80  | 3.2 à 3.5 |
|           | Sapine     | 0.9 à 1.0    | -           | 4.6 à 5.1 | 4.3       | 8.4         | 0.30 à 0.32 | 0.08 à 0.10 | 0.06 à 0.17           | 0.02 à 0.09 | 0.39 à 0.48 | 3.2       |

Tab. 4: Résultats d'analyses de sols, par type d'horizon et par bassin: moyennes minimales et maximales des 4 séries d'analyses.

*pelouse*  
*opres*  
*filie*

trois bassins, sauf pour le Calcium dans l'une des séries. Il est vrai que la très grande variabilité spatiale des paramètres demanderait des populations très importantes pour mettre statistiquement en évidence des différences qui, si elles existent, sont ténues. En fin de compte, si en moyenne la somme des bases dans les horizons de surface est assez peu variable d'une série à l'autre dans la hêtraie ( $\approx 0.9$  meq/100g), les résultats sont un peu plus dispersés sous pelouse (1.2 à 1.5 meq/100g), et plus encore sous pessière (0.7 à 1.7 meq/100g). Il n'est pas exclu que des différences dans les modalités de conservation et de préparation des échantillons (en particulier s'il y a ou non eu dessiccation) aient une incidence sur cette dispersion (GRAS, communication écrite). Malgré tout, il semble que la teneur en bases soit un peu plus faible sous hêtraie, ce qui pourrait être dû à une utilisation anthropique très extensive de ce terroir, et à peu près identique sous pessière et sous pelouse, sauf peut-être pour le Calcium, légèrement plus faible sous épiceas. Par contre, les résultats de  $pH_{KCl}$  et d'Aluminium échangeable déjà cités tendraient à montrer que l'acidité d'échange serait sensiblement plus forte dans les sols de la pessière. On peut donc avancer que la présence d'épiceas n'a que peu marqué, en 60 ans, le complexe d'échange de ces sols, si ce n'est en augmentant légèrement la quantité de sites d'échange au pH du sol (sites occupés par  $Al^{+++}$  et  $H^+$ ), et peut-être en provoquant un début de désaturation en Calcium. Cette perte de Calcium est très difficilement chiffrable actuellement, mais on peut toutefois proposer une très large fourchette: entre 0.5 et 6  $Kg \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ . Les pertes en Mg, Na et K semblent pour l'instant négligeables. Il convient là encore de souligner que les sols hydromorphes constituent un cas à part, car il affichent des teneurs en bases nettement plus élevées que les sols de versants.

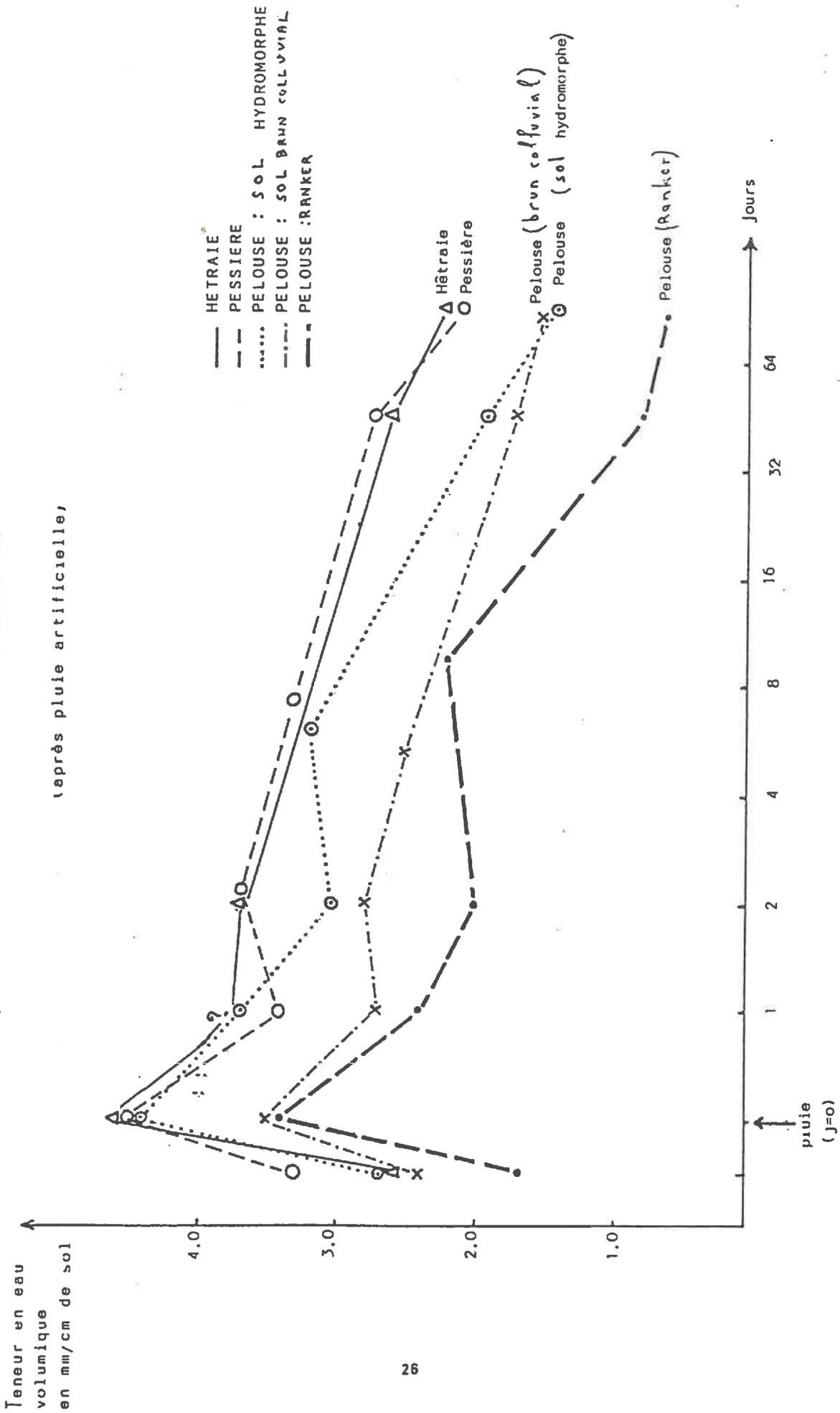
#### *1.3.4 Autres paramètres*

-Phosphore: Peu de dosages d'acide phosphorique Dyer ont été réalisés, mais les valeurs sont très groupées autour de valeurs très faibles (0.01% en surface, 0.07% en profondeur, VAN MOORT (1966) donnant une teneur pondérale du granite de 0.27%).

-Soufre: Nous reviendrons plus loin sur le problème du stockage du soufre dans les sols, mais on peut signaler ici que Vannier (1987) trouve des teneurs en  $SO_4$  total assez élevées (entre 0.1 et 0.15%, soit le double des teneurs de l'arène) et qu'il se présente surtout sous forme adsorbée (extrait au pyrophosphate de Sodium). Il semble un peu plus abondant à La Sapine qu'à La Latte et aux Clou-tasses.

-Fer et Aluminium: Le fer est essentiellement présent sous forme d'amorphes organo-minéraux et sa distribution dans les profils est parallèle à celle de l'argile. Par contre, les teneurs en Aluminium extractible accusent souvent un maximum au niveau des horizons A3/B, sans liai-

Figure 5 : EXEMPLES DE COURBES DE RESSUYAGE



son avec les teneurs en argile, d'où une possible redistribution entre la surface et cet horizon (VANNIER, 1987).

#### I.4. propriétés hydriques

Bien que n'ayant pas fait l'objet d'une étude complète, les propriétés hydriques des sols ont pu être approchées à trois échelles différentes:

- Au niveau du bassin-versant, par l'étude de son fonctionnement hydrologique.
- Au niveau de la parcelle expérimentale et du profil *in situ* par les études d'infiltration et de ressuyage sous pluie artificielle (Annexe n°4).
- Au niveau de l'échantillon, par l'élaboration de courbes  $\theta=f(pF)$  (Annexe n°5).

Le présent chapitre a pour but de discuter la cohérence de ces différentes approches et d'en tirer des idées simples sur les modalités de transfert et de rétention de l'eau dans les sols des trois écosystèmes.

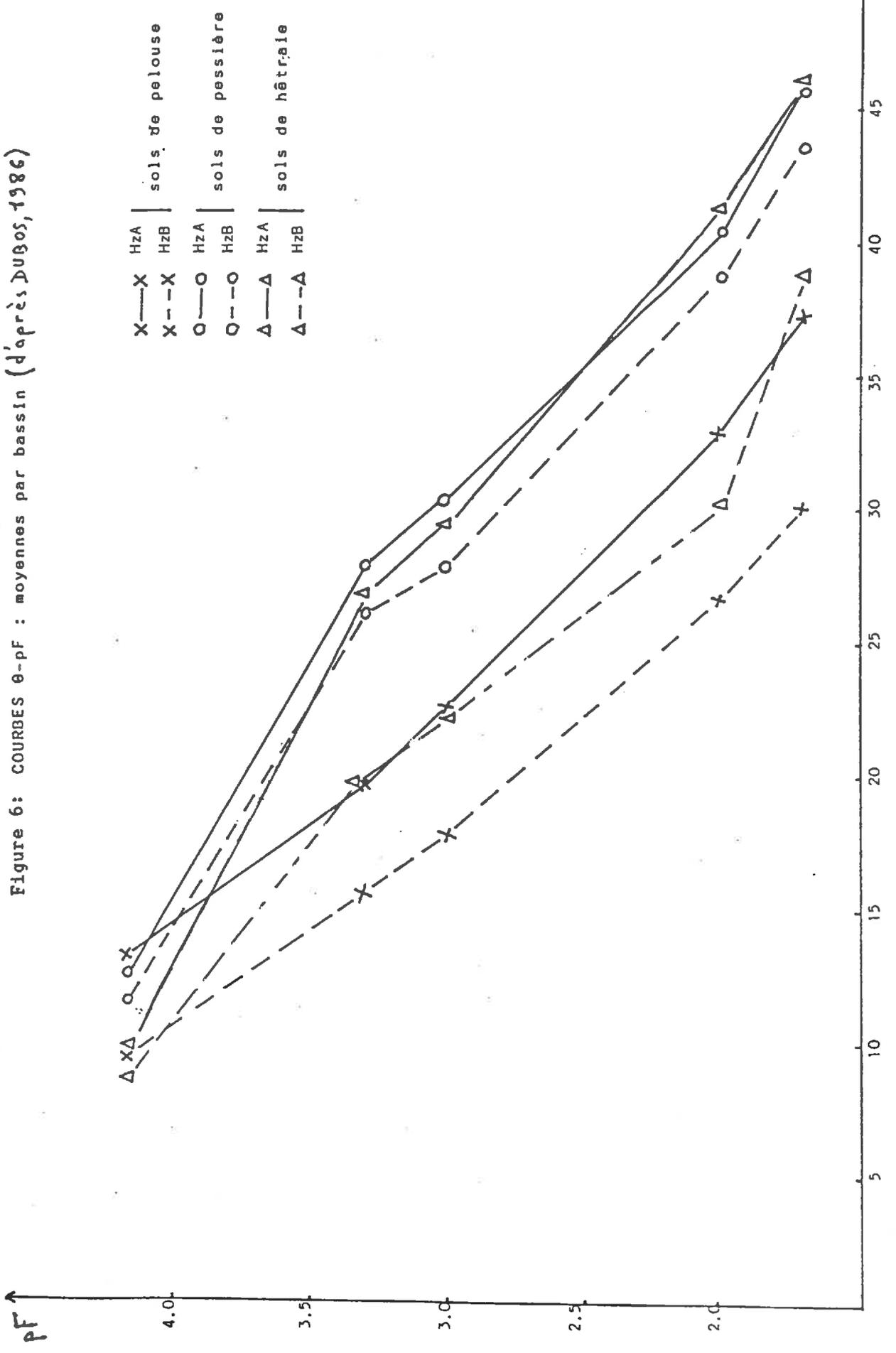
##### I.4.1 Réserve utile

Lors des expériences de simulation de pluie, l'humidité pondérale des profils a été suivie pendant toute la phase de ressuyage. Grâce aux mesures de densité apparente réalisées dans ces mêmes profils, on obtient des courbes de ressuyage  $\theta=f(t)$  (Fig.n°5) qui présentent un palier 24 à 48h après la pluie, ce qui nous permet d'avoir *in situ* une estimation de l'humidité volumique à capacité au champ. Pour la valeur au point de flétrissement, on a préféré utiliser les données de laboratoire, à  $pF$  4.2 (Fig.n°7) bien que les échantillons n'aient pas forcément été prélevés sur les parcelles expérimentales (Fig.n°6), et ce pour trois raisons:

- Il est difficile de juger, sur le terrain, à quel moment on atteint le point de flétrissement sur toute l'épaisseur du profil.
- on observe une bonne adéquation entre les mesures de densité apparente effectuées dans les parcelles et sur les échantillons.
- on peut considérer qu'au point de flétrissement, l'humidité dépend surtout de la granulométrie du matériau, qui varie peu dans les sols considérés, et qui n'est pas affectée par le remaniement subi par les échantillons.

Il va sans dire que les valeurs proposées ici (tableau n° 5) sont très approximatives, étant données la méthode utilisée et la grande hétérogénéité du matériau. Elles correspondent à des moyennes réalisées pour les horizons les plus couramment rencontrés dans chaque bassin, en excluant les valeurs aberrantes. Le nombre de répétitions étant trop faible pour calculer un taux d'erreur, on peut simplement le situer autour de 25%. En toute rigueur, les résultats ne sont donc pas significativement différents pour les trois bassins, même s'il semble que les plus

Figure 6: COURBES  $\theta$ -pF : moyennes par bassin (d'après DUBOS, 1986)



fortes valeurs de R.U. soient atteintes dans les sols de pessière, légèrement plus organiques. En reportant les humidités volumiques à Capacité au champ sur les courbes  $\theta$ -pF, on obtient un pF sensiblement identique pour tous les horizons et tous les sols\*, de l'ordre de  $2.5 \pm 0.3$ , soit un peu plus que les valeurs citées pour les terres sableuses (autour de pF 2), peut être en raison de la forte teneur en matière organique. Ces humidités volumiques représentent environ la moitié de la porosité totale du sol.

Pour passer de ces données à la Réserve Utile par bassin-versant, il faut tenir compte de l'épaisseur moyenne de sol exploitable par les racines, du développement des différents horizons, du taux d'éléments grossiers supérieurs aux graviers, autant de données très difficiles à estimer. Néanmoins, à partir du planimétrage des unités de la carte des sols des Cloutasses, on obtient un profil moyen de 70cm, avec un taux de cailloux et blocs de 25%, soit une R.U. d'environ  $75 \pm 25$ mm.

Les estimations pour les deux autres bassins ne peuvent être que plus imprécises. Les sols de la Latte sont un peu plus profonds sur les versants, mais les fortes accumulations de bas de pente aux Cloutasses doivent compenser cela pour donner une profondeur moyenne similaire, avec semble-t-il un peu moins d'éléments grossiers (20%), soit une RU d'environ  $100 \pm 30$ mm. A l'inverse, les sols de la Sapine sont plus superficiels ( $\approx 60$ cm) et plus enrochés (30%), soit une R.U. de  $65 \pm 25$ mm.

La vraisemblance de ces approximations peut être contrôlée par les valeurs déduites de l'analyse du comportement hydrologique des trois bassins (tableau n° 6). Dans les trois cas, il s'agit d'une estimation de la capacité de stockage de la zone non saturée, mais en fait la réalité physique de la grandeur mesurée diffère quelque peu (GUERIN, 1987): Dans le modèle GARDENIA, le paramètre  $RU_{max}$  mesure la capacité du réservoir soumis à évaporation; Dans les analyses corrélatoires et spectrales, la fonction de gain entre les signaux entrée (pluie) et sortie (débit) permet, sous certaines conditions, d'estimer la lame d'eau nécessaire à la resaturation des sols; quant à la méthode utilisée ici, elle est destinée à évaluer le stock d'eau utilisable par les plantes.

Ces deux dernières approches donnent des résultats très semblables, sauf pour La Latte, pour laquelle notre estimation est un peu forte. Le modèle GARDENIA donne des valeurs plus élevées, mais dans les trois cas, on obtient la même position relative des trois systèmes, avec une réserve maximale à la Latte et minimale à la Sapine.

(\*) sauf pour les horizons superficiels des sols de hêtre, dont des échantillons étaient très riches en cailloux et en racines, ce qui a pu perturber les mesures.

|          |      | da  | $\theta$ à C.C | $\theta$ à pF 4.2 | R.U. |
|----------|------|-----|----------------|-------------------|------|
| Pelouse  | A1   | 1,2 | 27%            | 13%               | 14%  |
|          | A3/B | 1,4 | 27%            | 10%               | 17%  |
|          | C    | 1,5 | 21%            | 10%               | 11%  |
| Hêtraie  | A1   | 1,0 | 30%            | 10%               | 20%  |
|          | A3/C | 1,2 | 25%            | 10%               | 15%  |
| Pessière | A1   | 1,1 | 33%            | 13%               | 20%  |
|          | (B)  | 1,3 | 32%            | 12%               | 20%  |
|          | C    | 1,5 | 21%            | 10%               | 11%  |

Tableau n° 5 : densités apparentes et humidités volumiques à la capacité au champ et au point de flétrissement pour quelques horizons-types

| R.U. (mm): | D'après GUERIN(1) | D'après GUERIN(2) | Cette étude |
|------------|-------------------|-------------------|-------------|
| Cloutasses | 60 à 80           | 110               | 75          |
| Sapine     | 55 à 75           | 118               | 65          |
| Latte      | 65 à 85           | 126               | 100         |

Tableau n° 6 : Valeurs de réserves utiles des bassins estimées par Guérin(1987):

- (1) à partir d'analyses corrélatoires et spectrales  
(2) par optimisation des paramètres du modèle GARDENIA

#### *I.4.2. infiltrabilité et naissance du ruissellement*

Les expériences de simulation de pluie menées en mai-juin 1986 sous la responsabilité de MM LELONG et ROOSE avaient pour but d'estimer l'impact des différents états de surface sur la capacité d'infiltration des sols. La majeure partie des résultats de cette étude ont été traités dans le cadre d'une thèse (BOUDJEMLINE, 1987), et sont repris maintenant dans un travail plus global sur les processus hydrologiques à l'oeuvre dans ce milieu, mené par C.M. COSANDEY (cf COSANDEY et Al., 1987). Nous ne présentons ici qu'une rapide revue des faits actuellement connus et des hypothèses qu'ils suscitent.

L'infiltrabilité minimale (pour une teneur en eau proche de la saturation, donc en l'absence de gradient de succion), est très élevée: de 50 à 100 mm.h<sup>-1</sup>. Les trois types de couverts végétaux ne diffèrent guère à cet égard, mais on peut très localement observer des valeurs notablement plus faibles, quand le sol est à nu (flancs de ravines, par ex.). Il semble même que dans ce cas précis, la porosité à la surface du sol puisse diminuer après de fortes pluies, par effet de battance (COSANDEY, comm. personnelle). Dans tous les autres cas, l'infiltrabilité est nettement supérieure à l'intensité de la quasi totalité des épisodes pluvieux (bien qu'on ait pu enregistrer des intensités de l'ordre de 120 mm.h<sup>-1</sup> sur 5 mm et 90 mm.h<sup>-1</sup> sur 30 mm).

En conséquence, le ruissellement visible en période de crue peut être attribué aux phénomènes suivants:

- Un ruissellement quasi pur sur les zones saturées, dont la superficie peut augmenter considérablement lors des grandes pluies de printemps et d'automne.
- Un ruissellement localisé aux faciès dénudés et aux zones de concentrations des eaux, qui doit surtout avoir lieu lors des épisodes orageux de fin d'été, d'intensité forte mais de durée insuffisante pour faire remonter les nappes. Dans ce cas de figure, il y a le plus souvent réinfiltration dans des zones mieux couvertes et de moindre pente.

En conséquence, il paraît clair que seule une très faible part de la lame d'eau incidente emprunte un trajet excluant tout passage dans le sol lors de son transit vers la rivière.

#### *I.4.3 conclusion*

Ce chapitre permet de proposer un schéma du transit de l'eau au travers des bassins-versants, en fonction de leur temps de contact avec la rhizosphère:

- type 1: Les eaux sans contact avec la rhizosphère. Ce sont les eaux tombant sur les zones saturées en contact avec le réseau de drainage; elles peuvent représenter une part non négligeable de l'écoulement lors des grands épisodes de printemps ou d'automne, mais leur participation à la lame écoulée annuelle reste très faible.
- Type 2: temps de contact avec la rhizosphère très court (qq mn à 48h). Il s'agit des eaux circulant dans la macroporosité du sol, qui représente près de

50% de la porosité totale; leur trajet peut être très varié, selon qu'il présente ou non une phase de ruissellement antérieure (ruissellement localisé) ou postérieure (résurgence ou "piping" en bas de pente) à l'infiltration, et selon qu'il court-circuite ou non la nappe phréatique; en conséquence, leur temps de séjour dans le bassin versant peut varier de moins d'une heure à plusieurs semaines.

-Type 3: temps de contact prolongé (>48h): il s'agit des eaux retenues dans les capillaires du sol, qui peuvent connaître des fortunes diverses: évaporation, assimilation par la végétation, mélange avec les eaux de l'épisode suivant.

Ces deux derniers types d'eau participent à l'écoulement dans des proportions qui varient suivant la répartition et l'importance des épisodes pluvieux:

-si les pluies sont réparties très inégalement dans l'année (quelques périodes très humides séparées par de longues récessions) ce sont les eaux du type 2 qui dominent largement: en période humide, la capacité de rétention du sol est vite dépassée et toute l'eau en surplus transite très vite, et quand les pluies reviennent après une période sèche, il reste très peu d'eau de type 3 susceptible d'être reprise par mélange.

-si les précipitations sont mieux réparties, de nombreuses pluies tombent sur un sol ressuyé mais proche de la capacité au champ, et c'est donc un mélange d'eau des deux types qui percole. Il est a priori difficile d'évaluer les proportions de ce mélange, qui dépendent vraisemblablement de l'intensité des pluies et des modalités de communication entre les pores de tailles très différentes.

Notons aussi que dans les zones saturées, cette distinction n'est plus valable, le temps de contact ne dépendant plus seulement de la géométrie de pores mais aussi de l'existence ou non d'une charge hydraulique. Il peut donc y avoir, suivant les cas, soit renouvellement permanent d'eau dont la vitesse moyenne est fonction de la conductivité hydraulique du matériau et de la charge (tourbières de versant par exemple), soit une certaine stagnation avec renouvellement en période pluvieuse uniquement (tourbières de bas-fonds).

Cette typologie ne recoupe donc pas la décomposition classique en hydrologie eau superficielle/hypodermique/souterraine, et elle est purement qualitative. Elle présente toutefois l'intérêt de distinguer des types d'eau aux comportements biogéochimiques très différents, et de suggérer de prendre en compte la répartition de la pluviosité dans l'interprétation des bilans non seulement hydrologiques mais aussi hydrochimiques.

#### I.4.conclusion

Les bassins-versants se situent dans un domaine pédologique peu différencié (substrat, climat et histoire identiques), mais se présentant dans le détail comme une juxtaposition de petites unités de sols aux variations brutales et imprévisibles, à laquelle le terme de "mosaïque" convient parfaitement.

Dans les trois bassins, cette mosaïque n'a pas exactement la même organisation, mais elle a sensiblement la même composition.

Ainsi, si l'on a pu identifier des différences entre les bassins quant à certaines caractéristiques géomorphologiques ou chimiques, il n'en reste pas moins que la variabilité "intra-bassins" est bien souvent supérieure à la variabilité "inter-bassins", et il semble donc que les dynamiques récentes liées aux différences de végétation n'aient pas encore profondément laissé leur empreinte dans les sols.

La couverture pédologique est marquée par une dichotomie très nette entre des sols de versants souvent squelettiques, très pauvres chimiquement, où l'eau circule rapidement, et des sols de fonds de talweg ou de replats humides où l'eau stagne tout ou partie de l'année, plus épais et moins désaturés. Ces derniers sont bien entendus minoritaires en superficie ( $\approx 10\%$  des Cloutasses,  $\approx 8\%$  de la Sapine et  $\approx 5\%$  de la Latte), mais leur importance hydrologique et géochimique est encore mal connue.

Les autres lacunes principales dans la connaissance de ces sols concernent la matière organique (constituants, modalités d'accumulation et d'évolution), la distribution des épaisseurs de matériau et l'acidité d'échange (variations en fonction de la végétation et peut-être de la saison).

## II LES ENTREES ATMOSPHERIQUES ET LEUR DEVENIR DANS LE SOL

### II.1.LES FLUX HYDRIQUES

#### II.1.1 Introduction:Un pays d'extrêmes

Les précipitations sur les montagnes cévenoles sont l'une des caractéristiques majeures de la région, et marquent profondément le paysage et ses habitants. Passant en quelques heures d'un "cagnard"\* sur un paillasson d'herbes sèches à une approximation de déluge très convaincante, de la paisible chaleur d'un soleil de janvier à une tourmente neigeuse sortie d'un roman de London, le berger, le promeneur comme le chercheur en hydrologie désespèrent bien souvent.

C'est ainsi qu'en sept années de suivi seulement, nous avons enregistré des modules annuels de 1300 à 2600mm, des semaines à plus de 500mm de précipitations et des mois sans pluie, des hivers sans neige ou presque, d'autres où les appareils disparaissaient sous des congères de 4m d'épaisseur, et l'on pourrait multiplier ces exemples à l'infini.

Cette introduction sous le signe de l'anecdote n'a d'autre but que de souligner avec quelles précautions il convient de prendre, ici plus qu'ailleurs, les moyennes et autres simplifications que l'on est amené à présenter ici.

#### II.1.2 Le réseau pluviométrique

Depuis 1981, le flanc Sud du Mont-Lozère a été progressivement équipé d'un réseau pluviométrique assez dense (Fig n°1) qui est actuellement en voie d'automatisation. Ceci a permis, malgré les "trous" inévitables dans tout suivi de ce type, de disposer d'une chronique continue de la pluviosité du site (annexe 5) avec une bonne résolution spatiale, chronique dont le dépouillement et l'analyse approfondis mériteraient d'être entrepris (On pourra néanmoins consulter sur ce point les travaux de DUPRAZ, (1983), DIDON (1985), et GUERIN (1987)). En l'absence d'une telle analyse, la lame d'eau sur chaque bassin a été estimée sur les sept années en affectant à chaque poste les coefficients de pondération déterminés par DUPRAZ (1984) en appliquant la méthode des polygones de Thiessen (tab. n°7).

\* Endroit ensoleillé et chaud (languedocien)

|                      | -----postes pluviométriques----- |        |               |                 |       |
|----------------------|----------------------------------|--------|---------------|-----------------|-------|
|                      | Sapine<br>Basse                  | Escrin | Clout.<br>Bas | Clout.<br>Haut. | Latte |
| Cloutasses (pelouse) | -                                | -      | 0.4           | 0.3             | 0.3   |
| Sapine (hêtraie)     | 0.5                              | 0.5    | -             | -               | -     |
| Latte (epiceas)      | -                                | 0.1    | 0.1           | 0.2             | 0.6   |

Tab.n°7:coefficients utilisés pour le calcul des lames d'eau par bassin (d'après DUPRAZ,1984).

Le même auteur a également recensé les principales erreurs affectant l'estimation de la lame d'eau annuelle, parmi lesquelles on peut souligner:

- Les difficultés de la mesure des épisodes neigeux. En effet, aux incertitudes liées au type d'appareil ou de méthode utilisés quant à la quantité précipitée; s'ajoute le problème de la remise en mouvement du manteau neigeux par le vent qui peut atteindre des proportions considérables (congères de plusieurs mètres d'épaisseur jouxtant des surfaces entièrement balayées) et qui fait planer un doute sur la quantité de neige participant effectivement au bilan hydrologique, surtout dans le Bassin en pelouse. Or la part de neige dans la lame d'eau annuelle est en moyenne de 25%, avec un maximum de 40% en 85-86.

- la non-prise en compte de toute la variabilité spatiale des pluies et des éventuelles modifications des isohyètes au cours du temps.

- les erreurs de mesure, faibles en raison de la qualité des appareils, de la fréquence des passages sur le terrain et des contrôles au seuil systématiques.

Comme le souligne Dupraz, il n'existe pas de méthode d'estimation de l'erreur sur la lame d'eau annuelle mesurée à partir d'un petit nombre de pluviographes. On peut toutefois en donner une estimation en composant les erreurs ponctuelles et la variabilité entre postes (DUPRAZ, op.cit.):

En prenant une erreur standard de 5% sur la pluie journalière (10% s'il s'agit de neige) on calcule une erreur annuelle par poste inférieure à 1%. La variabilité entre postes étant en moyenne de 3.5% sur l'année, l'erreur composée est de l'ordre de 4%. Même les années très neigeuses, on reste en dessous des 5% d'erreur, valeur que nous adopterons ici.

### II.1.3 Le régime des pluies

Les modules moyens mensuels (figures n°7 et n°8) révèlent un régime de pluie nettement bimodal, avec des maxima d'automne (octobre/novembre) et de printemps (avril/mai) et des minima d'été (juillet/août) et de fin d'hiver (février/mars). Mais si le mois de novembre est le plus arrosé en moyenne, c'est aussi celui qui présente la

Figure 7 : lames d'eau mensuelles 1981-88

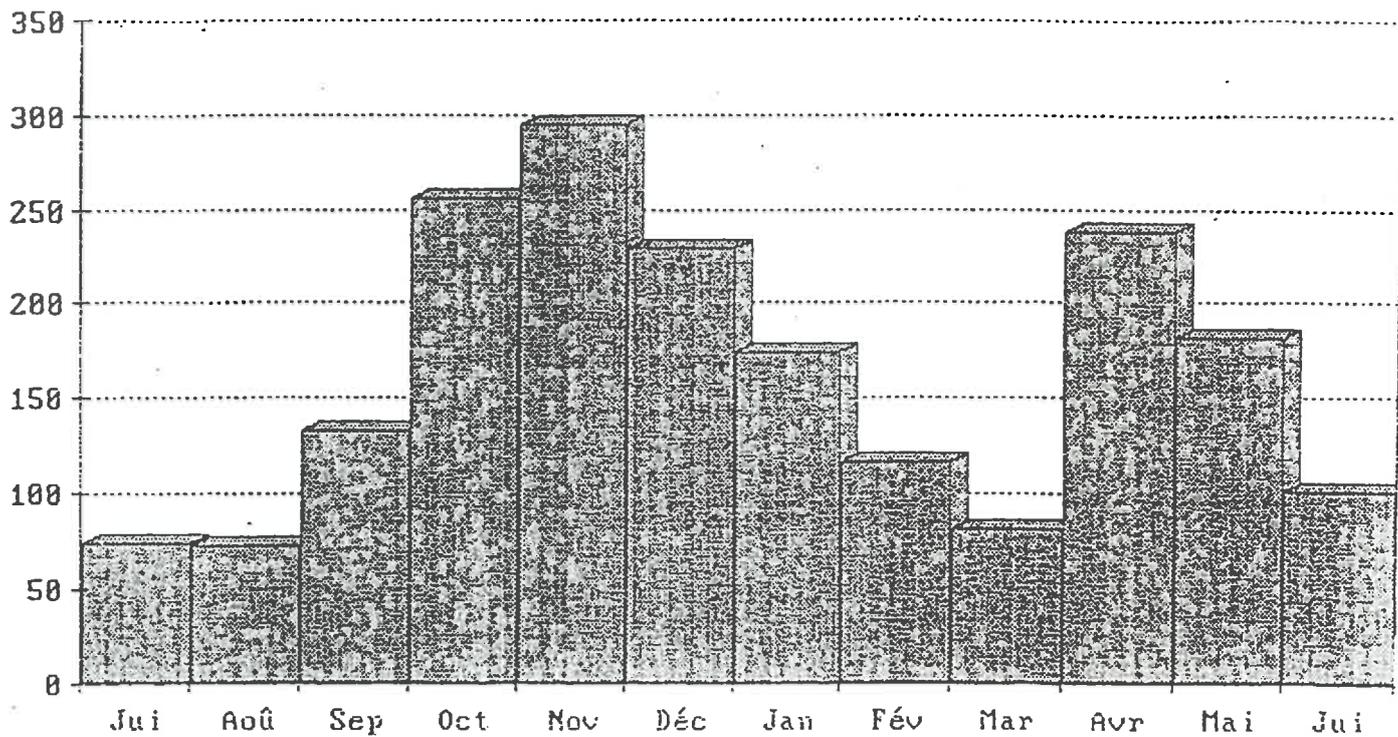
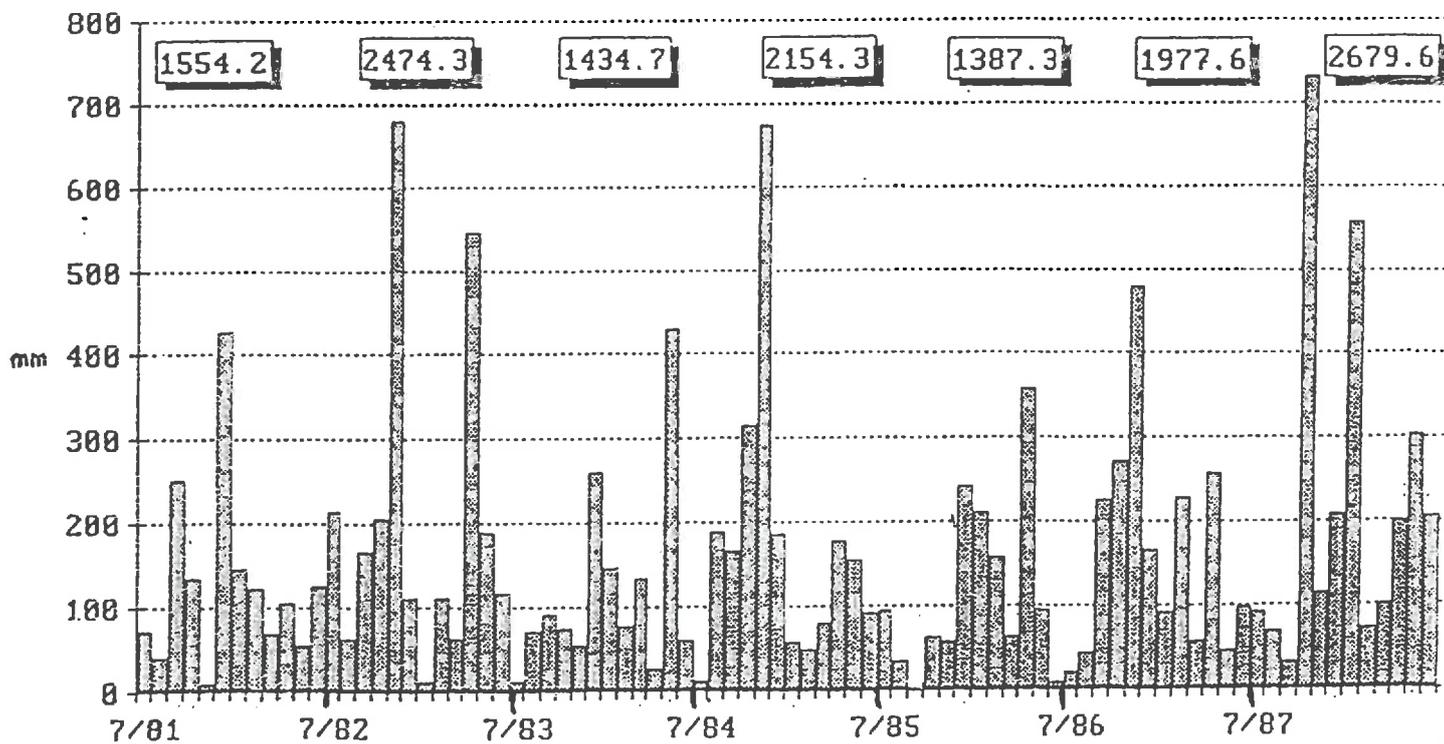


Figure 8: lames d'eau mensuelles 1981-88



plus forte variabilité: 8mm en novembre 81, 680mm en novembre 82. Ces énormes variations, si elles forcent à la prudence dans l'interprétation, ont permis d'observer sur une courte période de suivi un grand nombre de situations différentes; comme il se trouve en outre que la moyenne de ces sept années ( $\approx 1950\text{mm}$ ) est très vraisemblablement voisine du module annuel réel de la région (DIDON 85), on peut penser que cette série chronologique donne une bonne idée du climat et de l'hydrologie de ce milieu. Deux types de perturbations sont à l'origine de ces pluies:

- Des perturbations océaniques typiques, parcourant la France d'Ouest en Est, donnant des pluies fines et peu abondantes, en averses, fréquentes en hiver et en début de printemps.

- Des épisodes d'un type particulier, appelés "pluies cévenoles", précipitations très abondantes de types orographiques dont on peut ainsi schématiser le déroulement: Une dépression centrée sur le Golfe de Gènes ou sur l'Espagne provoque la remontée vers le Nord de masses nuageuses qui se vident en rencontrant les premiers reliefs. Souvent se surimpose alors un phénomène de "goutte froide" lié à la présence d'un anticyclone sur le Nord du pays. Il en résulte alors des épisodes de pluies de longue durée (36 à 72h, parfois plus), d'intensité moyenne mais soutenue. Leur période de probabilité d'occurrence maximum semble être du 15 octobre au 15 novembre et du 15 avril au 15 mai.

Ces pluies cévenoles, qui représentent près des deux-tiers de la lame d'eau annuelle, nécessitent donc un certain concours de circonstances d'où leur venue capricieuse, qui explique dans une large mesure les forts écarts constatés d'une année sur l'autre.

#### II.1.4 Les flux hydriques sous couvert forestier

L'étude des modifications subies par la pluie en quantité et en qualité lors de leur passage à travers les frondaisons fait l'objet de très nombreux travaux, dont il serait fastidieux ici de faire la revue complète. On sait que la distribution spatiale des précipitations et la quantité arrivant au sol sont profondément affectées par les organes aériens des plantes, par le jeu d'un ensemble de processus: ces organes se couvrent d'un film d'eau qui peut être soit absorbé, soit évaporé, soit évacué par égouttage des feuilles et par écoulement le long des troncs. Les gouttelettes de brouillard sont captées, les frondaisons se chargent de neige qui peut se sublimer. Tout cela dépend de la structure du peuplement, des caractéristiques morphologiques et phénologiques des canopées, des conditions météorologiques pendant et après l'épisode pluvieux. Une mesure correcte de ces phénomènes demande la mise en oeuvre d'un dispositif de mesure assez lourd, pour

des résultats difficilement extrapolables, et une erreur standard finale qui reste toujours assez élevée (PRICE et WATTERS, 1988). On aboutit en général à une modélisation simple de l'éégouttement et/ou de l'écoulement en fonction de la pluie, hebdomadaire ou épisode par épisode le plus souvent du type :

$$P_c = aP_t - b$$

où:  $P_t$  = pluie totale (hors couvert)

$P_c$  = pluie sous couvert

Le paramètre  $b$  peut être interprété comme la capacité de rétention des frondaisons, compris en général entre 0,1 et 2mm (ZINKE, in RODA 1983). La pente de la droite correspond grossièrement au pourcentage de la pluie arrivant au sol. Le tableau n° 8 présente quelques exemples de ces régressions.

Nous ne pouvons prétendre ici présenter de tels modèles, le dispositif utilisé dans cette étude étant très insuffisant pour maîtriser la variabilité spatiale du phénomène: il s'agit en effet de 2 placettes par type de forêt (hêtraie et pessière), avec de 2 à 5 points de mesure par placette (localisation carte Figure 1). Chaque placette est une surface d'environ 100 m<sup>2</sup>, incluant de 4 à 6 arbres (ou cépées), des entonnoirs de 20 cm de diamètre étant placés à des distances variables des troncs. Entonnoirs et bidons de collecte sont du même type que ceux utilisés pour la pluie. La localisation des placettes a été choisie en fonction de différents critères: représentativité, facilité d'accès, possibilité d'installer des lysimètres, état sanitaire dans le cas de la deuxième placette d'épicéas, installée en mai 87 en raison de l'attaque parasitaire de la pessière de la Latte.

| Espèces            | équations   | références                    |
|--------------------|-------------|-------------------------------|
| Pins américains    | 0.91Pt-0.5  | Helvey, 1971 (*)<br>id.       |
| Epicea             | 0,79Pt-0.5  |                               |
| Feuillus mélangés: |             |                               |
| été                | 0.94Pt-0.35 | Helvey et Patric,<br>1965 (*) |
| hiver              | 0.97Pt-0.20 |                               |
| Chênes mélangés    | 0.95Pt-0.32 | Eaton et al., 1973            |
| Pin Douglas        | 0.85Pt-1.81 | Mitscherlich al., 70 (E)      |
| Pin pignon         | 0.77Pt-1.3  | Rapp et Ibrahim, 1978         |
| Pin d'Alep         | 0.81Pt-0.15 | Rapp et Romane, 1968          |
| Chêne vert         | 0.73Pt-0.42 | Rapp et Lossaint, 1971        |
| id.                | 0.59Pt+2.3  | Rodà, 1983                    |
| hêtre              | 0.80Pt-0.61 |                               |
| Sapin blanc        | 0.95Pt-5.04 |                               |

Tableau 8: Revue bibliographique de modèles  $P_c = f(P_t)$

(par épisode ou hebdomadaire, en mm)

(\*) in IBP, 1978

(E) in Noirfalise et Vanesse, 1975

Les volumes recueillis présentaient un coefficient de

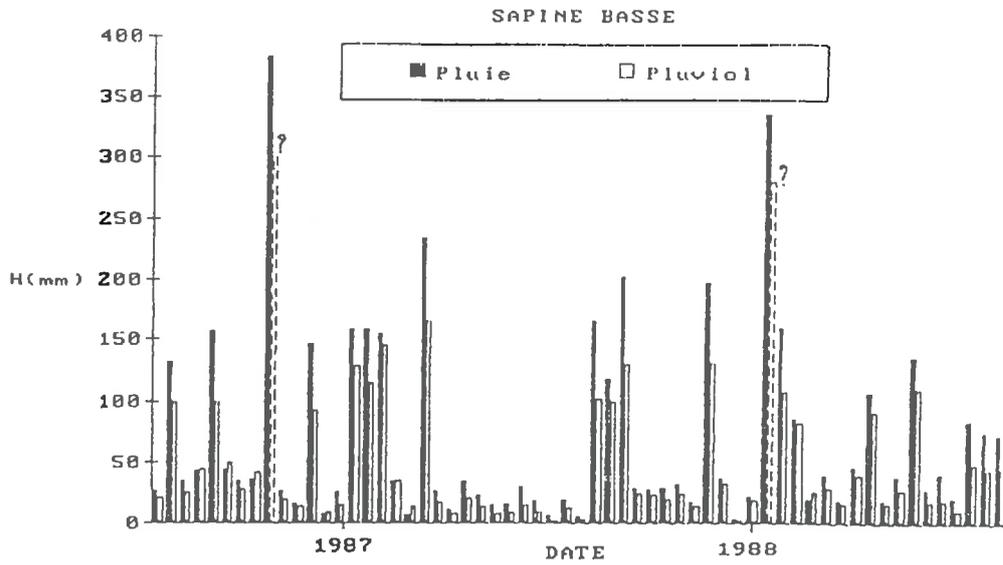


Figure 9: Lames d'eau par épisodes, mesurées à partir des volumes recueillis. Hêtres

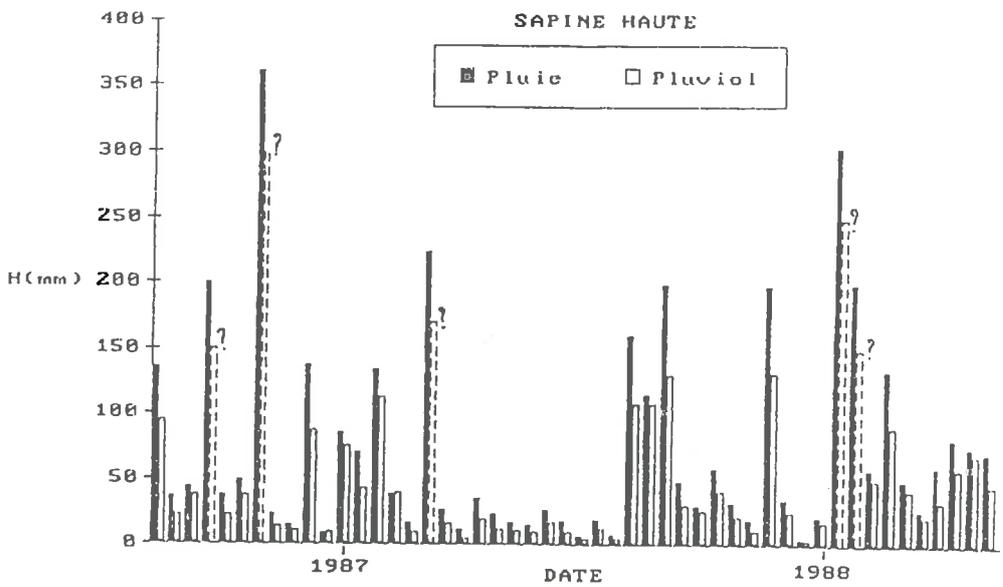


Figure 10: Lames d'eau par épisodes, mesurées à partir des volumes recueillis. Hêtres

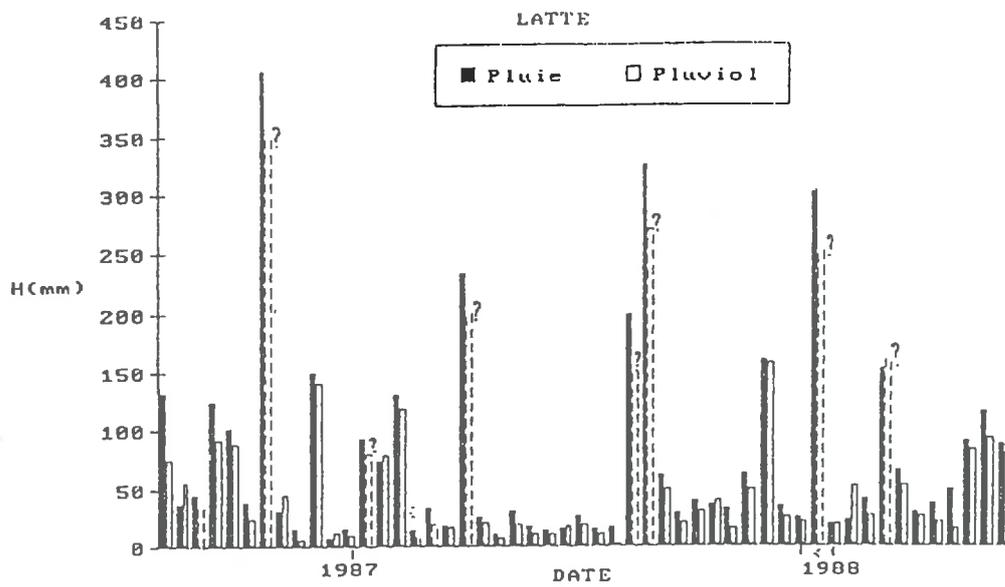


Figure 11: Lames d'eau par épisodes, mesurées à partir des volumes recueillis. Epiceas

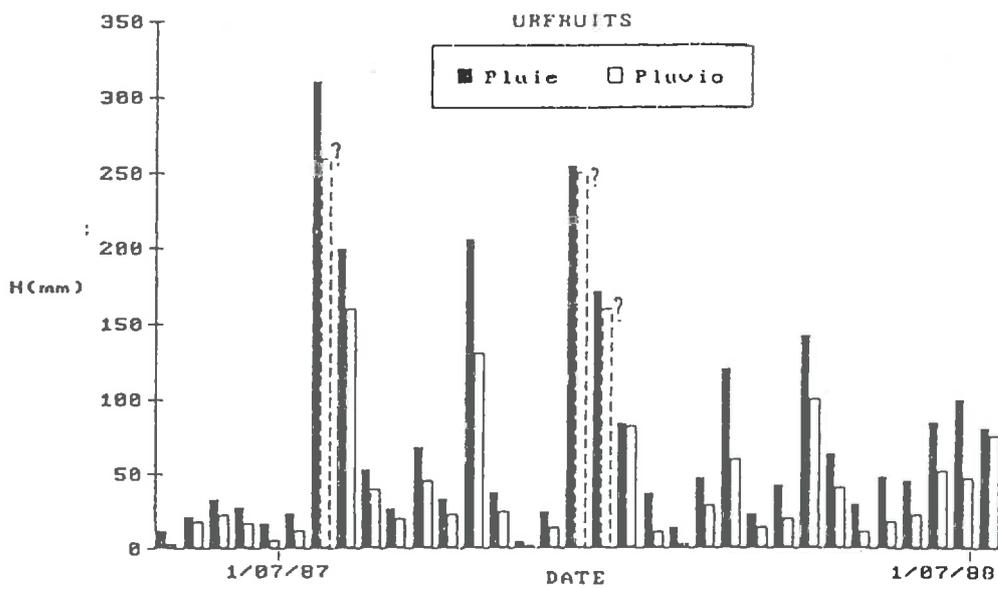


Figure 12: Lames d'eau par épisodes, mesurées à partir des volumes recueillis. Epiceas

variation le plus souvent compris entre 20 et 50% pour chaque placette. Les entonnoirs placés le long des troncs débordaient systématiquement sous hêtraie, tandis qu'ils ne présentaient pas de différence significative avec les autres (y compris dans la composition chimique) sous épicéas. La mesure de l'écoulement cortical est donc inexistante, d'où sous-estimation des flux, surtout sous hêtres.

En outre, les bidons de prélèvement débordaient pour une quantité de pluviollessivats correspondant à environ 160mm, d'où une surestimation systématique de l'interception par sur-représentation des faibles épisodes (Figures 9 à 12).

Malgré toutes ces faiblesses, les courbes de régression que nous obtenons présentent une certaine cohérence (Tab. n°9). Le coefficient de corrélation est toujours bon, la relation est linéaire et la pente significativement non nulle. Les pentes des droites sont plutôt faibles, mais très proches pour les deux placettes sous hêtres, alors qu'elles sont nettement plus variables sous épicéas. Il faut toutefois noter que la dégradation du feuillage des arbres de la station de La Latte et le dispositif plus réduit utilisé dans cette station peut expliquer des résultats peu exploitables. D'autre part, si les deux placettes de hêtres ont un aspect assez semblable, ce n'est pas le cas des stations d'épicéas, le peuplement des Urfruits étant nettement plus fourni et plus fermé que celui de La Latte.

| Station            | équations   | r <sup>2</sup> et population |
|--------------------|-------------|------------------------------|
| -----              |             |                              |
| Sap-basse (hêtre): |             |                              |
| été                | 0.68Pt+0.76 | 0.95 (30)                    |
| hiver              | 0.71Pt+4.61 | 0.96 (29)                    |
| Sap-haute (hêtre): |             |                              |
| été                | 0.73Pt-0.94 | 0.96 (27)                    |
| hiver              | 0.73Pt+0.61 | 0.97 (18)                    |
| Urfruits (épicéa): |             |                              |
| été                | 0.78Pt-7.29 | 0.94 (17)                    |
| hiver              | 0.64Pt-1.16 | 0.92 (13)                    |
| Latte (épicéa) :   |             |                              |
| été                | 0.76Pt+0.26 | 0.87 (20)                    |
| hiver              | 0.94Pt-0.97 | 0.94 (21)                    |
| -----              |             |                              |

Tableau n°9: régressions linéaires  $P_c = f(P_t)$   
(en mm, à l'échelle de l'épisode)

Les droites de régression obtenues en période défeuillée montrent comme de juste une interception plus faible qu'en période feuillée dans la hêtraie, même si la différence entre les deux périodes est faible, fait assez souvent rapporté ailleurs (p. ex. FORGEARD et al., 1980, MITSCHERLICH et al., op.cit.).

Pour les mêmes périodes (novembre à avril et mai à octobre), les épicéas ont un comportement moins net. Aux Urfruits, la capacité de rétention des frondaisons semble augmenter en été mais l'interception maximale semble diminuer, alors que les tendances inverses s'observent à la Latte.

Au total, il y a donc bien sous-estimation des flux sous couvert. Ainsi la simple application des régression obtenues aboutirait pour la hêtraie à une interception d'environ 1000mm pour le cycle 1987-88 (le déficit d'écoulement du bassin-versant pour le même cycle n'est que de 750mm...). Nous avons alors choisi d'adopter des modèles inspirés de la littérature, en retenant toutefois des résultats de mesures les faits suivants:

-Le comportement des deux placettes sous hêtres est très voisin, caractérisé par un coefficient d'interception variant peu suivant les saisons et une capacité de rétention des frondaisons plus forte en été.

-Une interception plus forte sous épicéas, surtout aux Urfruits. Les résultats contradictoires obtenus sur les deux stations entre l'été et l'hiver nous conduisent à appliquer une formule unique pour toute l'année.

-Les modèles retenus doivent être compatibles avec les résultats des bilans hydrologiques des bassins versants.

Les formules retenues sont les suivantes:

Pour la hêtraie :           été :  $P_c = 0,90Pt - 0,5$   
                                  hiver:  $P_c = 0,92Pt - 0,2$

Pour la pessière: Urfruits:  $P_c = 0,80Pt - 1,0$   
                          Latte :  $P_c = 0,85Pt - 0,75$

Nous reviendront sur ces résultats à l'occasion de l'estimation des flux hydriques dans le sol.

## II.2.LES FLUX CHIMIQUES

### II.2.1 Les apports hors couvert

#### II.2.1.1 Données disponibles

Il importe de préciser les modalités d'échantillonnage et d'analyse des pluies qui ont varié un peu au cours de l'étude:

De 81 à juin 83, le point de prélèvement était situé à Gourdouze, à 5km à l'Est des bassins-versants. Depuis juillet 83, il est situé près de l'exutoire du Bassin des Cloutasses (Avec, de juillet 84 à juin 85, une étude de variabilité spatiale sur l'ensemble des bassins-versants (DIDON 1985).

Les pluies sont analysées épisode par épisode depuis 1981 pour les éléments suivants : Ca, Mg, K, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, Si et de

façon moins systématique,  $\text{NH}_4$ .

Depuis juillet 86, le pH, l'alcalinité,  $\text{NO}_3$  et  $\text{NH}_4$  sont aussi analysés en routine.

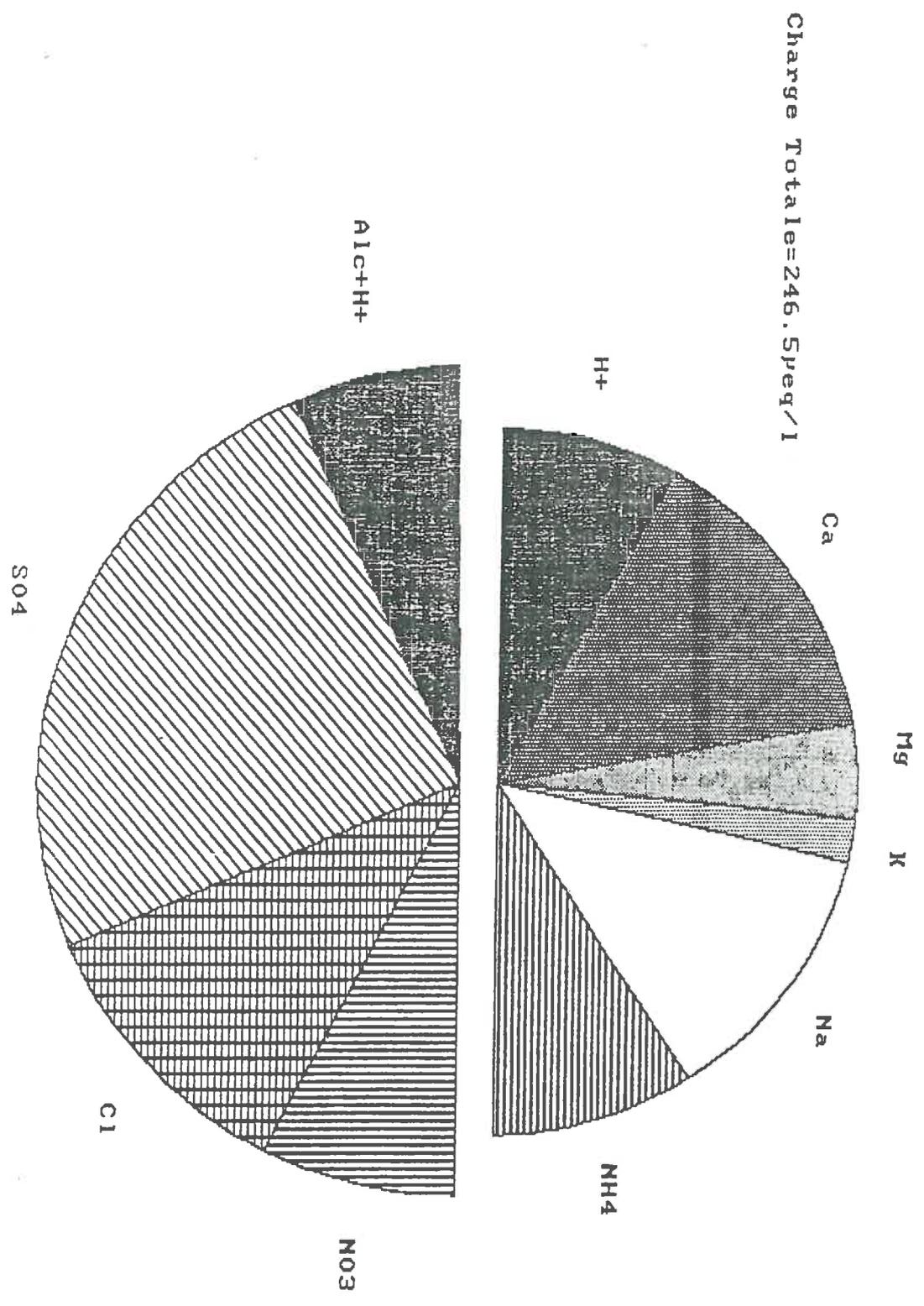
Par souci d'homogénéité, les calculs statistiques et la plupart des interprétations ont porté essentiellement sur les chroniques depuis 1983, et surtout depuis 1986. Le traitement des données antérieures à 1983 a été le fait de DUMAZET(1983).

D'autre part, depuis février 87, on dispose des prélèvements d'un collecteur de pluie à ouverture commandée par le début des averses, placé à proximité immédiate des collecteurs ouverts et relevé en même temps qu'eux. Les résultats correspondant seront étudiés séparément.

#### II.2.1.2. La composition chimique des pluies

Les eaux de pluie sont très peu chargées (charge totale  $< 250 \mu\text{eq/l}$ ), acides (pH moyen de 4.87), et de concentration très variable (Figure 13 et Tableau 10). On voit que les coefficients de variation des concentrations des différentes espèces chimiques sont très forts (de 75 à 200%), même après élimination des points extrêmes (voir i.4). Le déséquilibre de la balance ionique visible sur la figure n°13 est due à la somme des erreurs analytiques, peut-être accentuée par le fait que les moyennes ne sont pas calculées sur la même période pour tous les paramètres. On constate que l'ion sulfate domine, suivi du Calcium puis de Na et Cl. Des ajustements à des lois de distribution connues (loi normale, log-normale, loi gamma, F, exponentielle) ont été tentés. Ne sont mentionnées que les cas où les tests de  $\text{Chi}^2$  et de Kolmogorov-Smirnov ont permis d'accepter l'ajustement. On constate que les cations majeurs sont distribués log-normalement, ce qui signifie, dans l'interprétation classique, que leur niveau dans la pluie résulterait d'un grand nombre de facteurs indépendants à effet multiplicatifs, chaque facteur ayant individuellement un effet négligeable. Pour Na, l'ajustement log-normal est à la limite de validité, pour Cl aussi mais ce dernier s'ajuste avec une loi gamma, ce qui n'a pas d'interprétation simple. Les sulfates présentent une distribution très dissymétrique et un mode peu marqué, qui demanderait une procédure d'ajustement plus complexe que celle utilisée. Les populations des autres paramètres ne présentent pas non plus de distribution de type classique. Nous avons toutefois indiqué, pour chaque soluté, les valeurs des coefficients de symétrie et d'aplatissement. Le premier est d'autant plus grand en valeur absolue que la courbe est dissymétrique, le signe indiquant la branche la plus longue (signe -, prédominance des faibles valeurs, +, prédominance des fortes valeurs). Le coefficient d'aplatissement vaut zéro pour la loi normale, est négatif quand les valeurs autour du mode sont dominantes (distribution plate, à branches courtes), positif dans le cas contraire (courbe très pointue ou longues branches) (CALOT, 1973, SAS, 87). L'allongement du suivi permettra peut-être

FIGURE 13 : Composition moyenne des pluies (1981-88)



|   | H+    | Alc. | Ca    | Mg    | K     | Na      | Cl               | SO4   | NO3  | NH4   | Si   | charge tot |
|---|-------|------|-------|-------|-------|---------|------------------|-------|------|-------|------|------------|
| n   | 119   | 121  | 179   | 180   | 175   | 177     | 172              | 169   | 77   | 152   | 169  | 61         |
| Moy. arithm.                              | 13,1  | 2,4  | 35,5  | 11,7  | 5,5   | 28,3    | 29,5             | 84,1  | 22,2 | 21,4  | 1,6  | 247,5      |
| Moy. pond.                                | 13,6  | -1,2 | 31    | 10,6  | 4,4   | 25,8    | 26,9             | 72,4  | 21   | 17,3  | 1,2  | 237,2      |
| écart-type                                | 16,9  | 39,1 | 27,5  | 7,8   | 5,1   | 40,4    | 28,1             | 75,4  | 14,8 | 18,4  | 2,6  | 104,1      |
| mini                                      | 0,1   | -80  | 5     | 2,5   | 0,3   | 6,5     | 1,1              | 2,1   | 0,7  | 0,7   | 0    | 83,9       |
| maxi                                      | 81,3  | 170  | 189,6 | 38,7  | 33,8  | 212,6   | 203              | 624,6 | 67,1 | 107,1 | 21,1 | 542,6      |
| coef. de var.<br>( $\sigma$ /moy. ar.)(%) | 130   | 1617 | 77,6  | 66,7  | 93,3  | 94,2    | 83,8             | 89,7  | 66,6 | 86,1  | 160  | 42,1       |
| coef. sym.                                | 0,228 | 1,12 | 2,22  | 1,5   | 2,6   | 1,79    | 2,45             | 4,8   | 0,9  | 11,77 | 3,44 | -          |
| coef. aplat.                              | -0,5  | 2,66 | 7,11  | 1,96  | 9,12  | 2,96    | 9,54             | 28,6  | 0,41 | 4,2   | 19,6 | -          |
| distribution                              | -     | -    | log.N | log.N | log.N | (log.N) | $\Gamma$ (log.N) | -     | -    | -     | -    | -          |

Tableau 10:Composition chimique des pluies :Description statistique  
de la population d'échantillons étudiée,récoltée entre 1983 et 88  
concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

| Cycle                                  | Lame d'eau<br>(mm) | H+        | Alc.  | Ca    | Mg   | K    | Na   | Cl    | SO4  | NO3  | NH4   | Si  |
|--|--------------------|-----------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|-----|
| 1981-82                                | 1554               | -         | -     | 24,1  | 9,5  | 3,1  | 39,6 | 36,7  | 55,9 | -    | 22,1  | 1,1 |
| 1982-83                                | 2474               | -         | -     | 39,3  | 8,3  | 3,1  | 27,6 | 24,84 | 50,7 | -    | 31,7  | 0,2 |
| 1983-84                                | 1473               | -         | -     | 20    | 11,1 | 3,1  | 25,7 | 32,7  | 84,2 | -    | 15,1  | 0,7 |
| 1984-85                                | 2154               | (37,2)    | (3,8) | 27,5  | 7,15 | 2,5  | 20,4 | 22,4  | 62   | -    | 15,9  | 1,5 |
| 1985-86                                | 1387               | 11        | 21,4  | 59,1  | 14,1 | 5,9  | 38,4 | 40,5  | 74,3 | -    | 11,9  | 1,4 |
| 1986-87                                | 1978               | 18        | -10,4 | 25,7  | 11,6 | 4,8  | 29,1 | 29,5  | 79,7 | 17,1 | 26,1  | 0,8 |
| 1987-88                                | 2680               | 19,4      | -6,3  | 33,2  | 11,3 | 6,1  | 26,8 | 27,7  | 63   | 23,4 | 16,5  | 0,3 |
| Moyenne<br>pondérée                    | 1957               | 18,3      | -1    | 32,52 | 10,2 | 4,1  | 27,7 | 29,4  | 65,7 | 20,7 | 20,57 | 0,8 |
| Coef.var.<br>( $\sigma$ /m %)          | 26                 | -         | -     | 40,5  | 22,2 | 36   | 19,2 | 21    | 28,4 | -    | 35,4  | 60  |
| Contribution des sels<br>marins (en %) |                    | Réf. Na : |       | 3,7   | 61,6 | 13,9 | 100  | 106   | 5    |      |       |     |
|  |                    | Réf. Cl : |       | 3,5   | 57   | 13   | 94   | 100   | 4,6  |      |       |     |

Tab.11 :Compositions moyennes pondérées annuelles des pluies  
Bassin des Cloutasses (Pelouse)  
Avec moyenne et variabilité interannuelle,contribution des sels  
marins (voir texte).concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

une meilleure formalisation mathématique de ces populations.

#### II.2.1.2.1 Variations temporelles et saisonnières

Le mode d'échantillonnage choisi (épisode par épisode) rend difficile l'utilisation de méthodes statistiques d'analyse de séries chronologiques, prévues pour les séries à pas de temps fixes. Toutefois, eu égard à la très forte variabilité des paramètres, et à l'aspect très chaotique de leurs variations au cours du temps (v. ANNEXE), il semble peu probable que l'on en obtienne des résultats très probants. Les moyennes pondérées annuelles semblent confirmer l'absence de tendances temporelles nettes, mais permettent les remarques suivantes (Tableau n° 11):

-La variabilité interannuelle est bien entendue moins forte que la variabilité par épisode, mais elle reste assez élevée (C.V. de 20 à 40%), les éléments les moins variables étant les éléments d'origine marine (Na, Cl, Mg).

-Deux cycles se détachent du lot: 83-84 pour des concentrations en soufre de 50% supérieures à la moyenne, et 85-86 pour des concentrations fortes pour la plupart des éléments, et surtout pour le calcium. Ce dernier cycle étant le moins humide, il est assez logique d'y trouver des pluies en moyenne plus concentrées (voir plus loin), l'excès de Calcium pouvant en outre correspondre à des arrivées de poussières sahariennes plus fortes qu'à l'accoutumée. Le cycle 83-84 est également plutôt sec, mais là seules les concentrations de sulfates augmentent de façon notable. On ne peut exclure d'éventuelles erreurs analytiques ou pollutions systématiques d'échantillons (on a d'ailleurs exclu trois analyses par trop suspectes), d'autant que l'on ne relève nulle part dans la littérature de "pic" similaire, les années 80 ayant plutôt vu une baisse générale des émissions de soufre dans l'atmosphère (Bonneau et Landmann, 1988).

De même, les tendances saisonnières sont peu marquées. Toutefois, en séparant l'année entre une période d'activité biologique (mai à octobre) et une période de repos végétatif (novembre à avril), on peut identifier des différences significatives sur les moyennes de concentrations en alcalinité, Ca et K (Procédure GLM, test de S.N.K., SAS 87), les valeurs estivales étant les plus élevées. Là encore, cela pourrait correspondre à des influences sahariennes plus fréquentes en été qu'en hiver (les "pluies rouges" sembleraient les plus nombreuses en fin de printemps, cf. aussi LOYE-PILOT et al, 1986, AVILA, 1987). Des épisodes de pollution très intenses à caractère saison-

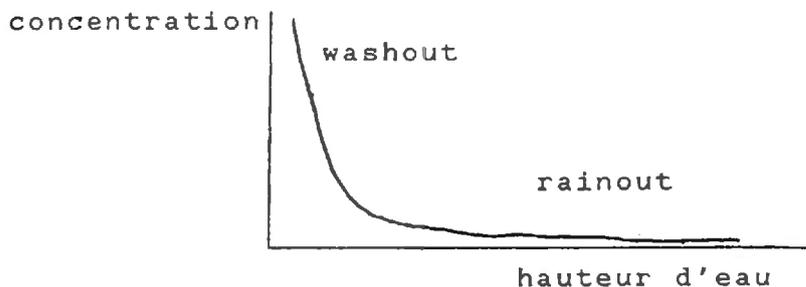
nier, tels qu'ils ont pu être observés dans Les Vosges en hiver (PROBST et DAMBRINE, 1988), n'ont jusqu'à présent pas été identifiés ici, même si la concentration en sulfates est légèrement supérieure en hiver (94  $\mu\text{eq/l}$  contre 73  $\mu\text{eq/l}$  en été).

La même méthode de comparaison appliquée aux concentrations de pluie, de neige et d'épisodes mixtes pluie/neige n'a permis de mettre en évidence aucune différence significative entre ces diverses formes de précipitations.

#### II.2.1.2.2. Relations Hauteur-Concentrations

##### a) A l'échelle de l'épisode

En théorie, la courbe de la concentration moyenne en fonction de la hauteur de pluie par épisode a la forme d'une hyperbole, dont la partie verticale représente le "Washout", ou incorporation de gaz, poussières ou aérosols par les gouttes lors de leur chute, et la partie horizontale le "rainout", ou composition initiale des nuages (voir schéma) (Wolaver et Lieth, 1972, in RODA, 1983).



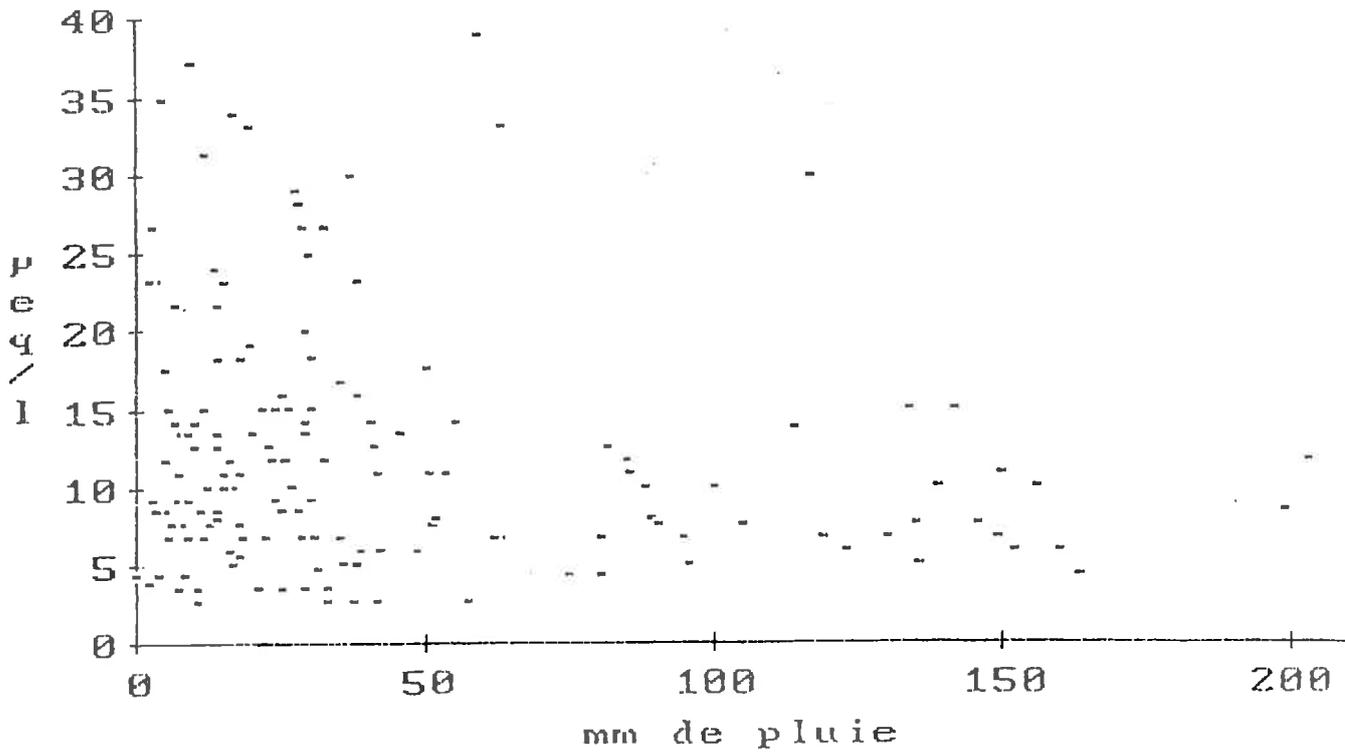
d'après RODA, 83

La dispersion observée en pratique par rapport à ce modèle schématisé résulte d'une grande complexité des mécanismes réels et des facteurs qui les influencent (évaporation pendant la chute des gouttes, arrivées de nouvelles masses nuageuses de composition différente et de la durée de leur chute, etc.) (RODA, 1983, AVILA, 1987). On pourrait toutefois dire en schématisant que plus la branche verticale de l'hyperbole est marquée et étroite, plus la source de l'élément considéré est proche du point de chute et limitée en quantité. Une courbe plus "molle" correspondant plutôt soient à des éléments dont l'origine est proche du lieu de formation des nuages, soit à une origine diffuse.

A partir de ces quelques réflexions, on peut tenter d'expliquer l'allure des nuages de points obtenus ici (figure 14). L'allure hyperbolique est bien reconnaissable pour Ca, K, NH<sub>4</sub>, un peu moins pour SO<sub>4</sub> et Mg, beaucoup moins accusée pour Na, Cl, peu reconnaissable pour NO<sub>3</sub>. Toutefois, la grande dispersion des mesures fait que l'on n'obtient dans aucun cas un modèle hyperbolique ( $C = a/p + b$ ) statistiquement acceptable.

Na et Cl étant presque exclusivement d'origine marine, il est normal que le "rainout" domine le "washout". Les concentrations soutenues pour des hauteurs d'eau importantes

Mg=f(Hauteur pluie)



Ca=f(Hauteur pluie)

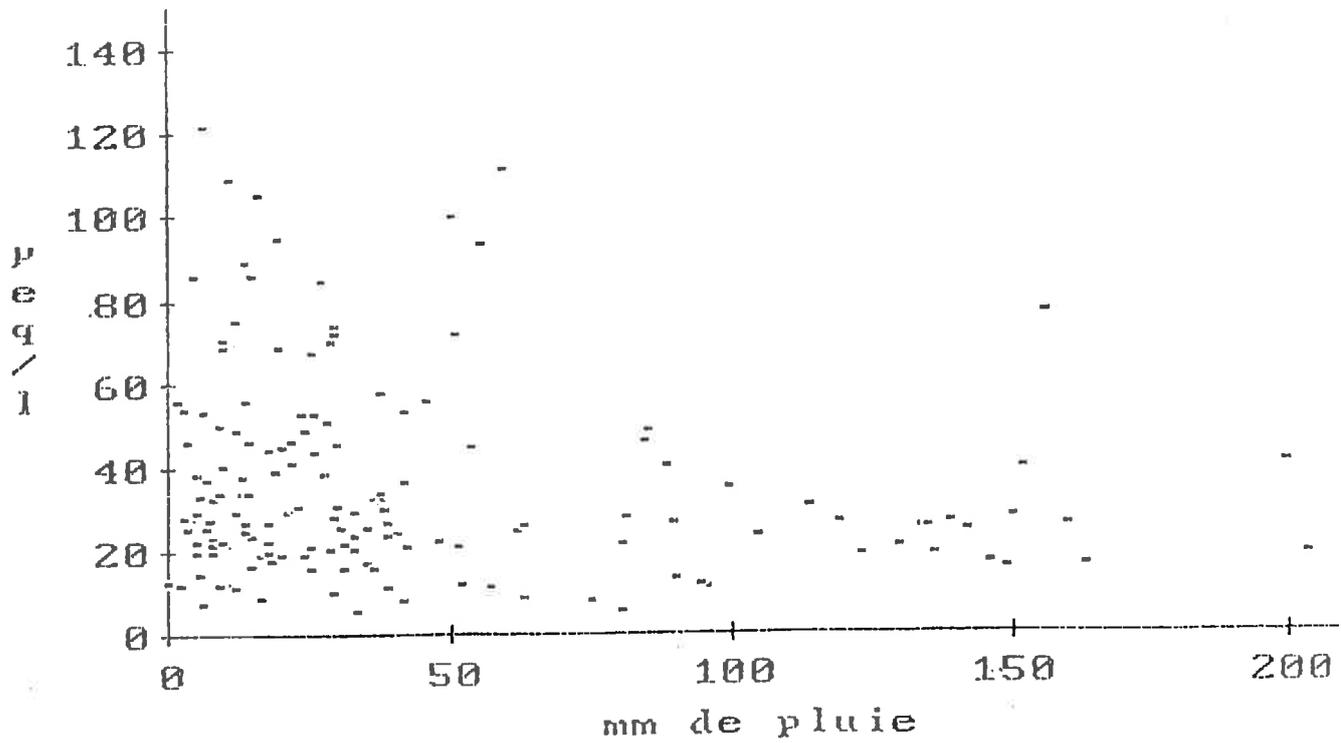
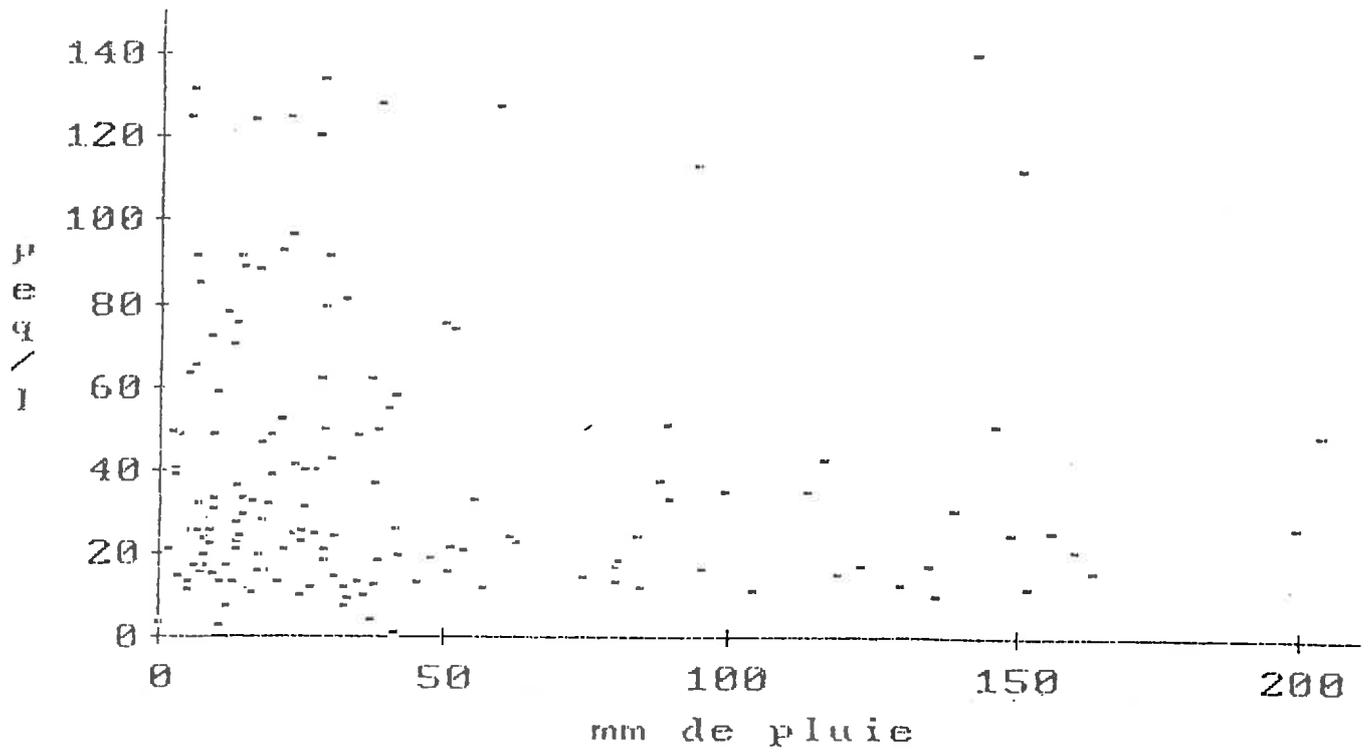


Figure 14a :Concentrations dans la pluie en fonction des hauteurs d'eau par épisode.

$N_a = f(\text{Hauteur pluie})$



$Cl = f(\text{Hauteur pluie})$

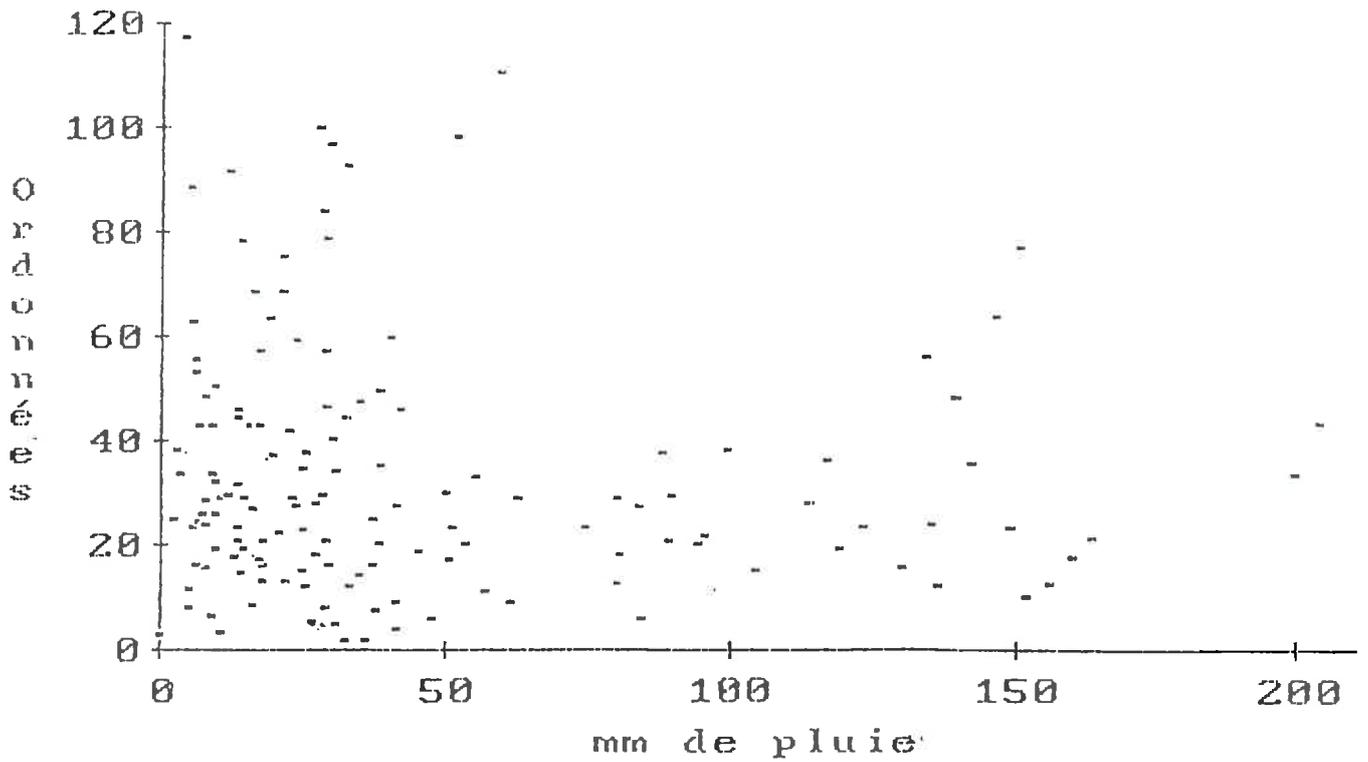


Figure 14b : Concentrations dans la pluie en fonction des hauteurs d'eau par épisode.

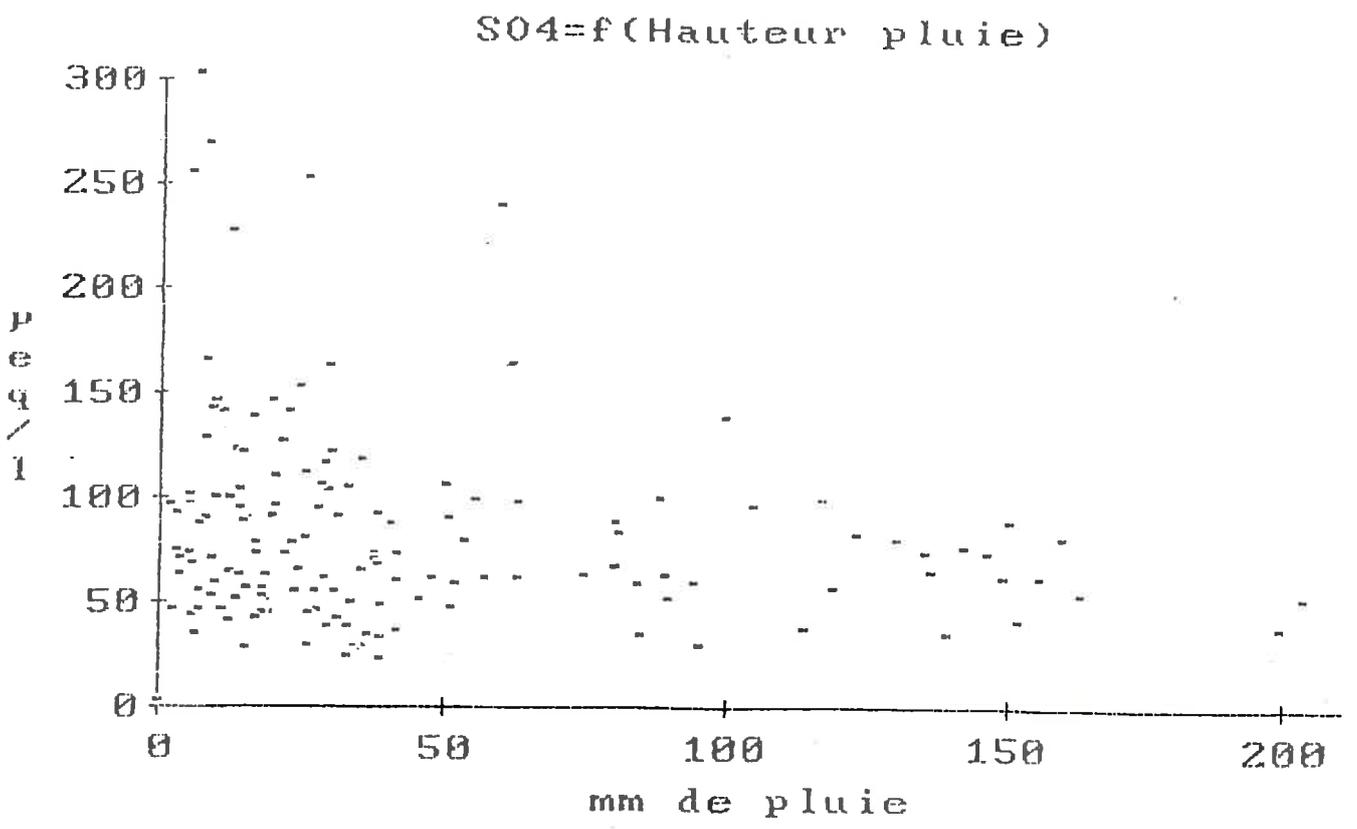
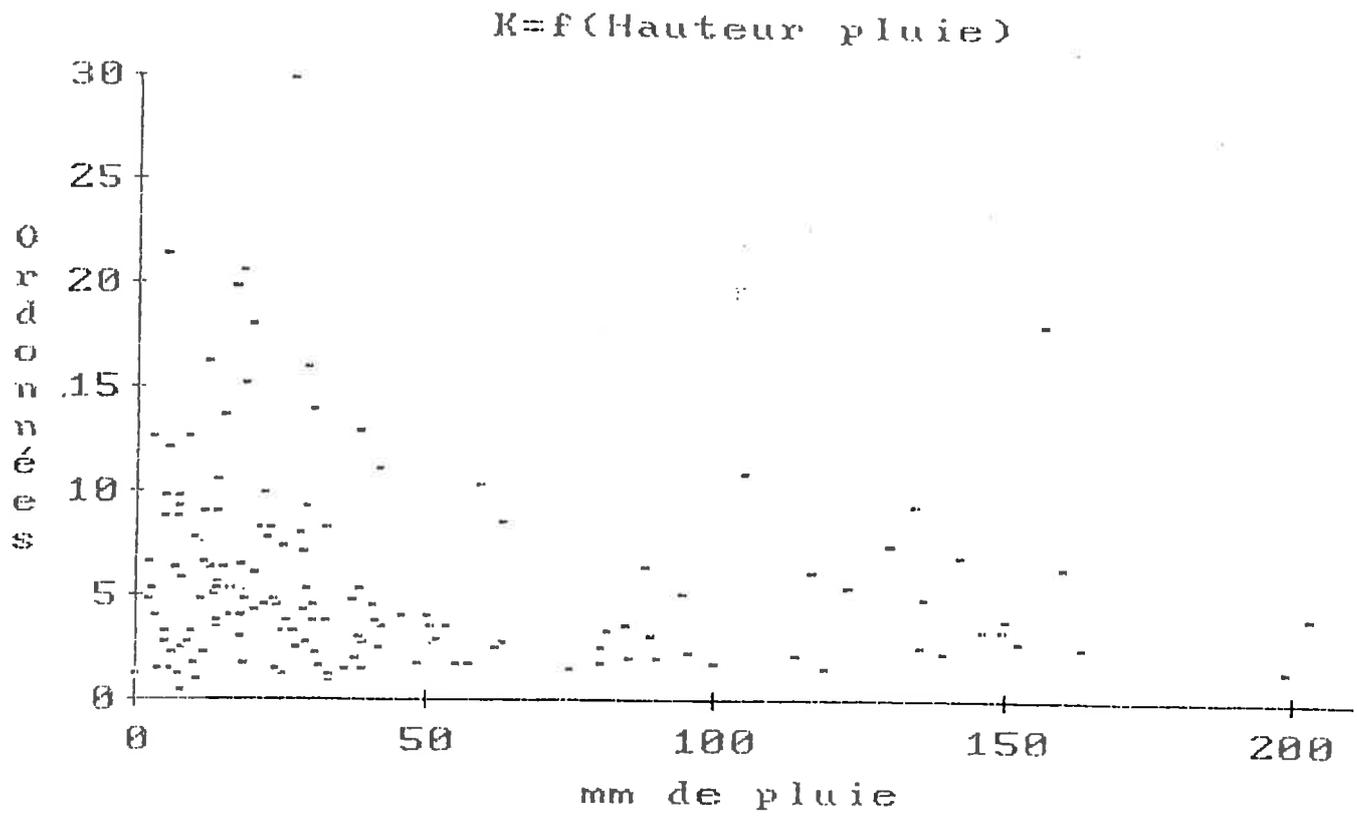
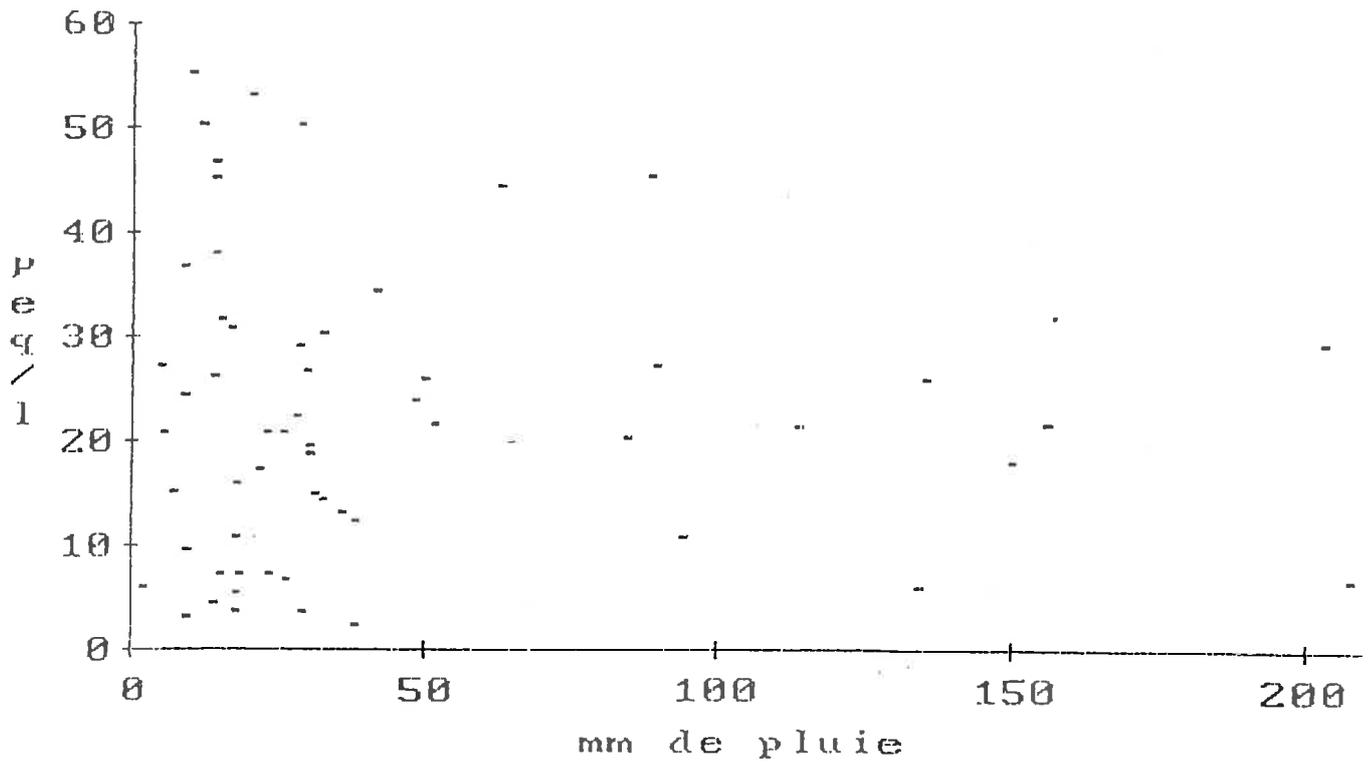


Figure 14c : Concentrations dans la pluie en fonction des hauteurs d'eau par épisode.

$\text{NO}_3 = f(\text{Hauteur pluie})$



$\text{NH}_4 = f(\text{Hauteur pluie})$

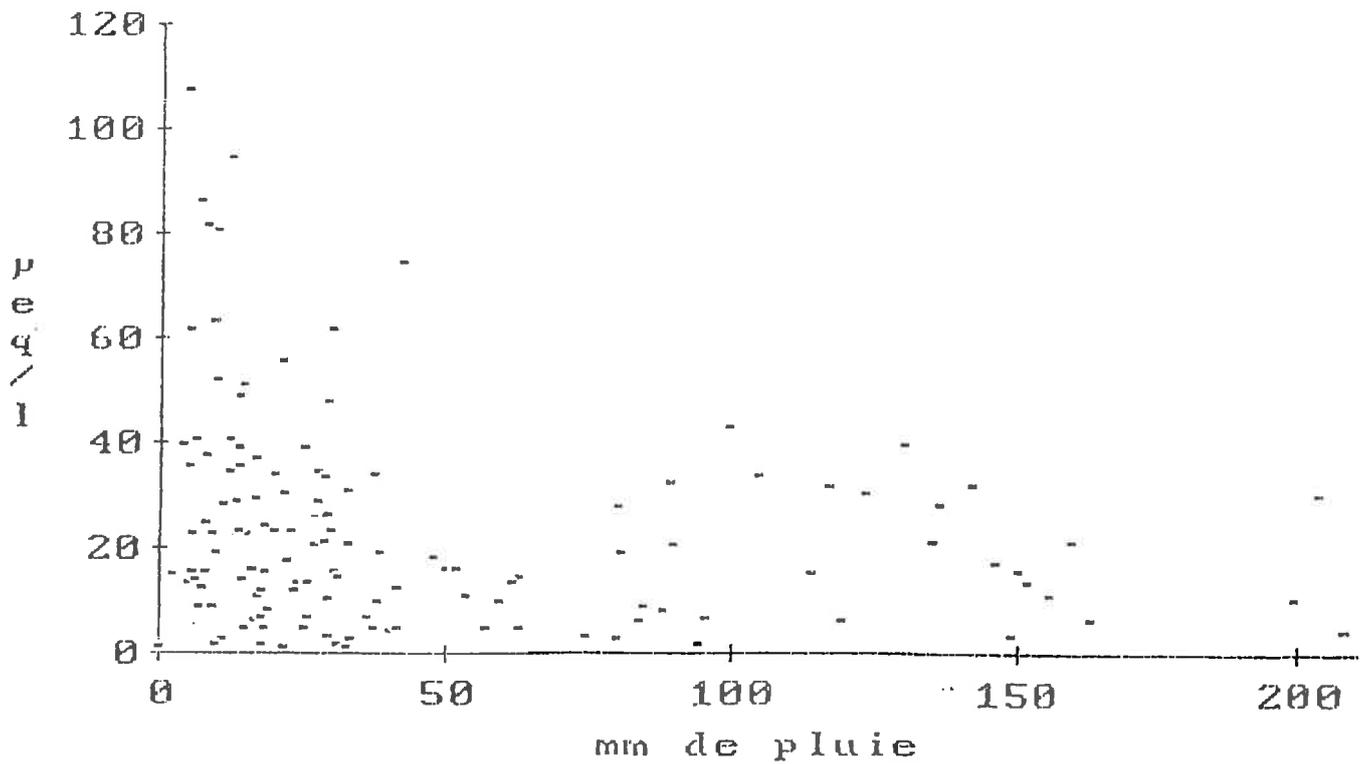
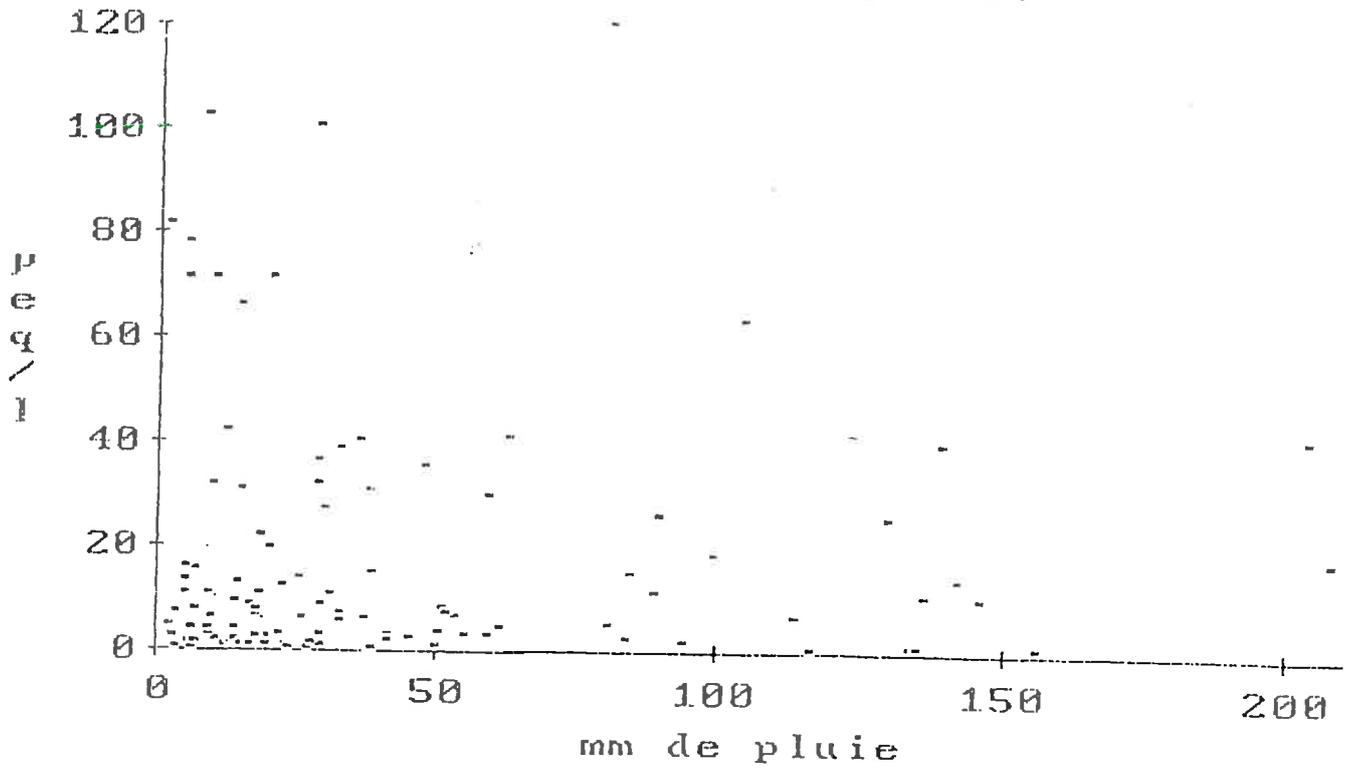


Figure 14d : Concentrations dans la pluie en fonction des hauteurs d'eau par épisode.

$H+ = f(\text{Hauteur pluie})$



$Alc. = f(\text{Hauteur pluie})$

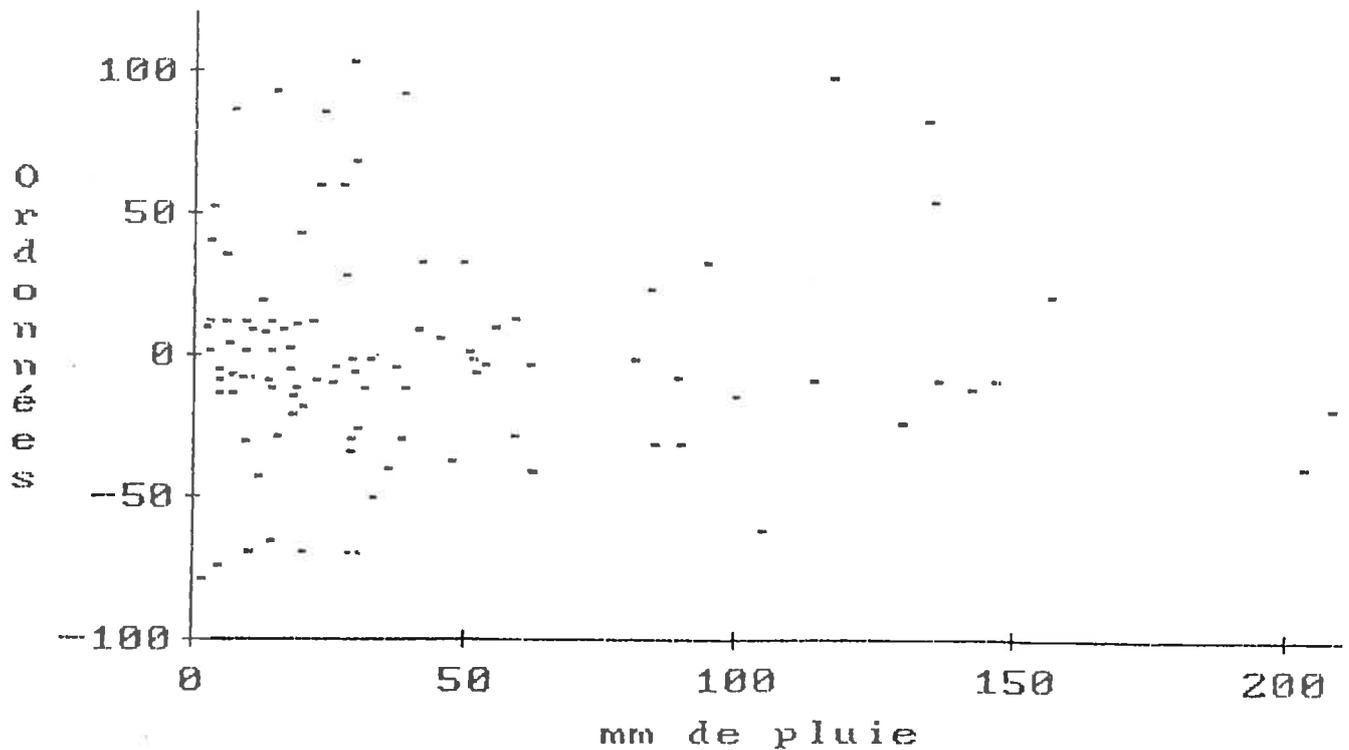


Figure 14e : Concentrations dans la pluie en fonction des hauteurs d'eau par épisode.

suggèrent des masses nuageuses très chargées "d'air marin". L'origine essentiellement continentale de K et Ca permet d'envisager des sources proches, rapidement diluées. L'origine de l'azote est plus complexe. Une partie est naturelle (activité des bactéries dénitrifiantes des sols et des océans, orages (N'GUYEN et SERVANT, 1984), une partie agricole (engrais organiques et azotés), une partie urbaine (combustibles fossiles). On peut penser que l'azote ammoniacal proviendrait ici plutôt d'activités agricoles ou des massifs forestiers voisins, l'origine de NO<sub>3</sub> étant plus incertaine.

L'origine mixte de Mg, en partie continentale en partie marine (voir plus loin), explique assez bien l'aspect de la figure. De même pour SO<sub>4</sub>, dont le niveau de concentration élevé dans le rainout a vraisemblablement pour origine un "bruit de fond" de pollution diffuse et les sources naturelles de soufre (zones côtières, océans et secondairement activité volcanique (BONSANG, 1982)), le "washout" provenant alors de sources plus proches (régions industrialisées de Fos/mer, peut-être d'Alès, tout proche, mais peut-être aussi étangs et marécages côtiers du Languedoc). Ces explications paraissent peut-être un peu abusives, puisqu'elles ne reposent pas sur une analyse statistique rigoureuse. Elles trouveront cependant leur confirmation dans la suite de ce chapitre.

#### b) A l'échelle annuelle

Si l'on reporte les flux annuels d'éléments (voir calcul plus loin) en fonction de la lame d'eau incidente annuelle, on constate deux types de comportement (figure 15 et LELONG et al, 1988):

- une tendance à l'augmentation des apports quand la lame d'eau augmente (càd. concentration constante), signe d'une source non limitée. C'est le cas pour le Ca, S, Na, Cl.

- une tendance à une constance des apports quand la lame d'eau augmente (càd. dilution), signe d'une source limitée: cela semble être le cas de Si, K, Mg, N

Toutefois, la dispersion est assez importante, malgré le fait que les deux variables représentées sont liées (les apports sont le produit de la lame d'eau annuelle par la moyenne pondérée des concentrations). Il n'est pas sûr qu'une étude détaillée de la fréquence des différents types de temps puisse expliquer de façon satisfaisante cette variabilité comme nous avons pu le penser au démarrage de cette étude. En effet, la complexité des phénomènes en jeu et la multiplicité des origines possibles pour la majorité des éléments laissent à penser que seuls des épisodes très particuliers, voire caricaturaux comme le cas des pluies rouges par exemple, permettent la liaison entre une trajectoire de masse d'air et des concentrations, comme cela a pu être réalisé ailleurs (v. BESSE-MOULIN, 1987).

La conséquence pratique de cela est que même après 7 années de suivi exhaustif, et malgré la large gamme de

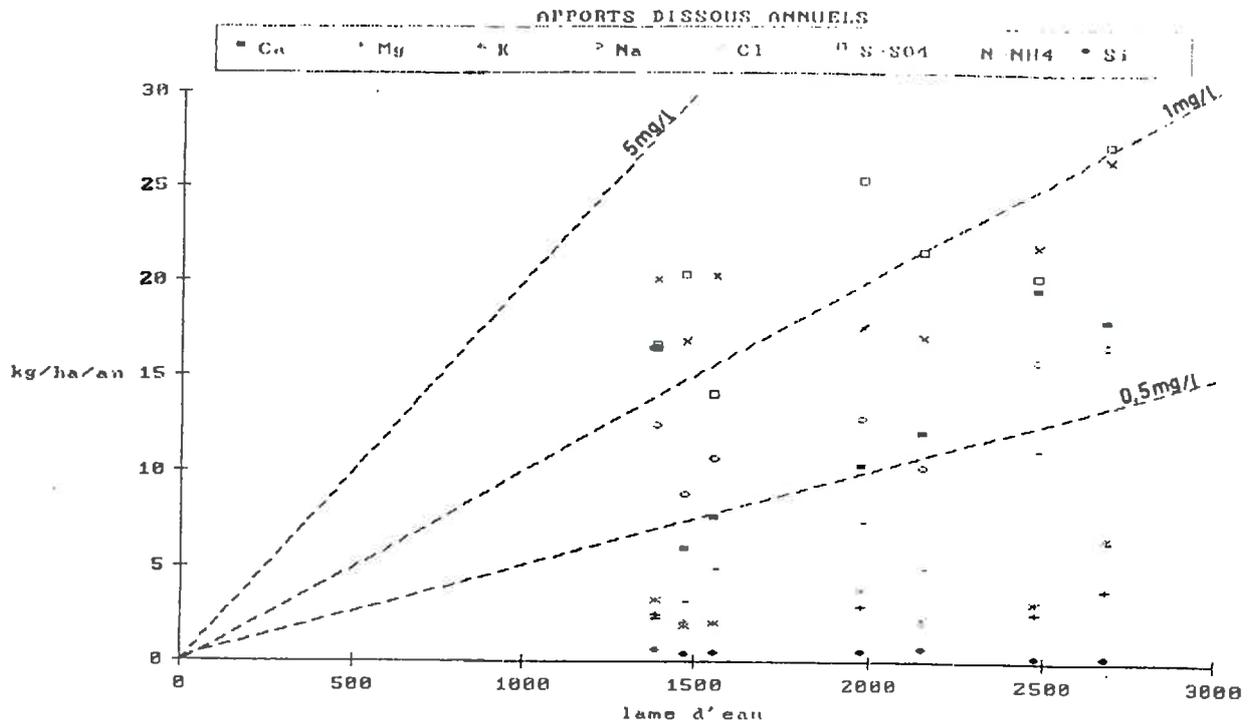


Figure 15: Apports annuels en fonction de la lame d'eau incidente

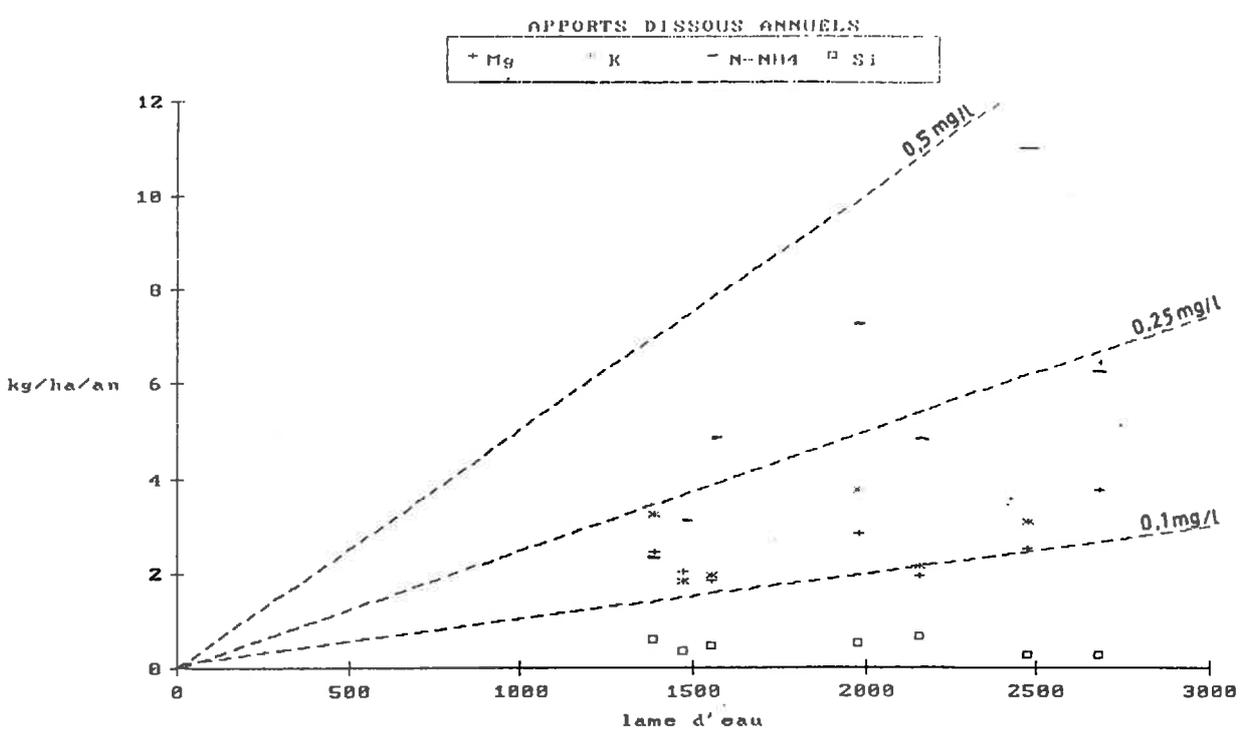


Figure 15bis: Apports annuels en fonction de la lame d'eau incidente  
éléments en faible concentration dans la pluie.

pluviosités et de niveaux d'apports mesurés, ces apports ne peuvent pas être modélisés de façon fiable grâce aux paramètres hydrologiques, et que l'analyse exhaustive des pluies est encore nécessaire.

### II.2.1.2.3 Relations entre éléments

#### a) Généralités

L'étude des relations entre éléments a été réalisée au moyen de divers outils statistiques: matrice de corrélation, régressions simples et multiples (pas à pas ou en maximisant  $r^2$ ), analyses en composantes principales. La première idée qui se dégage de l'ensemble de ces approches est que la population étudiée est mal structurée, que les liaisons entre éléments sont plutôt lâches, que les individus ne forment pas de groupes bien nets.

On retrouve toutefois dans la matrice des corrélations (Tab. n° 12) les associations classiques en fonction de l'origine des éléments (CRYER, 1976, RODA, 1983, WEDRAOGO-DUMAZET, 1983, CHERET, 1987, AVILA, 1987, PROBST et DAMBRINE, 1988):

- Les éléments d'origine marine : Na, Cl, Mg
- Les éléments d'origine continentale: Ca, K, Mg, Si, (NH<sub>4</sub>),  
liés à l'alcalinité
- Les éléments d'origine anthropique (*pro parte*): SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>,  
NO<sub>3</sub>, H<sup>+</sup>

L'ACP à 6 variables (annexe 6) confirme ce classement dans la mesure où, après un premier axe exprimant la charge globale, on trouve un axe opposant les variables "marines" (Na, Cl) et les variables "continentales" (Ca, K) et un troisième axe exprimant la charge en sulfates.

L'ACP à 9 variables est un peu moins nette (Figure 16 et annexe 6) mais l'axe 2 peut être assimilé à un axe de pollution, regroupant les variables acido-basiques (H<sup>+</sup>, S, N), l'axe 3 discriminant les origines marines et continentales. Par contre, ces ACP sont moins parlantes quand on se place dans l'espace des individus, car ils ne s'organisent pas en groupes homogènes et faciles à identifier. Ce sont en général des échantillons isolés qui se détachent d'un ensemble peu structuré.

Il semble donc que les diverses influences auxquelles est soumise la région ne soient guère séparables et se relaient bien souvent au cours d'un même épisode.

#### b) La composante marine des pluies

En se basant sur les rapports ioniques dans l'eau de mer et dans l'eau de pluie, par rapport aux deux ions dominants Na et Cl, on peut donner une approximation de la part des sels marins dans l'eau de pluie, issus d'un aérosol marin de pétillage (LOYE-PILLOT et al, 1986, RODA, 1983, KEENES et al, 1986 in CHERET, 1987) (Tab. n° 11).

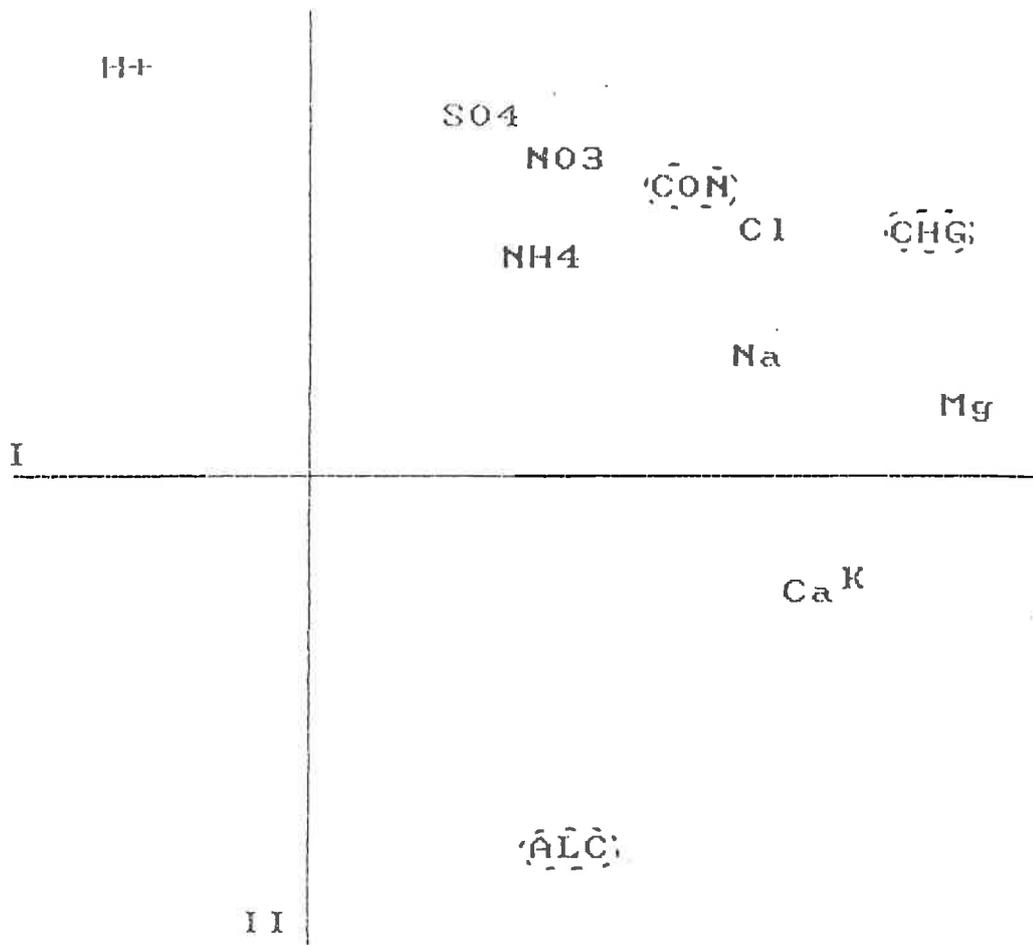


Figure 16:

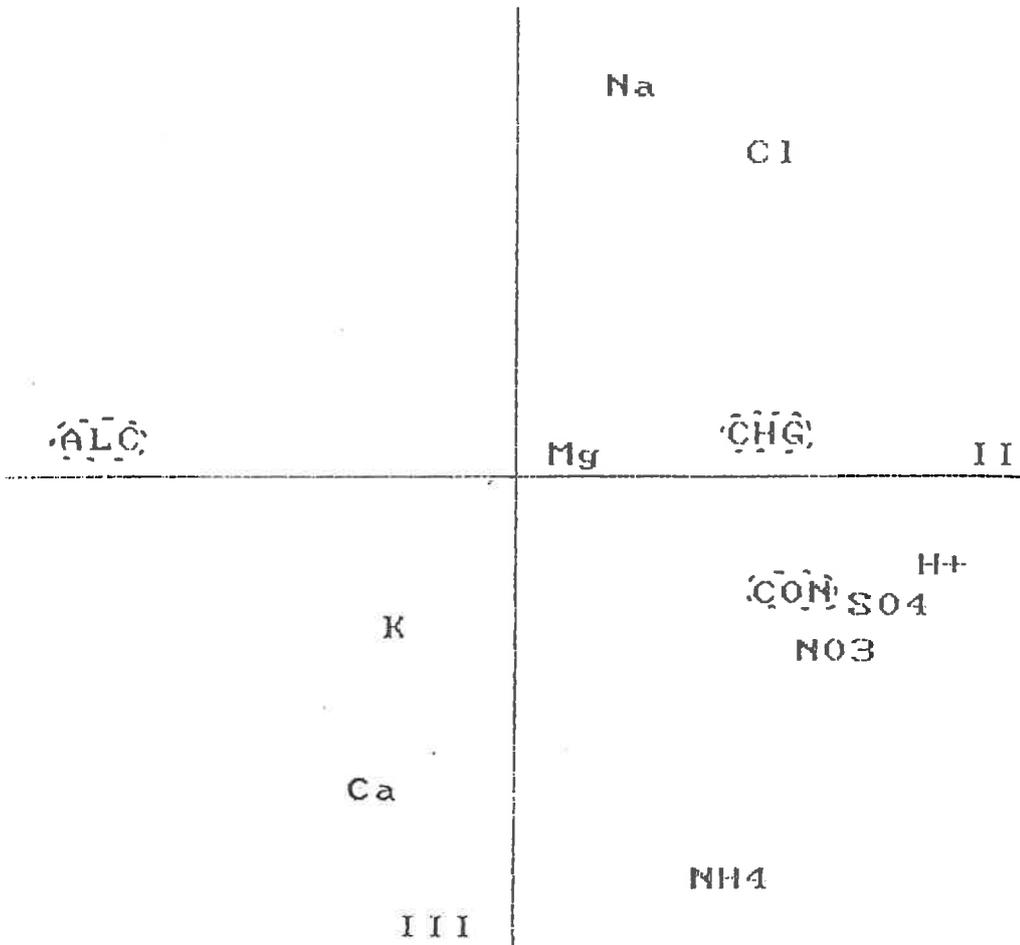
ACP pluies (9 var.+3 varsup, 46 pts)

ALC:alcalinité

CON:conductivité

CHG:charge totale

(variables supplémentaires)



|      | H+  | Alc.        | Ca          | Mg         | K          | Na         | Cl         | SO4        | NO3        | NH4        | SI         | CHG        |
|------|-----|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Pmm  | .02 | -.07        | -.13        | -.11       | -.17       | 0          | -.05       | -.12       | -.06       | -.18       | -.14       | -.08       |
| H+   | 119 | 121         | 179         | 180        | 175        | 177        | 172        | 169        | 77         | 152        | 169        | 61         |
|      |     | <u>-.72</u> | <u>-.22</u> | -.05       | -.15       | -.09       | .02        | .21        | <u>.41</u> | <u>.24</u> | -.20       | .15        |
|      |     | 119         | 114         | 114        | 111        | 113        | 108        | 106        | 69         | 94         | 105        | 53         |
| Alc. |     |             | <u>.39</u>  | .25        | .34        | .26        | .07        | -.10       | -.19       | 0          | .28        | .01        |
|      |     |             | 116         | 116        | 113        | 115        | 110        | 108        | 71         | 96         | 107        | 55         |
| Ca   |     |             |             | <u>.64</u> | <u>.42</u> | .04        | .17        | .12        | .23        | <u>.24</u> | <u>.38</u> | <u>.40</u> |
|      |     |             |             | 179        | 175        | 177        | 169        | 168        | 74         | 147        | 163        | 61         |
| Mg   |     |             |             |            | <u>.46</u> | <u>.38</u> | <u>.54</u> | .10        | .25        | <u>.27</u> | <u>.32</u> | <u>.70</u> |
|      |     |             |             |            | 175        | 177        | 170        | 168        | 74         | 148        | 164        | 61         |
| K    |     |             |             |            |            | <u>.24</u> | <u>.21</u> | 0          | .1         | .15        | <u>.20</u> | <u>.36</u> |
|      |     |             |             |            |            | 174        | 165        | 167        | 72         | 144        | 159        | 61         |
| Na   |     |             |             |            |            |            | <u>.75</u> | .04        | .08        | .06        | -.16       | <u>.74</u> |
|      |     |             |             |            |            |            | 168        | 167        | 73         | 145        | 161        | 61         |
| Cl   |     |             |             |            |            |            |            | 167        | 73         | 145        | 161        | 61         |
|      |     |             |             |            |            |            |            | <u>.27</u> | .24        | <u>.29</u> | .02        | <u>.76</u> |
| SO4  |     |             |             |            |            |            |            | 159        | 70         | 144        | 163        | 61         |
|      |     |             |             |            |            |            |            |            | <u>.66</u> | <u>.34</u> | .07        | <u>.64</u> |
| NO3  |     |             |             |            |            |            |            |            | 68         | 140        | 156        | 61         |
|      |     |             |             |            |            |            |            |            |            | <u>.51</u> | -.09       | <u>.59</u> |
| NH4  |     |             |             |            |            |            |            |            |            | 73         | 69         | 61         |
|      |     |             |             |            |            |            |            |            |            |            | .11        | <u>.45</u> |
| SI   |     |             |             |            |            |            |            |            |            |            | 145        | 61         |
|      |     |             |             |            |            |            |            |            |            |            |            | .12        |
| CHG  |     |             |             |            |            |            |            |            |            |            |            | 56         |

Tab. n°12: matrice des corrélations (Coef. de Pearson)  
Eaux de pluie (83-88)

Les coef. soulignés sont significatifs à  $\alpha=0.01$   
Les chiffres inférieurs indiquent le nombre de couples

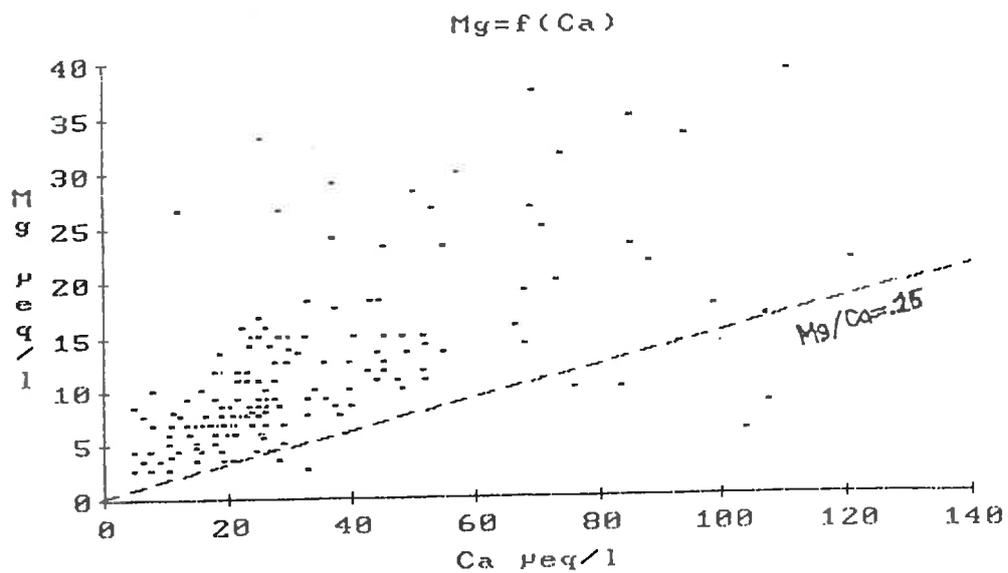


Figure 17a: Relation Mg-Ca dans les eaux de pluie

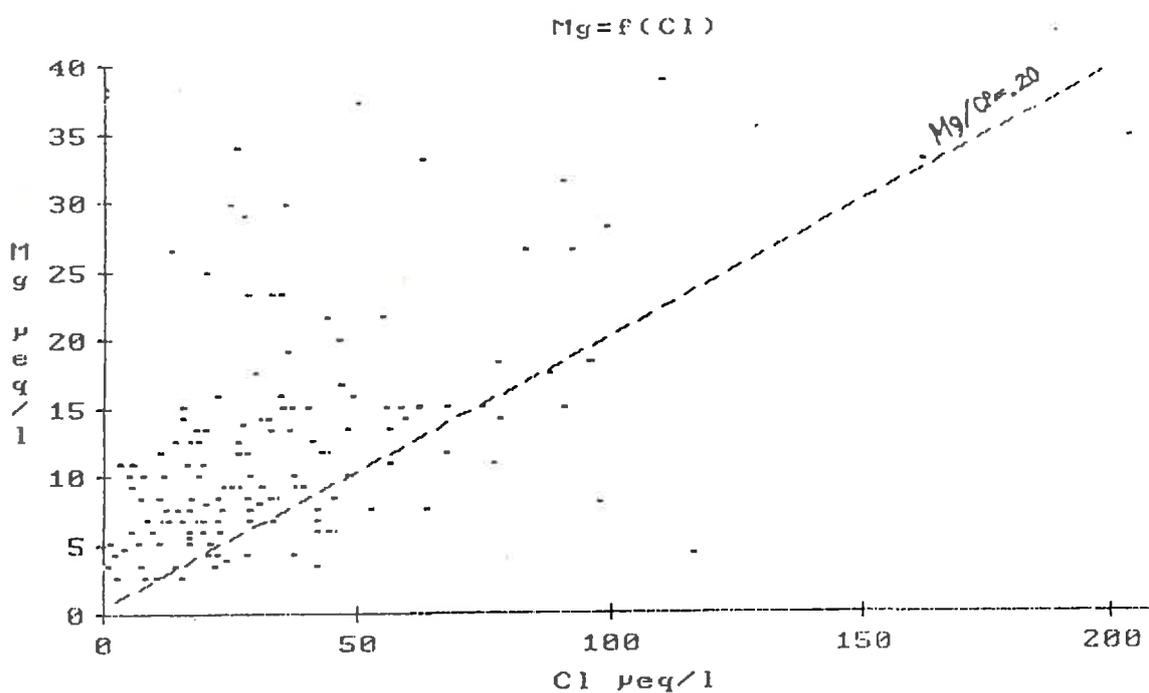


Figure 17b: Relation Mg-Cl dans les eaux de pluie

On obtient des pourcentages plutôt élevés par rapports aux valeurs que l'on peut déduire de la littérature (v. Tab. n°14 ), la contribution des sels marins représentant globalement environ 30% de la charge totale. Cette forte influence maritime est la conjugaison d'une distance à la mer assez réduite (80km) et de la fréquence des vents de secteurs Sud, souvent violents et liés aux précipitations (v. DIDON, 1985).

Dans le cas du Magnésium, bon exemple d'une origine naturelle mixte, continentale et marine, on peut affiner un peu les choses en examinant les nuages de points  $Mg=f(Ca)$  et  $Mg=f(Cl)$  (AVILA, 1987) (figure 17):

-Mg est bien corrélé avec chacun des deux ions, alors qu'il sont pauvrement corrélés entre eux.

-Le nuage  $Mg=f(Cl)$  est majoritairement au dessus de la droite d'équation  $Mg/Cl=0.2$  (proportion dans l'eau de mer), confirmant des apports autres que marins, mais avec une vingtaine de points au dessous de cette droite: s'il n'est pas impossible que certains correspondent à une contamination lors des manipulations de l'échantillon, risque toujours possible avec le chlore, il faut néanmoins remarquer que la plupart de ces points correspondent aussi à des eaux acides et/ou riches en sulfates ou en azote, éléments avec lesquels le chlore est d'ailleurs un peu corrélé. On peut donc déceler là la présence de chlore d'origine anthropique, due aux émissions industrielles de HCl.

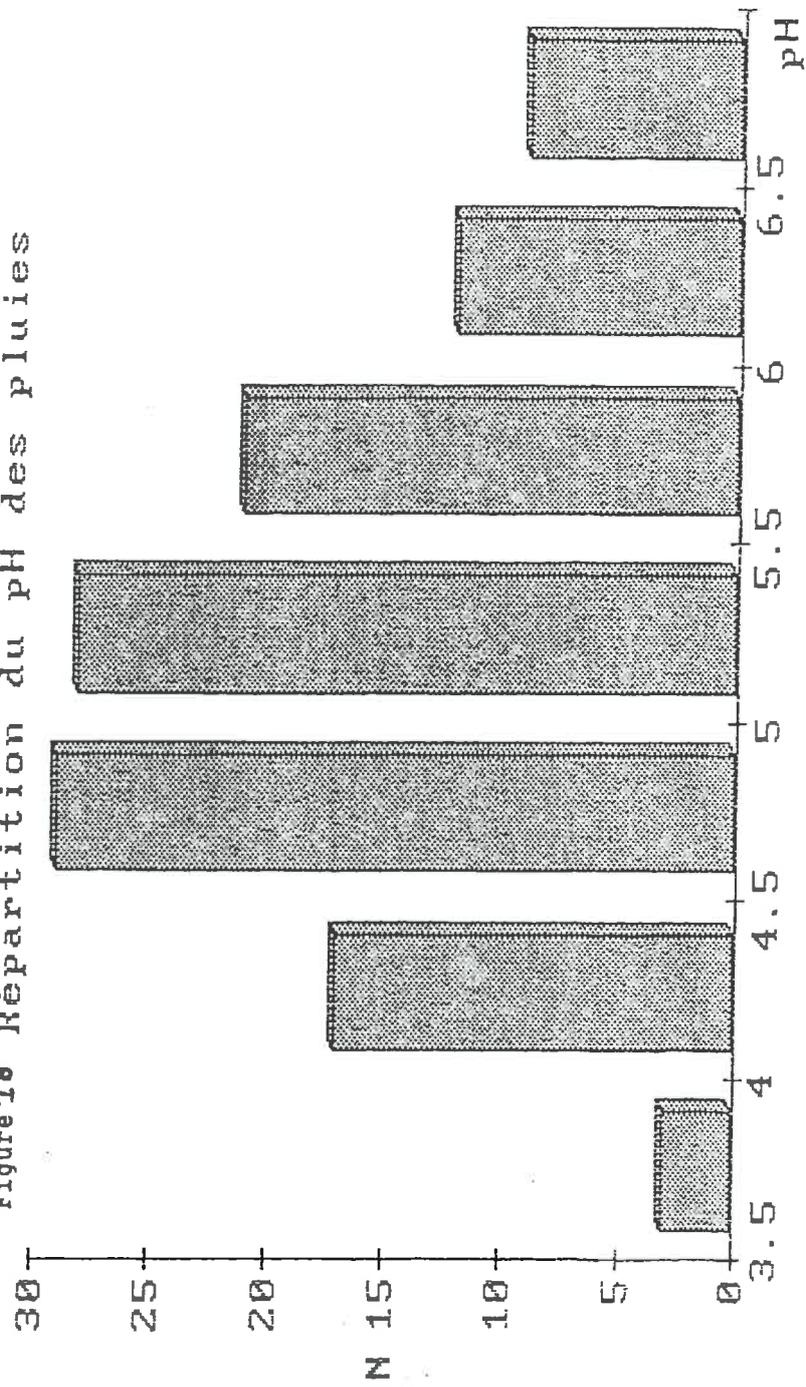
-le nuage  $Mg=f(Ca)$  présente une enveloppe inférieure assimilable à une droite d'équation  $Mg/Ca=0.15$ , si l'on exclut une demi douzaine de points marqués par un fort excès de Ca (peut être sous l'influence des poussières sahariennes (AVILA 87)). Toutefois, le peu de netteté de cette enveloppe évoque des sources continentales multiples, dont la moins "magnésienne" présenterait un rapport  $Mg/Ca$  de 0.15.

### c) L'acidité de la pluie et les apports anthropiques

Avec un pH moyen de 4.87 et environ 50% des mesures inférieures à pH 5 (Figure n°18), les pluies du Mont-Lozère sont plus environ 5 fois plus acides qu'en l'absence de tout autre acide que le CO<sub>2</sub> atmosphérique (pH 5.59 à 0°C, BOURRIE, 1976). Mais l'alcalinité (mesurée sur une chronique plus courte) n'est que légèrement négative (-2µeq/l), par conséquent l'acidité apportée reste très modérée. Les apports sahariens déjà mentionnés provoquent une nette augmentation du pH (LOYE-PILOT, 1986, AVILA, 1987), et l'on a pu mesurer une dizaine d'épisodes à pH supérieur à 6.5. A l'opposé, les épisodes à pH inférieur à 4 sont rares. Dans un cas comme dans l'autre, les averses en cause sont peu importantes, et ces pH extrêmes sont donc l'expression d'un "washout" particulier.

La concentration en H<sup>+</sup>, (estimée par 10<sup>-pH</sup>) est corrélée positivement avec NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>, et négativement avec Ca,

Figure 10 Répartition du pH des pluies



mais ces corrélations sont faibles. La régression multiple avec SO4 et NO3 comme variables explicatives donne :

$$H^+ = 0.5NO_3 + 0.25SO_4 - 10.6 \quad (n=70 \quad r^2=.40)$$

Pour chacun de ces deux anions, la régression linéaire multiple pas à pas produit les résultats suivants:

$$SO_4 = 0.60NH_4 + 0.44H + 48.9 \quad (n=83 \quad r^2=.21)$$

$$NO_3 = 0.60NH_4 + 0.20H + 6.8 \quad (n=70 \quad r^2=.52)$$

Malgré la médiocrité de ces relations et la redondance introduite par les corrélations entre les termes explicatifs, on peut donner une grossière estimation des espèces chimiques associées à ces trois ions:

SO4 : 10 à 20% sous forme  $2NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$   
5 à 10% sous forme  $2H^+$ ,  $SO_4^{2-}$   
75% indéterminés

NO3 : 45 à 55% sous forme  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$   
15 à 25% sous forme  $H^+$ ,  $NO_3^-$   
30% indéterminés

H : 35 à 45% sous forme  $2H^+$ ,  $SO_4^{2-}$   
30 à 40% sous forme  $H^+$ ,  $NO_3^-$   
20 à 30% indéterminés ( $HCl$ ,  $HCO_3$ , ...)

#### II.2.1.2.4. Comparaison avec les pluies sans poussières

Le type de préleveur utilisé, quoique rudimentaire (fermeture après la pluie non automatique), a donné toute satisfaction et a permis d'échantillonner la quasi totalité des épisodes pluvieux depuis février 87, en parallèle avec les entonnoirs ouverts en permanence. Les résultats obtenus (Tab. n°13) montrent des différences très faibles en moyenne et statistiquement non significatives par rapport aux collecteurs ouverts en permanence. En examinant séparément le demi cycle 86-87 et le cycle 87-88, il apparaît toutefois quelques faits intéressants:

- le cycle 86-87, plus sec, a apporté plus de poussières que le cycle 87-88. On peut penser que la plus grande fréquence des pluies favorise le "washout" aux dépens de la sédimentation (voir chap. suivant).
- Les éléments les plus fréquents dans les poussières seraient, dans l'absolu,  $SO_4$ , Na, Cl, mais, en valeur relative, les apports de Mg, K, Si et Ca ne seraient pas négligeables durant le premier cycle. Ils sont par contre à peu près nuls en 87-88.

Nous reviendront plus loin sur ces résultats, assez cohérents avec l'étude des apports sous couvert.

Il convient toutefois de souligner les limites de cette approche:

- On n'a guère d'idées sur le pouvoir de captation des poussières des entonnoirs, sûrement très infé-

|   | H+           | Alc.            | Ca           | Mg            | K          | Na           | Cl             | SO4            | NO3            | NH4            | Si           |
|---|--------------|-----------------|--------------|---------------|------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Moyenne 86-88<br>(ecart-type)<br>µeq/l                  | 19<br>(19,7) | -13,2<br>(29,6) | 30<br>(21,2) | 10,5<br>(7,4) | 4,1<br>(8) | 22,5<br>(34) | 25,2<br>(28,9) | 58,2<br>(26,3) | 22,4<br>(13,9) | 18,5<br>(18,2) | 0,2<br>(0,5) |
| Apports nets<br>g/ha/jour:<br>du 15/02/87 au<br>30/6/87 | -            | -               | 4,5          | 2             | 4,1        | 43           | 24,1           | 22,1           | -3             | 3,8            | 1,2          |
| du 1/07/87 au<br>30/6/88                                | -            | -               | 0            | 0             | 0          | 5,3          | 4,4            | 9,8            | 1,1            | -2,3           | 0,2          |

Tableau 13:collecteur de pluie à ouverture:moyennes pondérées sur la période de collecte et moyennes journalières et moyennes journalières des apports nets ('bulk précipitations'-'wet-only precipitations')

| Auteur               | Localisation       | Ans | Période | P(mm) | pH pluie | Ca   | Mg  | K   | Na   | Cl   | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 |
|----------------------|--------------------|-----|---------|-------|----------|------|-----|-----|------|------|-------|-------|-------|
| Avilà(87)            | Montseny(Esp.)     | 2   | 83-85   | 963   | 4,75     | 11,8 | 1,3 | 1,2 | 5,1  | 9,6  | 8,5   | 2,5   | 3,2   |
| Anderson-Calles et A | Velen(Suède)       | 5   | 68-74   | -     | -        | 5,4  | 1,2 | 1,6 | 3,7  | 5,4  | 10    | 2,9   | 3     |
| Baker et al.(87)     | Gippsland(Austr.)  | 1   | 77-78   | 980   | 6        | 14,4 | 7,9 | 4   | 22,2 | -    | -     | 11,3  | 7,6   |
| Cryer(76)            | Maesnant(G.B)      | 1   | 72-73   | 1642  | 4,82     | 25,1 | 4,4 | 1,6 | 27,2 | 45,8 | -     | -     | -     |
| Feller / Kimmins(79) | Haney(B.C,Can)     | 1   | 72-73   | 2400  | 4,5      | 3,6  | 0,9 | 0,9 | 4,3  | 10,4 | 6,4   | 3,7   | -     |
| Ivens et al.(88)     | Gelderse V.(NL)    | 1   | 85-86   | -     | 4,4      | 6,8  | 1,1 | 2,9 | 6,8  | 22,6 | 12,1  | 14,2  | 5,2   |
| Galloway et Al(87)   | Kaiyang(chine)     | 1   | 84      | 1261  | 4,76     | 18,6 | -   | -   | -    | -    | 29,6  | 2,7   | 9,5   |
| Likens et al.(77)    | Hubbard Brook(USA) | 11  | 63-74   | 1320  | 4,14     | 2,2  | 0,6 | 0,9 | 1,6  | 6,2  | 12,7  | 4,4   | 2,3   |
| Paces(85)            | B.v. rural(Tch.)   | 7   | 76-83   | 736   | 4,27     | 3,2  | 0,4 | 0,5 | 0,7  | 2,2  | 12    | 4     | 5,3   |
| id.                  | B.v. indust.       | 5   | 78-83   | 812   | 4,19     | 7,4  | 1,1 | 1,7 | 2,2  | 25,1 | 19,6  | 5,5   | 7,5   |
| Swank/Douglas(77)    | Coweeta(USA)       | 4   | 72-76   | 2230  | 4,43     | 4,6  | 1   | 2,1 | 4,4  | 7,1  | 11,8  | 3,2   | 2,2   |
| Matzner et al.(82)   | Solling(RFA)       | 11  | 69-79   | 948   | 4,07     | 10,5 | 1,9 | 3,6 | 7,9  | 17,1 | 23,7  | 8     | -     |
| Miller et al.(87)    | Fetteresso(G.B)    | 5   | 73-77   | 879   | 4,14     | 7,2  | 4,3 | 2,1 | 36,9 | 51,8 | 23,8  | 4,1   | 2,2   |
| Probat et al.(89)    | Aubure(Voages,F.)  | 2   | 86-88   | 1530  | 4,46     | 3,6  | 0,7 | 1,6 | 3,2  | 6    | 9,6   | 4,9   | 3,8   |
| Cette étude          | Mont-Lozère (F.)   | 7   | 81-88   | 1957  | 4,87     | 12,8 | 2,4 | 3,2 | 12,4 | 20,4 | 20,6  | 5,7   | 5,6   |

Tableau 14:Apports en solution par voie atmosphérique (bulk précipitations) Comparaison des flux mesurés sur le Mont-Lozère avec quelques valeurs de la littérature.Valeurs en Kg/ha/an

rieur à celui d'une surface naturelle.

-Une grande partie des différences entre les deux types d'eaux se joue vraisemblablement dans les premières gouttes de pluies, avant l'ouverture du préleveur. En pratique, étant donnée la conception du préleveur, cette ouverture a lieu après 1 à 2mm de pluie, et il n'est pas possible de descendre en dessous de cette valeur sous peine d'ouvertures intempestives trop fréquentes.

-Seule une longue série de prélèvements ou la multiplication des collecteurs permettraient de s'affranchir du problème de la microvariabilité spatiale des pluies, qui peut provoquer des différences notables entre deux collecteurs identiques situés à quelques décimètres l'un de l'autre.

En conclusion sur ce point, il semble que les apports sous formes de particules susceptibles de sédimenter sont peu importants en année normale, sans doute en liaison avec un contexte régional peu générateur de poussières (massifs cristallins couverts de végétation). Toutefois, en année sèche et lorsque les arrivées de poussières sahariennes sont fréquentes, cette forme de dépôts peut devenir non négligeable.

### II.2.1.3. Les flux hydrochimiques hors couvert

#### II.2.1.3.1. Méthode de calcul et erreurs

En croisant les données de pluviométrie et les données chimiques, on calcule les apports au sol selon la formule:

$$P_{h.c.} = H.C_{p.} + \sum(h.e.c.) + C_{p.}.\sum h_n$$

avec:  $P_{h.c.}$  = Apports hors couverts

H = hauteur de pluie sur la période

$C_{p.}$  = concentration moyenne pondérée

he = hauteur de l'épisode de pluie échantillonnée

ce = concentration " " "

hne = hauteur de l'épisode non échantillonné

La seconde expression explicite la manière dont le programme utilisé gère les manques d'information. Les calculs sont effectués au pas de temps journalier, les résultats stockés et édités au pas de temps décadaire, mensuel et annuel (v. annexe).

DUPRAZ (1984) a calculé l'erreur entachant ce résultat au pas de temps annuel, en fonction de l'erreur sur la lame d'eau et de l'erreur sur les concentrations, et en supposant les variables indépendantes, ce qui, dans une certaine mesure, a été confirmé a posteriori par notre étude (v. 2.1.2.2.). Le tableau n°15 résume ces résultats. Bien que les calculs n'aient pas été effectués, il faut souligner que l'erreur augmente quand le pas de temps diminue, en raison de la composition des erreurs, d'autant plus que les épisodes sont mal distribués spatialement (cas des

orages d'été par exemple).

|                           | Ca  | Mg  | K   | Na  | Cl  | SO4 | NO3 | NH4 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| dc/c                      | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| erreur sur les apports(%) | 10  | 10  | 10  | 10  | 20  | 15  | 20  | 20  |

Tableau 15: Erreur sur les apports par la pluie (d'après DUPRAZ, 1984).

#### II.2.1.3.2. résultats

Les résultats à l'échelle mensuelle et par bassin seront largement commentés et illustrés par la suite, mais on peut d'ores et déjà comparer les résultats moyens sur l'ensemble de la période avec quelques données recueillies dans la littérature (Tab.n°14).

On constate que nos résultats se situent à un niveau élevé, combinant une lame d'eau précipitée très forte avec des pluies relativement concentrées. Cela est vrai pour tous les éléments, mais plus particulièrement pour les cations et le chlore, les apports de soufre et d'azote pouvant être plus élevés dans les sites pollués. Nous verrons plus loin comment cette hiérarchie peut être modifiée par la prise en compte des dépôts occultes, tels qu'on peut les estimer par l'étude des pluviollessivats.

## 2.2.LES APPORTS SOUS COUVERT

### 2.2.1. Données disponibles

Nous n'avons pas repris les séries de résultats de DUMAZET (1983), sinon à titre de comparaison, en raison de l'absence de continuité avec nos propres séries. Pour celles-ci, débutées le 1/7/86 pour trois d'entre elles (Sapine basse et haute, Latte) et le 1/7/87 pour la dernière (Urfruits), on dispose d'analyses de la quasi totalité des épisodes pluvieux, prélevés de façon synchrone autant que faire se pouvait, et pour les paramètres suivants: Ca, Mg, K, Na, Cl, S, NH<sub>4</sub>, Si, pH, alcalinité, plus NO<sub>3</sub> depuis le 1/7/87.

Un collecteur à ouverture automatique, du même type que celui utilisé pour les pluies, a été installé à la station des Urfruits durant l'été 87. Le peu de différence constaté avec les autres collecteurs, et l'impossibilité de multiplier ce dispositif nous a conduit à l'abandonner assez vite.

### 2.2.2 Généralités

Dans le souci d'alléger le propos, nous n'exposerons pas le détail de l'étude de la chimie des eaux de pluviollessivats, conduite dans le même esprit que pour les eaux de pluie. En effet, la moindre durée du suivi et la maîtrise imparfaite de la variabilité spatiale diminue la pertinence d'une exploitation trop poussée des résultats d'analyses. Nous nous contenterons donc ici de résumer les faits les plus saillants en liaison avec le problème de l'estimation des dépôts occultes.

Les pluviollessivats sont en moyenne plus concentrés que les eaux de pluies, l'augmentation de charge allant de 150% pour les feuillus à presque 300% pour la Latte (Fig. n°19 et Tableau n°16). Les variabilités spatiale et surtout temporelle sont très fortes. Les proportions entre cations subissent les mêmes modifications dans les quatre stations, à savoir une diminution de l'importance de NH<sub>4</sub> et de H au profit surtout de K, qui devient le cation le plus abondant après Ca et Na. Pour les anions, la station des Urfruits se démarque des trois autres, car on y constate une diminution relative de SO<sub>4</sub> en faveur de NO<sub>3</sub> essentiellement, alors que c'est l'inverse qui se produit dans les trois autres cas.

La différence essentielle entre les stations sous hêtres et sous épicéas est que les premières montrent un pH supérieur à celui de la pluie et une alcalinité qui tend à devenir positive alors que dans les secondes l'alcalinité est franchement négative, et le pH égal ou inférieur à celui des précipitations.

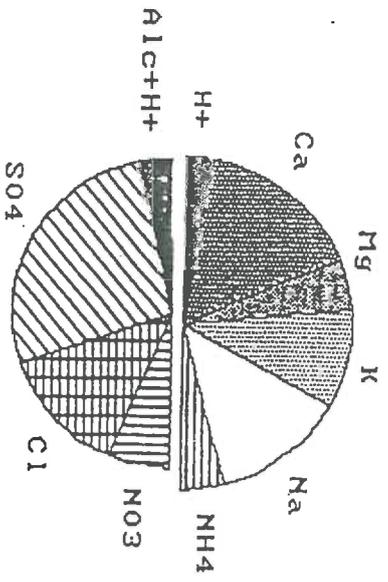
Enfin on note l'apparition de la Silice, quasi absente des pluies, dont l'origine peut être en partie biologique, en partie due à la solubilisation de poussières déposées sur les arbres. Un doute plane néanmoins sur les teneurs mesurées, la méthode colorimétrique utilisée étant peut-être

| Station                  | H+            | Alc.       | Ca            | Mg            | K                | Na               | Cl               | SO4           | NO3              | NH4              | Si              |
|--------------------------|---------------|------------|---------------|---------------|------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | moy.          | 1,5        | 56            | 17,9          | 35               | 45,6             | 44,1             | 90,5          | 2,4              | 15               | 4,8             |
|                          | $\sigma$      | 35,7       | 52,8          | 14,4          | 41,6             | 40,3             | 37,4             | 55,5          | 13,2             | 15,5             | 10,4            |
|                          | sym.          | 1,74       | 1,62          | 1,51          | 0,91             | 1,27             | 1,06             | 0,81          | 0,84             | 1,85             | 1,51            |
|                          | apl.<br>dist. | 2,88<br>-  | 2,76<br>log.N | 2,92<br>log.N | -0,3<br>-        | 1,14<br>log.N    | 1,01<br>log.N    | -0,57<br>-    | 0,82<br>-        | 0,82<br>$\Gamma$ | 3,65<br>-       |
| SAPINE HAUTE<br>(Hêtres) | moy.          | 13,6       | 52,2          | 20            | 35,7             | 54,3             | 52,6             | 106,8         | 9,4              | 6,9              | 8,2             |
|                          | $\sigma$      | 18,7       | 52,2          | 20            | 46               | 38,2             | 44,3             | 70,2          | 11,1             | 12,6             | 15,8            |
|                          | sym.          | 0,36       | 2,87          | 3,27          | 1,3              | 0,93             | 2,04             | 1,7           | 1,51             | 2,68             | 1,95            |
|                          | apl.<br>dist. | -0,3<br>-  | 4,17<br>log.N | 14,9<br>log.N | 1,48<br>log.N    | 0,3<br>log.N     | 6,5<br>log.N     | 3,49<br>log.N | 2,04<br>$\Gamma$ | 2,04<br>$\Gamma$ | 8,1<br>$\Gamma$ |
| URFRUITS<br>(Epiceas)    | moy.          | 17,4       | 64,8          | 25,6          | 43               | 73,4             | 78,1             | 111,1         | 50,1             | 29,1             | 16,2            |
|                          | $\sigma$      | 14,5       | 84,8          | 28,5          | 58,3             | 61,4             | 76,9             | 70,1          | 48               | 23               | 16,5            |
|                          | sym.          | 0,2        | 2,22          | 1,43          | 1,94             | 1,62             | 2,27             | 0,99          | 2,04             | 1,03             | 4,54            |
|                          | apl.<br>dist. | -1,14<br>- | 6,38<br>log.N | 2,37<br>log.N | 4,93<br>log.N    | 4,56<br>log.N    | 7,28<br>log.N    | 0,19<br>log.N | 5,38<br>log.N    | 0,8<br>log.N     | 0,8<br>-        |
| LATTE<br>(Epiceas)       | moy.          | 44,3       | 100,8         | 26,5          | 46,4             | 79,8             | 81,4             | 180           | 13,9             | 7,1              | 9,28            |
|                          | $\sigma$      | 33,7       | 69,8          | 23,2          | 43,9             | 48,7             | 70,5             | 107,7         | 17               | 10,5             | 12,1            |
|                          | sym.          | 0,85       | 1,68          | 1,98          | 2,17             | 1,24             | 1,3              | 3,91          | 2,03             | 1,56             | 0,87            |
|                          | apl.<br>dist. | 0,26<br>-  | 3,79<br>Log.N | 5,45<br>log.N | 7,28<br>$\Gamma$ | 1,94<br>$\Gamma$ | 1,07<br>$\Gamma$ | 20,6<br>log.N | 3,25<br>$\Gamma$ | 2,43<br>-        | 2,43<br>-       |

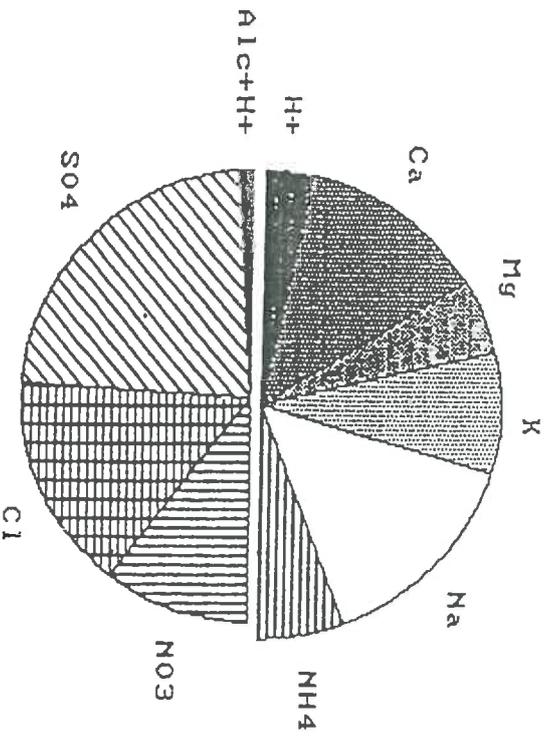
Tableau 16 :Composition chimique des pluviollessivats:description statistique  
des populations étudiées,sur toute la période de collecte.  
Moyennes pondérées par les hauteurs,écart-type,coefficients  
de symétrie et d'aplatissement,lois de distribution.

Figure 19: Composition moyenne des pluviollessivats

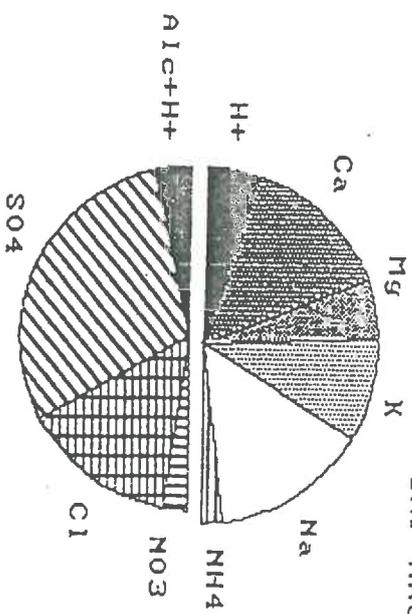
SAP-BAS (349µeq/l)



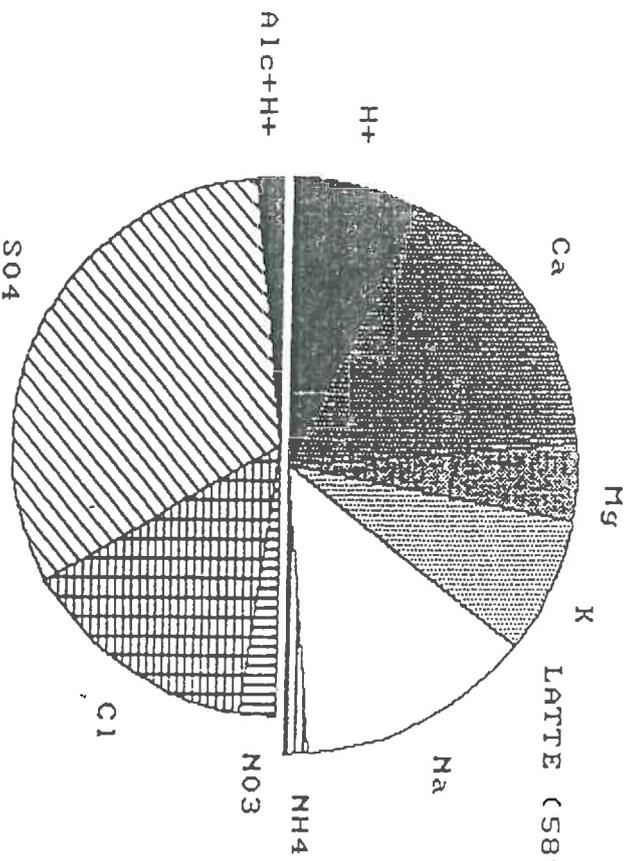
URFRUITS (496.9 µeq/l)



SAP-HAUT (369.7)



LATTE (589.3)



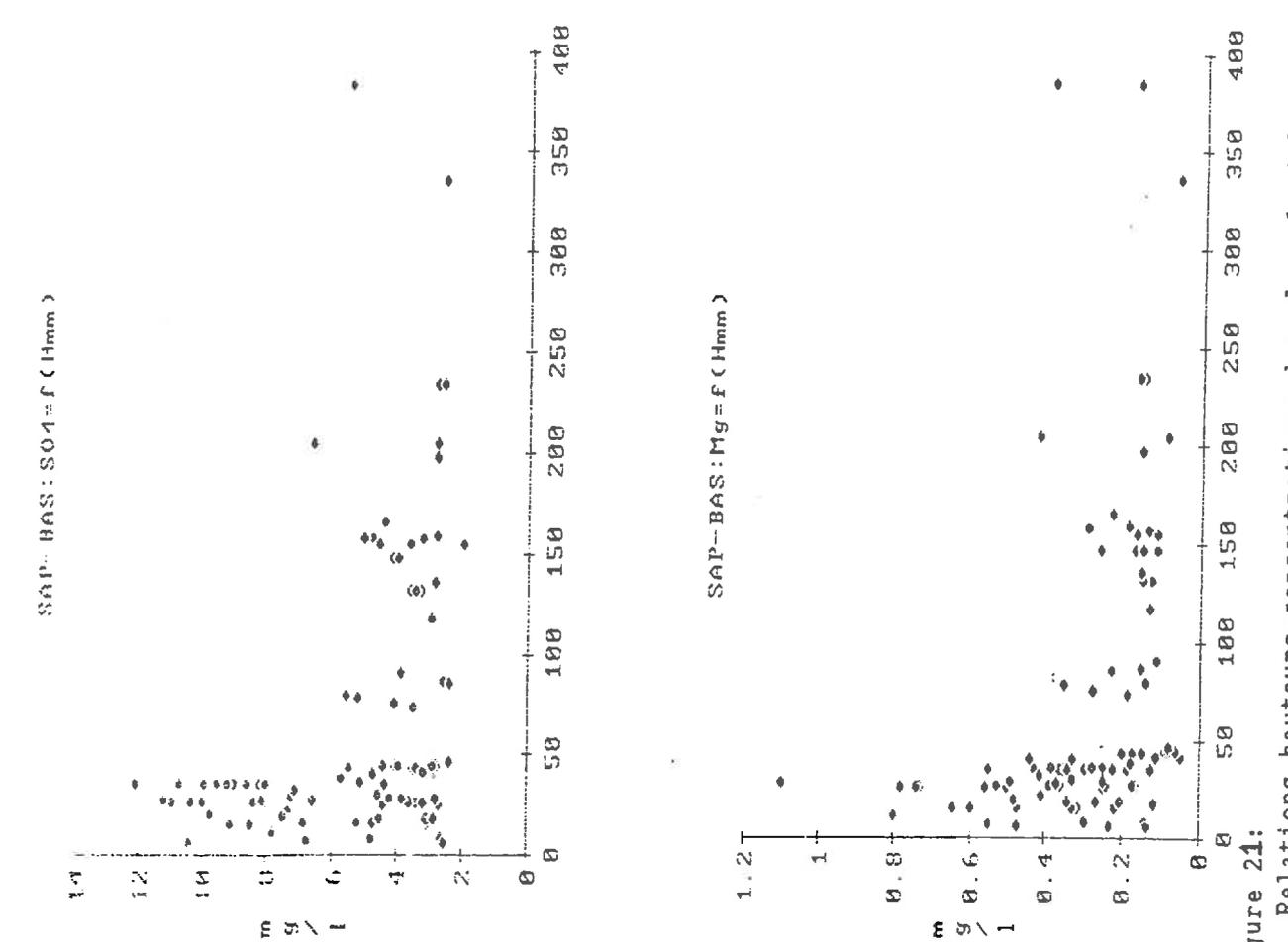


Figure 20 : Exemples de variations des concentrations dans les pluiolessivats au cours du temps (station de Sapine basse)

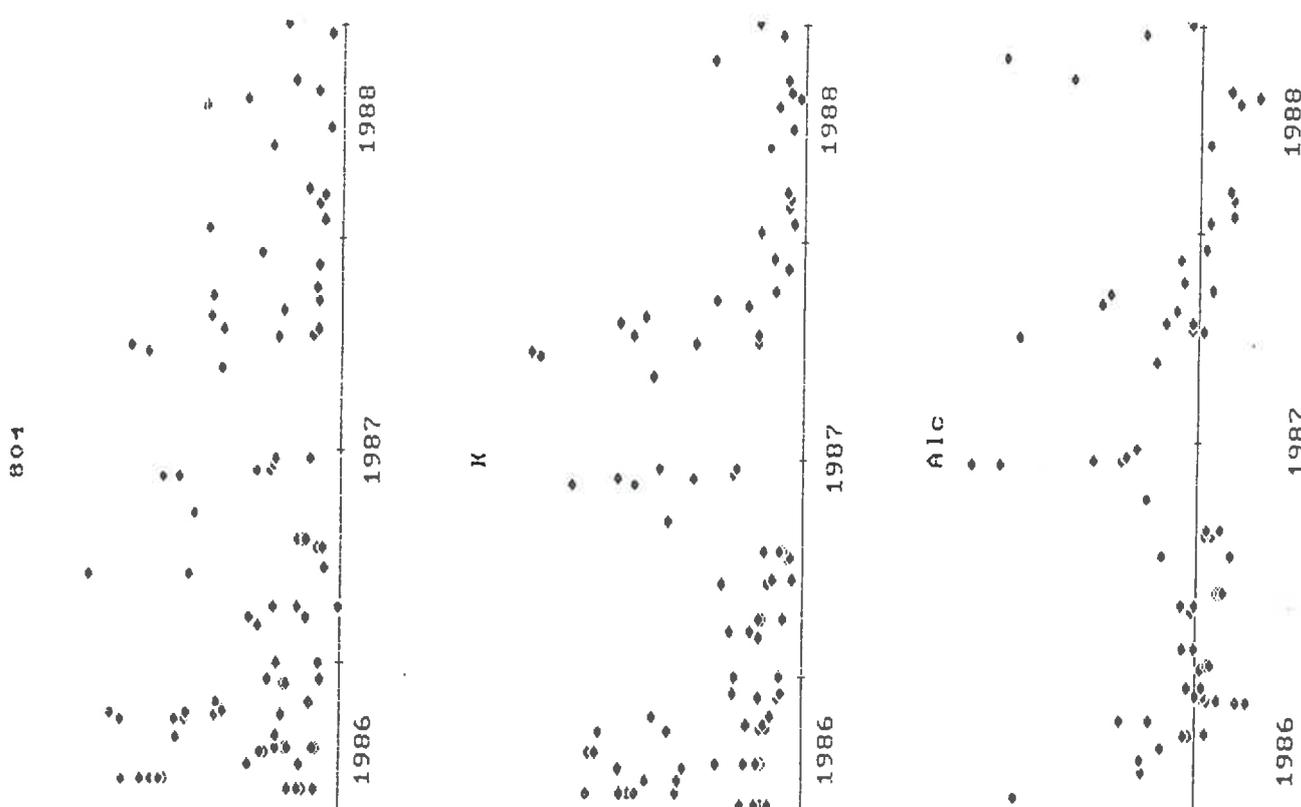


Figure 21: Relations hauteurs-concentrations dans les pluiolessivats Exemples de SO4 et Mg à la Sapine Basse

sujette à des interférences avec la coloration souvent prononcée de ces eaux, surtout en pessière (DIDON-LESCOT, comm. orale).

### 2.2.2.1. Variations temporelles et saisonnières

Deux ans de mesures ne permettent certes pas de déceler des tendances à long terme, mais on peut toutefois remarquer que les concentrations ont tendance à diminuer entre le cycle 86-87 et le cycle 87-88 (Figure n°20 et annexe 8). La comparaison avec les valeurs obtenues par DUMAZET en 82-83 (Tableau 17) montre très peu de différences. Le test utilisé (loi normale) conduit à ne refuser l'égalité des moyennes que à La Latte dans le cas de NO<sub>3</sub>, K et Na (risque 1%), et Ca (risque 5%). Les pluviollessivats de notre série sont plus riches en K, Na et Ca et plus pauvres en NO<sub>3</sub>. Cela pourrait s'expliquer par la dégradation de la santé du peuplement, comme nous le verrons plus bas.

|          | Ca   | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | NH <sub>4</sub> | H    | Alc.  |
|----------|------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-------|
| Hêtres:  |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |      |       |
| moyenne  | 58.2 | 17.4 | 44.6 | 38.2 | 60.1 | 91.4            | 14.5            | 12.6            | 8.8  | 14.4  |
| σ        | 44   | 15   | 28   | 20   | 37   | 43              | 15              | 13              | 11   | 58    |
| test     | -    | -    | -    | -    | -    | -               | -               | -               | -    | -     |
| Epiceas: |      |      |      |      |      |                 |                 |                 |      |       |
| moyenne  | 85.8 | 27.6 | 28.4 | 38.2 | 60.1 | 160             | 21.7            | 22.3            | 44.8 | -21.5 |
| σ        | 59   | 21   | 17   | 20   | 65   | 123             | 10              | 20              | 43   | 82    |
| test     | +    | -    | ++   | ++   | -    | -               | ++              | -               | -    | -     |

Tableau n°17: Concentrations moyennes des pluviollessivats en 82-83 (D'après DUMAZET, 1983) et résultats du test de comparaison avec les moyennes de 86-88:

- : pas de différence significative
- + : différence significative ( $\alpha=0,05$ )
- ++: " hautement significative ( $\alpha=0,01$ )

Les variations saisonnières sont assez peu marquées, sauf pour le potassium dont les concentrations augmentent nettement en période d'activité biologique. Ceci est surtout visible sous feuillus, où les concentrations en Ca et Mg ont aussi tendance à augmenter, tout comme l'alcalinité. (Fig. n°20 et annexe 9).

Ce phénomène est en grande partie le fait de la récréation et du lessivage des tissus végétaux, bien plus importants qu'en période de repos végétatif, ce qui s'ajoute au washout et au "nettoyage" du feuillage pour donner des nuages concentration-hauteur d'eau à l'allure hyperbolique bien plus marquée que dans le cas des pluies (Figure

|      | Alc.             | Ca               | Mg               | K                | Na               | Cl               | S04              | NO3               | NH4               | SI               | CHG              |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| H*   | <u>-55</u><br>67 | <u>-19</u><br>66 | <u>-11</u><br>66 | <u>-29</u><br>66 | <u>-15</u><br>65 | <u>-17</u><br>65 | <u>.03</u><br>64 | <u>.19</u><br>23  | <u>-07</u><br>66  | <u>-36</u><br>58 | <u>.15</u><br>21 |
| Alc. |                  | <u>-44</u><br>72 | <u>-47</u><br>72 | <u>56</u><br>72  | <u>0</u><br>71   | <u>-31</u><br>71 | <u>.31</u><br>70 | <u>-28</u><br>24  | <u>.11</u><br>24  | <u>.69</u><br>64 | <u>.46</u><br>22 |
| Ca   |                  |                  | <u>-90</u><br>96 | <u>10</u><br>96  | <u>-27</u><br>95 | <u>-59</u><br>94 | <u>.71</u><br>94 | <u>-24</u><br>27  | <u>.32</u><br>63  | <u>.36</u><br>67 | <u>.76</u><br>24 |
| Mg   |                  |                  |                  |                  | <u>38</u><br>94  | <u>.72</u><br>94 | <u>.36</u><br>27 | <u>.36</u><br>27  | <u>.29</u><br>93  | <u>.50</u><br>87 | <u>.94</u><br>24 |
| K    |                  |                  |                  |                  | <u>23</u><br>95  | <u>.63</u><br>94 | <u>.66</u><br>94 | <u>-.14</u><br>27 | <u>.03</u><br>93  | <u>.80</u><br>87 | <u>.83</u><br>24 |
| Na   |                  |                  |                  |                  | <u>95</u><br>92  | <u>.62</u><br>92 | <u>.49</u><br>92 | <u>.12</u><br>26  | <u>-.09</u><br>24 | <u>.08</u><br>24 | <u>.80</u><br>24 |
| Cl   |                  |                  |                  |                  | <u>92</u>        | <u>.64</u>       | <u>.54</u>       | <u>.18</u>        | <u>.02</u>        | <u>.51</u>       | <u>.85</u>       |
| S04  |                  |                  |                  |                  | <u>91</u>        | <u>.51</u>       | <u>.51</u>       | <u>.11</u>        | <u>.14</u>        | <u>.52</u>       | <u>.87</u>       |
| NO3  |                  |                  |                  |                  | <u>26</u>        | <u>91</u>        | <u>85</u>        | <u>26</u>         | <u>.31</u>        | <u>.21</u>       | <u>.22</u>       |
| NH4  |                  |                  |                  |                  | <u>25</u>        | <u>25</u>        | <u>24</u>        | <u>26</u>         | <u>.07</u>        | <u>.27</u>       | <u>.07</u>       |
| SI   |                  |                  |                  |                  | <u>86</u>        | <u>.76</u>       | <u>.76</u>       | <u>24</u>         | <u>86</u>         | <u>.76</u>       | <u>.76</u>       |
| CHG  |                  |                  |                  |                  | <u>23</u>        | <u>23</u>        | <u>23</u>        | <u>24</u>         | <u>23</u>         | <u>23</u>        | <u>23</u>        |

Tableau 18

LATTE (Epiceas)

Matrice des corrélations(Coef. de Pearson)

Eaux de PLUVIOLESSIVATS

les coef. soulignés sont significatifs à  $\alpha=0.01$

les chiffres inférieurs indiquent le nombre de couples

SAP-BAS (Hêtres)

|      | Alc.             | Ca               | Mg               | K                | Na                | Cl                | S04              | NO3               | NH4               | SI               | CHG               |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| H*   | <u>-84</u><br>69 | <u>19</u><br>68  | <u>25</u><br>68  | <u>-02</u><br>67 | <u>.05</u><br>68  | <u>.18</u><br>64  | <u>.16</u><br>68 | <u>-.13</u><br>36 | <u>.29</u><br>68  | <u>.12</u><br>63 | <u>.18</u><br>33  |
| Alc. |                  | <u>-05</u><br>74 | <u>-1</u><br>74  | <u>.26</u><br>73 | <u>-.05</u><br>74 | <u>-.05</u><br>70 | <u>0</u><br>74   | <u>.09</u><br>36  | <u>.07</u><br>74  | <u>.13</u><br>69 | <u>-.05</u><br>33 |
| Ca   |                  |                  | <u>-06</u><br>81 | <u>.22</u><br>80 | <u>.18</u><br>81  | <u>.54</u><br>81  | <u>.57</u><br>81 | <u>.21</u><br>34  | <u>.28</u><br>77  | <u>.31</u><br>70 | <u>.79</u><br>33  |
| Mg   |                  |                  |                  |                  | <u>.45</u><br>80  | <u>.67</u><br>80  | <u>.60</u><br>81 | <u>.07</u><br>34  | <u>.08</u><br>77  | <u>.52</u><br>70 | <u>.89</u><br>33  |
| K    |                  |                  |                  |                  | <u>.07</u><br>80  | <u>.50</u><br>80  | <u>.49</u><br>80 | <u>-.31</u><br>34 | <u>.06</u><br>76  | <u>.77</u><br>69 | <u>.55</u><br>33  |
| Na   |                  |                  |                  |                  | <u>.80</u><br>81  | <u>.61</u><br>81  | <u>.33</u><br>81 | <u>-.04</u><br>34 | <u>-.05</u><br>77 | <u>.09</u><br>70 | <u>.57</u><br>33  |
| Cl   |                  |                  |                  |                  | <u>75</u><br>75   | <u>.61</u><br>75  | <u>.38</u><br>75 | <u>.16</u><br>34  | <u>.09</u><br>70  | <u>.54</u><br>70 | <u>.75</u><br>33  |
| S04  |                  |                  |                  |                  | <u>75</u>         | <u>.38</u>        | <u>.38</u>       | <u>.16</u>        | <u>.09</u>        | <u>.54</u>       | <u>.75</u>        |
| NO3  |                  |                  |                  |                  | <u>34</u>         | <u>34</u>         | <u>34</u>        | <u>34</u>         | <u>34</u>         | <u>34</u>        | <u>34</u>         |
| NH4  |                  |                  |                  |                  | <u>36</u>         | <u>36</u>         | <u>36</u>        | <u>36</u>         | <u>36</u>         | <u>36</u>        | <u>36</u>         |
| SI   |                  |                  |                  |                  | <u>71</u>         | <u>71</u>         | <u>71</u>        | <u>71</u>         | <u>71</u>         | <u>71</u>        | <u>71</u>         |
| CHG  |                  |                  |                  |                  | <u>32</u>         | <u>32</u>         | <u>32</u>        | <u>32</u>         | <u>32</u>         | <u>32</u>        | <u>32</u>         |

SAP-HAUT (Hêtres)

URFRUITS(Epiceas)

n°21). C'est sans doute là qu'il faut chercher les différences entre les deux cycles suivis, 87-88 ayant été nettement plus humide. Ces "hyperboles" n'admettent cependant pas d'ajustement statistiquement acceptable.

A l'inverse, la plupart des populations semblent suivre des distributions connues (Tableau 16): log-normale pour Ca, Mg, Na et Cl dans presque tous les cas (sauf à La Latte où Na et Cl suivent des lois gamma), log-normale aussi pour la plupart des paramètres de la série des Urfruits (sauf alcalinité (loi normale), NH<sub>4</sub> et Si (aucune loi)). Les concentrations en K n'ont pu être modélisées pour les pluviollessivats de hêtres (il aurait fallu séparer les périodes estivales et hivernales, mais alors les populations deviendraient trop petites), mais elles se distribuent suivant une loi gamma à La Latte et log-normale aux Urfruits. Les Sulfates ont une distribution log-normale sous épiceas et à la Sapine Haute.

Bien entendu, ces ajustements demandent à être confirmés avec des populations plus étoffées. Leur modélisation paraît cependant plus prometteuse que dans le cas des pluie.

#### 2.2.2.2 Relations entre éléments

Les matrices de corrélations des pluviollessivats se distinguent de celle des eaux de pluie par une augmentation générale des coefficients de corrélation (Tableau 18), à tel point qu'elles en deviennent assez difficiles à interpréter, constatation faite par d'autres auteurs (DUMAZET, 83, RODA, 83). On peut toutefois identifier une certaine détérioration de la corrélation H, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, une amélioration des corrélations entre les cations (Ca, Mg surtout) et NO<sub>3</sub> d'une part, SO<sub>4</sub> d'autre part. A noter aussi une forte corrélation positive entre la charge totale et H à La Latte, absente ailleurs (plus les eaux sont chargées, plus elles sont acides).

Les ACP ne sont pas très riches en informations non plus, le premier axe étant dans tous les cas un axe de charge totale, les autres axes "sortant" tantôt l'acidité (H<sup>+</sup> seul), tantôt les espèces azotées. A noter toutefois sur les axes secondaires l'opposition entre Na, Cl d'une part, Ca et/ou (K, SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>) d'autre part (v. annexe).

Enfin, les régression multiples apportent les informations suivantes:

- Dans les pluviollessivats de hêtres, H<sup>+</sup> reste accompagné de SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub>, mais les associations cationiques de SO<sub>4</sub> ont changé: les formes 2H, SO<sub>4</sub> et 2NH<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub> ne représentent guère plus de 5% du soufre, alors que plus de 50% se trouve sous forme Mg, SO<sub>4</sub> ou 2K, SO<sub>4</sub> ou Ca, SO<sub>4</sub>.

- Dans les pluviollessivats d'épiceas, on observe un peu la même chose pour SO<sub>4</sub>, si ce n'est qu'il n'a pratiquement plus de lien avec H<sup>+</sup>, pourtant assez abondant. Celui-ci se trouve plutôt associé à NO<sub>3</sub>, voire à Cl.

On voit donc que le passage dans les frondaisons a pro-

fondément modifié les eaux de pluies. On peut résumer ainsi les processus ayant eu lieu, en fonction des résultats observés et à la suite des différents auteurs ayant étudié cette question (EATON et al, 1973, MAYER et ULRICH, 1974, LINDBERG et LOVETT, 1985, DUMAZET, 1983, RODA, 1983, DAMBRINE, 1988, etc.)

1-dissolution partielle ou totale des corps présents à la surface des végétaux, qu'ils soient des métabolites, des gaz, des aérosols, des poussières, surtout riches en S, Na, Cl, Ca, Si (et peut être N).

2-échange entre les protons amenés par la pluie et par les éventuels dépôts occultes acides, sous forme d'acides sulfurique et nitrique, avec les cations foliaires, principalement K et Mg.

3-absorption ou assimilation d'azote (NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>), par le feuillage, les lichens ou les microorganismes.

4-Concentration par évaporation.

La plus grande importance relative des phases 1 et 4 sous épiceas, en raison de la structure et des propriétés des aiguilles, expliquerait les différences observées avec les feuillus.

C'est en fonction de ce schéma d'interprétation que nous pouvons maintenant proposer une estimation des dépôts occultes dans les deux forêts.

## II.2.2.3. Les flux sous couvert et les dépôts occultes

### I.2.2.3.1 Méthode de calcul et incertitude

La formule de calcul des flux sous couvert est la même que pour les flux hors couvert:

$$Psc = Hsc \times Cmpc$$

avec : Psc = Apports sous couvert

Hsc = Hauteur d'eau sous couvert (calculée par les formules §II.1.4)

Cmpc = concentration moyenne pondérée des pluviolésivats)

La forte variabilité spatiale des concentrations et la formule un peu arbitraire utilisée pour les hauteurs ne permettent pas un calcul d'erreur rigoureux, on peut toutefois considérer qu'elle est de l'ordre de 25% sur la valeur annuelle.

Des flux hors et sous couverts aux dépôts occultes, le pas est incertain, car il s'agit de faire la part entre ces dépôts et la récrétion et le lessivage des végétaux. La diversité des méthodes et des résultats rencontrés dans la littérature montre notre ignorance en ce domaine, et plutôt que d'en ajouter une nouvelle, nous avons choisi d'adopter celle de DAMBRINE (1987 et 1988), ce qui permettra des comparaisons directes avec le bassin d'Aubure. Cette méthode a l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur la composition des dépôts, et de bien rendre compte du

comportement de chaque élément. Elle repose néanmoins sur un choix un peu arbitraire, et ses résultats doivent pour cela être interprétés avec beaucoup de prudence.

Il s'agit donc d'affecter un coefficient à la différence (Psc-Phc), correspondant à la part attribuée aux dépôts occultes. Ce coefficient sera d'autant plus proche de 1 que l'élément considéré réunira les conditions suivantes:

- peu présent et peu mobile dans les tissus végétaux
- concentration indépendante du stade phénologique
- présence reconnue dans les dépôts secs.

Ces coefficients sont les suivants:

Ca : 0.8  
Mg : 0.5  
K : 0.05  
Na, Cl : 0.9  
H, N, SO<sub>4</sub> : 1

Pour Si (comme pour H et N sous hêtraie), on considérera les apports totaux comme égaux aux apports hors couvert. Si ces coefficients sont à peu près plausibles pour la plupart des éléments, on peut penser qu'ils sous-estiment les apports d'azote et de protons, puisque le flux sous couvert est la résultante de phénomènes inverses (v. § précédent). Nous ne pouvons que constater le fait pour l'azote, mais pour l'acidité incidente, trois types d'estimation sont possibles:

- en attribuant aux protons le déficit de charges positives dans les dépôts occultes (valeurs entre parenthèses, Tableau 19), méthode appliquée par Dambrine à Aubure. On mesure alors l'apport net de protons plus l'erreur introduite par le choix des coefficients.

- On peut également estimer l'apport "sec" de protons dans les pluviollessivats selon la formule proposée par Mulder (1988):

$$H+(\text{sec}) = \text{SO}_4\text{pv}(\text{nm}) - \text{SO}_4\text{pl}(\text{nm}) + \text{NO}_3\text{pv} - \text{NO}_3\text{pl} + \text{NH}_4\text{pl} - \text{NH}_4\text{pv}$$

(pv=pluviollessivats, pl=pluie, nm=non marin)

En toute rigueur, il faudrait considérer aussi la différence des chlorures non marins entre les pluviollessivats et la pluie, qui est ici négligeable. On mesure ainsi l'apport de protons aux eaux en considérant que tous les sulfates "non marins" (c'est à dire non liés à Na) arrivent sous forme de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, que tous les nitrates non liés à NH<sub>4</sub> arrivent sous forme de HNO<sub>3</sub>. C'est donc une estimation par excès.

- on peut enfin simplement utiliser le flux d'alcalinité dans les pluviollessivats mais alors on obtient l'acidité incidente moins la partie déjà neutralisée par la canopée.

Compte tenu du nombre et de l'arbitraire des hypothèses utilisées pour l'estimation des dépôts occultes, il est délicat de proposer une marge d'erreur. En supposant que les coefficients soient connus à 15% près (100% pour K), On aboutit à une erreur sur la déposition globale de l'ordre de 40%.

| Station                  |   | H+         | Ca   | Mg  | K    | Na   | Cl   | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 | Si  |
|--------------------------|---|------------|------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-----|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | a | 0,37       | 10,2 | 2,8 | 3,7  | 12,7 | 17,5 | 25,1  | 4,4   | 7,2   | 0,5 |
|                          | b | 0,17       | 20,8 | 4,1 | 29,3 | 22,1 | 29,4 | 30,3  | -     | 2,9   | 3,0 |
|                          | c | (0,13)     | 8,5  | 0,7 | 1,3  | 8,9  | 11,3 | 5,2   | -     | -     | 2,6 |
|                          | d | (0,49)     | 18,7 | 3,5 | 5,0  | 21,6 | 38,8 | 30,3  | 4,4   | 7,2   | 3,0 |
| -----                    |   |            |      |     |      |      |      |       |       |       |     |
| SAPINE HAUTE<br>(Hêtres) | a | 0,35       | 9,9  | 2,7 | 3,7  | 12,7 | 17,5 | 24,2  | 4,4   | 6,9   | 0,4 |
|                          | b | 0,45       | 20,8 | 5,1 | 30,3 | 26,6 | 39,5 | 36,4  | -     | 2,1   | 6,4 |
|                          | c | 0,1(0,21)  | 8,8  | 1,2 | 1,3  | 13,2 | 20,9 | 12,1  | -     | -     | 5,9 |
|                          | d | 0,45(0,67) | 18,7 | 3,9 | 5,0  | 25,9 | 38,4 | 36,4  | 4,4   | 6,9   | 6,4 |
| -----                    |   |            |      |     |      |      |      |       |       |       |     |
| LATTE<br>(Épicéas)       | a | 0,35       | 10,1 | 2,8 | 3,7  | 12,7 | 17,5 | 24,9  | 4,6   | 7,1   | 0,5 |
|                          | b | 0,55       | 34,1 | 6,0 | 35,0 | 28,5 | 41,8 | 47,6  | -     | 2,0   | 5,1 |
|                          | c | 0,2(0,78)  | 12,0 | 1,6 | 1,6  | 15,1 | 23,1 | 22,7  | -     | -     | 4,6 |
|                          | d | 0,55(1,13) | 22,0 | 4,4 | 5,3  | 27,8 | 40,6 | 47,6  | 4,6   | 7,1   | 5,1 |

### Cycle 1986-87

Tableau 19: Les apports atmosphériques hors et sous couvert

a. apports hors couvert

b. flux sous couvert

c: dépôts occultes (v. texte) (=k(b-a))

d: apports sous couvert (=a+c)

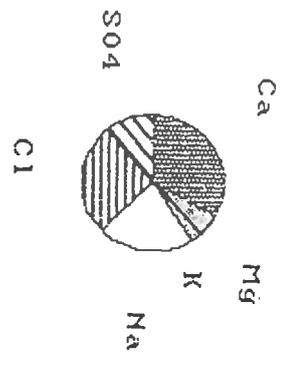
entre parenthèses: données calculées. Valeurs en kg/ha/an

| Station                  |   | H+         | Ca   | Mg  | K    | Na   | Cl   | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 | Si  |
|--------------------------|---|------------|------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-----|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | a | 0,46       | 16,4 | 3,3 | 5,9  | 14,8 | 23,9 | 25,3  | 8,0   | 5,6   | 0,2 |
|                          | b | 0,25       | 23,4 | 4,4 | 24,4 | 19,0 | 32,1 | 26,8  | 6,8   | 5,3   | 2,3 |
|                          | c | (0)        | 5,6  | 0,5 | 0,9  | 4,0  | 7,8  | 1,5   | -     | -     | 2,1 |
|                          | d | 0,46       | 22,0 | 3,8 | 6,8  | 18,8 | 31,7 | 26,8  | 8,0   | 5,6   | 2,3 |
| -----                    |   |            |      |     |      |      |      |       |       |       |     |
| SAPINE HAUTE<br>(Hêtres) | a | 0,44       | 16,1 | 3,2 | 5,7  | 14,6 | 23,4 | 24,7  | 7,8   | 5,5   | 0,2 |
|                          | b | 0,26       | 18,7 | 4,1 | 22,3 | 20,6 | 30,9 | 28,3  | 2,8   | 1,6   | 2,3 |
|                          | c | (0,12)     | 2,1  | 0,5 | 0,8  | 5,7  | 7,1  | 3,6   | -     | -     | 2,2 |
|                          | d | 0,44(0,57) | 18,2 | 3,6 | 6,5  | 20,3 | 30,5 | 28,3  | 7,8   | 5,1   | 2,3 |
| -----                    |   |            |      |     |      |      |      |       |       |       |     |
| URFRUITS<br>(Épicéas)    | a | 0,48       | 17   | 3,4 | 6,1  | 15,5 | 24,8 | 25,8  | 8,2   | 5,8   | 0,2 |
|                          | b | 0,33       | 24,3 | 5,8 | 31,5 | 31,6 | 51,8 | 33,3  | 13,1  | 7,6   | 8,5 |
|                          | c | (0,32)     | 5,8  | 1,2 | 1,3  | 15,3 | 25,7 | 7,5   | 4,9   | 1,8   | 8,3 |
|                          | d | 0,48(0,80) | 23,8 | 4,6 | 7,4  | 30,8 | 50,5 | 33,3  | 13,1  | 7,6   | 8,5 |
| -----                    |   |            |      |     |      |      |      |       |       |       |     |
| LATTE<br>(Épicéas)       | a | 0,51       | 17,6 | 3,6 | 6,3  | 16,1 | 25,7 | 26,7  | 8,7   | 6,1   | 0,2 |
|                          | b | 1,07       | 40,0 | 9,0 | 36,6 | 38,8 | 64,1 | 58,2  | 4,1   | 1,6   | 4,5 |
|                          | c | 0,57(0,85) | 17,9 | 2,7 | 1,5  | 21,6 | 36,5 | 31,5  | -     | -     | 4,3 |
|                          | d | 1,07(1,36) | 35,5 | 7,3 | 7,8  | 37,7 | 62,2 | 58,2  | 8,7   | 6,1   | 4,5 |

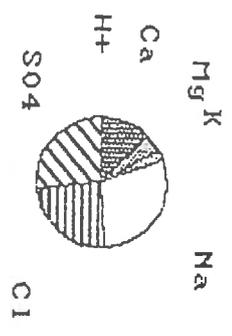
### Cycle 1987-88

Figure 23 : Composition moyenne et quantité de dépôts occultes (87-88)

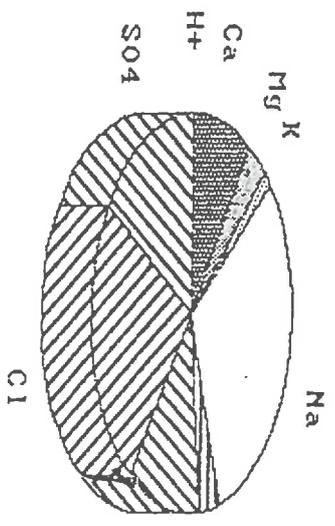
SAP-BAS (1.0keq/ha)



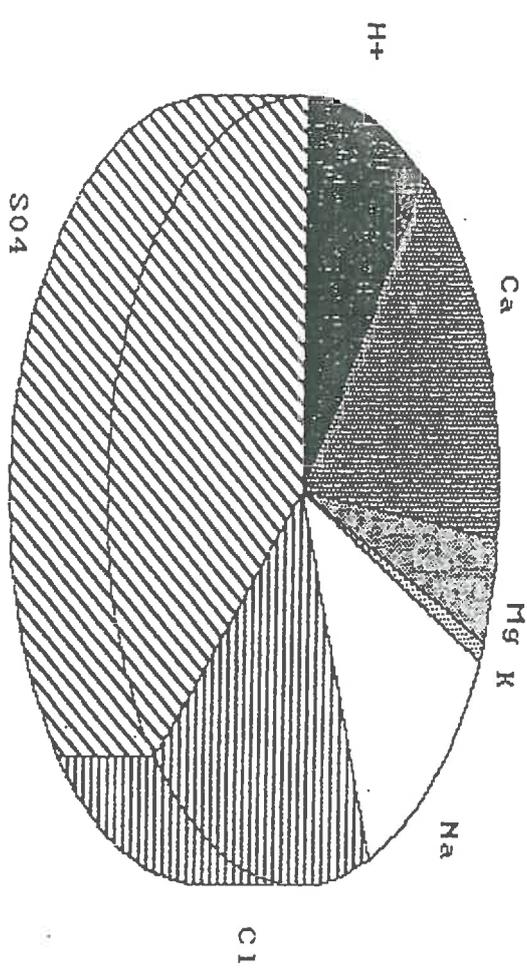
SAP-HAUT (.8keq/ha)



URFRUITS (3.0keq/ha)



LATTE (5.4keq/ha)



### II.2.2.3.2 Résultats (Tableau 19 et Figure 22)

La première chose qui saute aux yeux, c'est bien sûr la différence entre les végétations, les dépôts occultes sous les épicéas étant trois à cinq fois plus élevés que sous hêtres en 87-88 (2 à 3 fois plus si l'on prend la valeur moyenne sur deux ans). Les éléments majeurs les plus importantes sont le soufre, le chlore, le sodium et le calcium. La station des Urfruits se distingue par une proportion plus grande de Na et Cl et la présence (ou l'absorption incomplète) d'azote ( $\text{NH}_4$  et surtout  $\text{NO}_3$ ). Dans la littérature, on trouve à peu près autant d'études rapportant une absorption nette des espèces azotées par le feuillage, (LOVETT et LINDBERG, 85, PRICE et WATTERS, 88...), que l'inverse (IVENS et AL, 88, DAMBRINE, 89...). Outre le niveau des apports azotés, il est possible que le type d'essence et l'âge des arbres aient une influence sur ce phénomène (RAPP, 74).

On observe aussi une différence très nette entre les deux cycles suivis sous hêtres, les dépôts occultes en 86-87 étant à peu près deux fois plus élevés qu'en 87-88, ceci étant encore une fois à mettre en rapport avec les différences de pluviosités.

Cela ne se retrouve pas à La Latte, les pluviométriques du cycle 87-88 étant particulièrement chargés. Il est cependant possible que l'aggravation très sensible de l'état sanitaire des arbres de cette placette (allant jusqu'à la mort pour l'un d'entre eux) ait modifié la disponibilité des éléments minéraux dans les tissus, d'où une surestimation des entrées (voir TUKEY, 71, SMITH, 81, in PRICE et WATTERS, 88).

Mais il n'est pas exclu qu'il y est un certain gradient sur les versants de la déposition occulte, comme cela été mis en évidence par exemple pour le plomb (GLAVAC et al., 88). Deux arguments plaident pour cette hypothèse:

- les résultats de Dumazet (op.cit) montre certes des niveaux de concentration plus bas que sous les arbres malades, mais l'augmentation concerne autant les éléments peu récrétés (Na et Ca), que les éléments très récrétés (K et Mg).

- Les apports à la Sapine Haute semblent plus forts, et en tous cas plus acides qu'à la Sapine Basse.

L'acidité dans la déposition occulte est donc plus forte sous épicéas, quelque soit la méthode utilisée pour le calcul: Par la formule de Mulder, on obtient:

|               |                 |
|---------------|-----------------|
| Sapine basse: | 6 eq/ha/an      |
| Sapine haute: | 126 eq/ha/an    |
| Urfruits      | : 613 eq/ha/an  |
| Latte         | : 1852 eq/ha/an |

Les flux d'alcalinité donnent quand à eux:

|               |                |
|---------------|----------------|
| Sapine basse: | 0 eq/ha/an     |
| Sapine haute: | 23,5 eq/ha/an  |
| Urfruits      | : 235 eq/ha/an |
| Latte         | : 685 eq/ha/an |

Si l'on reprend l'estimation donnée dans le tableau

n° 19 et que l'on compare avec les valeurs de la littérature concernant les apports totaux de protons (tableau n°20), on constate qu'elle se situe parmi les plus faibles, du même ordre que les niveaux observés en Scandinavie. Le climat de pollution du Mont-Lozère semble donc bien correspondre à un "bruit de fond" et non à une circulation privilégiée depuis tel ou tel foyer de pollution.

| Référence            | Site           | espèce | apport total |
|----------------------|----------------|--------|--------------|
| Nilsson et al.,86    | N. Suède       | Epicea | 0,2-0,4      |
| Grennfelt et al.(85) | SW Suède       | id.    | 0,8-1,2      |
| Lindberg et al.,86   | S. USA         | Chêne  | 1,6          |
| Freiesleben al.,86   | N Danemark     | Epicea | 1,84         |
| Matzner,86           | NE RFA         | Hêtre  | 1,9          |
| id.                  | Solling(RFA)   | Epicea | 3,8          |
| Paces,84             | bv rural(Tch.) | id.    | 1,6          |
| id.                  | bv indust      | id.    | 6,3          |
| Dambrine(89)         | Aubure(F.)     | id.    | 1,9          |
| cette étude          | Mont-Lozère    | id.    | 0,8-1,4      |
| id.                  | id.            | Hêtre  | 0,4-0,7      |

tableau 20:Apports totaux de protons(en keq/ha/an )dans la littérature,cités par Dambrine,88 .

Au total, ces résultats sont cohérents avec les informations recueillies grâce au collecteur de pluie à ouverture automatique, à savoir des dépôts occultes riches en soufre, en sodium et en chlorure, un peu moins en Calcium, Magnésium et Potassium. Leur fort caractère maritime (à confirmer, voir chap.i.4) qui permettrait d'expliquer leur faible acidité, conduirait à relativiser dans notre cas l'équation classique: dépôts occultes + forts apports de sulfates = pollution atmosphérique acidifiante, telle qu'on pouvait être tenté de l'appliquer à la lecture des premiers résultats.

Il reste néanmoins de nombreuses incertitudes sur la mesure de ces dépôts occultes, que seul un alourdissement sensible du dispositif de mesure permettrait de partiellement lever. Nous verrons plus loin les conséquences de leur prise en compte sur les bilans entrées-sorties des bassins-versants, après avoir envisagé leur devenir dans les sols.

## II.3 LES EAUX DU SOL

### II.3.1 introduction et justification des choix adoptés

L'étude des solutions du sol pose un certain nombre de problèmes théoriques et pratiques, qui tiennent à la fois à la définition de l'objet à étudier, et à la nature même de cet objet.

Pour simplifier, la typologie que nous utiliserons se bornera à une définition en fonction des modes de prélèvement, toute eau collectée grâce à sa mobilité propre sera dite gravitaire ou libre, alors que lorsque son prélèvement aura nécessité l'application d'une certaine énergie d'extraction, on la qualifiera d'eau liée.

Rebutés a priori par les difficultés d'implantation de dispositifs lysimétriques dans ces sols très enrochés, nous avons tenté pendant deux mois de prélever les eaux au moyen de bougies poreuses implantées verticalement dans les sols. L'abandon rapide de cette technique a deux raisons principales:

- les volumes recueillis étaient très faibles (<10ml), même en période humide, à cause d'une pompe à vide peu performante et vraisemblablement d'un mauvais contact céramique/sol liée à la texture très grossière des horizons.

- il nous est très vite apparu que le matériel utilisé n'était pas totalement inerte, cela provoquant une remontée du pH et une contamination en Calcium et Potassium.

Nous avons finalement réussi à implanter en septembre 87 des lysimètres dans trois placettes (Sapine basse, Ur-fruits et Latte), à une seule profondeur, en l'occurrence la base de l'horizon All(v. Chap. I), soit environ 20cm. Dans les deux premiers sites, deux types de dispositifs furent installés en parallèle: des plaques d'acier inoxydable en "V" de 50cm de longueur sur 30cm de largeur, et des entonnoirs de PVC enterrés, d'environ 40cm de diamètre. Dans le dernier site, seule une plaque a été placée dans un premier temps, le dispositif s'étant étoffé depuis mai 88 avec la mise en place de deux entonnoirs enterrés en deux autres points du bassin, pour le suivi de la coupe forestière.

Pour tenter de pallier l'absence de données sur les eaux des horizons profonds, nous avons à deux reprises (les 16-17/10/87 et 10,17-18/11/88) prélevé des échantillons de sol à la tarière à différentes profondeurs (10/20cm, 50/60cm et, si possible, 80/90cm), afin d'en extraire les solutions.

Deux techniques ont été utilisées pour cela:

- la centrifugation, à 2000tr/mn pendant 15mn dans des pots à double fond, selon la méthode utilisée par Dumazet(1983). Cette technique, proche de celle utilisée dans les Vosges par GRAS et al., (1987), a l'avantage d'être simple et rapide mais d'un faible rendement quant à la quantité d'eau recueillie. De plus, le remaniement subi par l'échantillon et l'incerti-

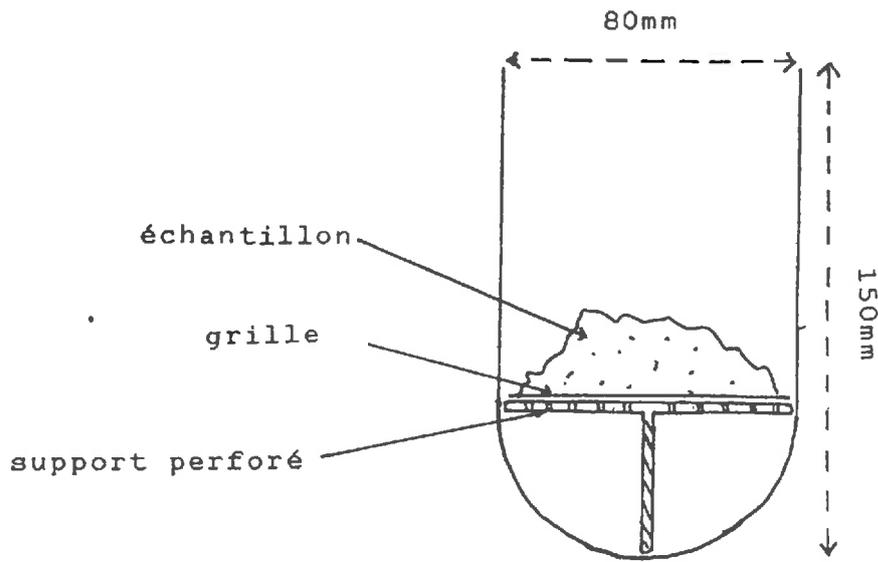


Figure 23a :Schema du type de pot de centrifugation utilisé

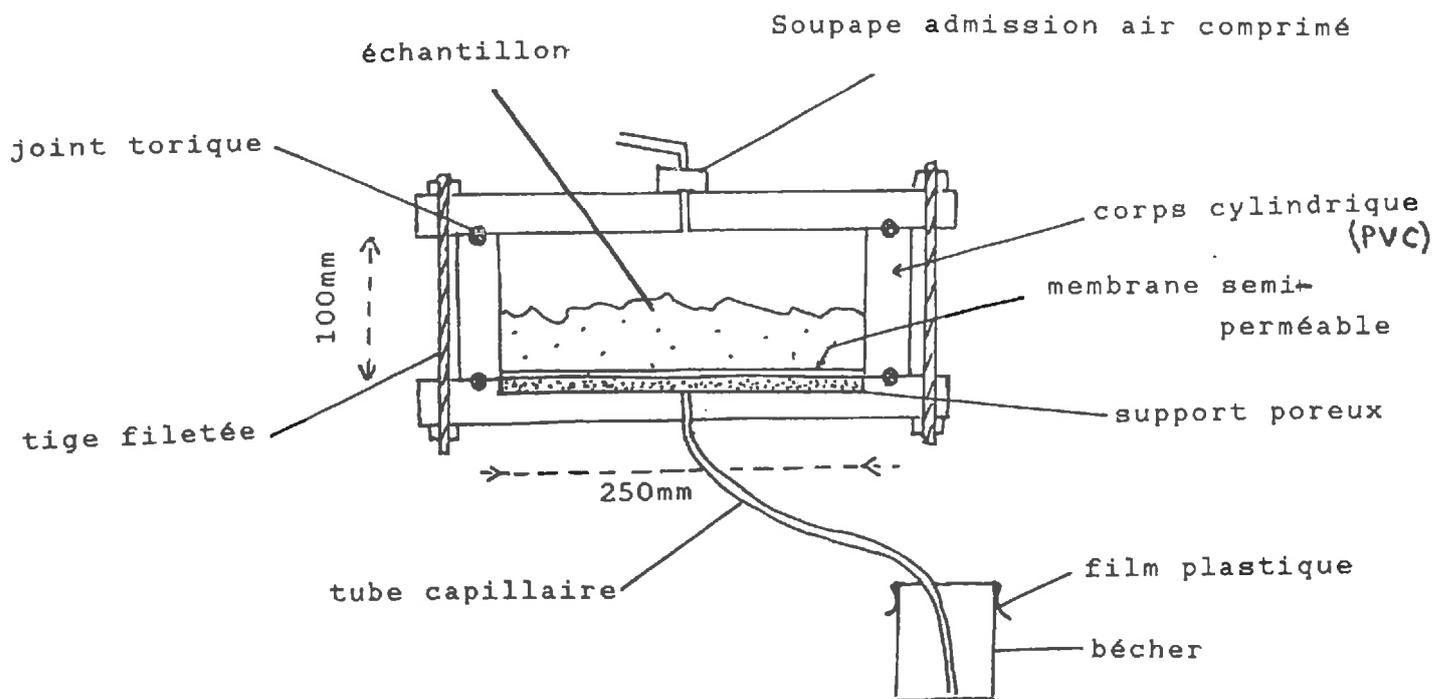


Figure 23b:shéma du dispositif d'extraction sous pression

tude quant à la nature de l'eau extraite rend difficile l'interprétation des résultats. D'où la recherche d'une autre méthode.

-La mise sous pression, (à pF 3) dans des cellules à humidité habituellement utilisées par les physiciens du sol pour l'établissement de courbes  $\theta=f(pF)$ . Les cellules mises à notre disposition par le Laboratoire de Physique du sol de l'INRA d'Orléans étaient de grande capacité (>1 Kg de sol) et en PVC (v. schéma fig. 23) donc assez bien adaptées à l'usage un peu particulier auquel nous les destinions. Les avantages de cette technique sont multiples: facilité de mise en oeuvre, possibilité de travailler sur des échantillons peu remaniés, bonne maîtrise du pF d'extraction (avec même possibilité d'échantillonnages fractionnés). Des problèmes subsistent néanmoins quant à l'adaptation parfaite du matériel à des prélèvements chimiques. L'inertie a été testée par des blancs à l'eau permutée, mais la durée de l'extraction (24h minimum) nécessite d'éviter toute évaporation. Le nettoyage parfait de tous les éléments n'était pas chose aisée dans un laboratoire non prévu pour cela, et l'air comprimé utilisé n'était pas filtré. Mais la principale source d'erreur est la nécessité de saturer l'ensemble du dispositif au départ afin d'assurer la continuité hydraulique nécessaire au maintien de la pression, d'où une dilution des eaux inévitable et difficile à mesurer avec précision. La poursuite de la mise au point de cette méthode nous paraît cependant justifiée. La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes est exposée au § II.3.2.2

## II.3.2 Composition chimique des eaux du sol

### II.3.2.1 les eaux gravitaires

#### II.3.2.1.1 généralités

Le tableau n°21 et la figure n°24 nous apprennent que les eaux libres sont à peu près aussi chargées que les pluviolossivats, voire un peu moins, et d'une acidité comparable.

Notons dès à présent que la balance ionique remarquablement équilibrée pour des eaux de sols ne l'est hélas que par le fruit du hasard. On sait que ces eaux contiennent en quantités non négligeables au moins deux substances non dosés ici, des acides organiques et de l'aluminium (plus éventuellement du Fer et du Manganèse). En ce qui concerne l'aluminium, un test a été effectué donnant des valeurs de 15 à 25  $\mu\text{eq/l}$  à La Sapine et aux Urfruits, et de l'ordre de 75  $\mu\text{eq/l}$  à La Latte.

Les trois stations ont des comportements différents:

- sous la hêtraie, les eaux subissent assez peu de modifications: elles sont un peu plus acides, les anions ne varient pas et l'on observe une diminu-

| Station                  | H+             | Alc.            | Ca             | Mg            | K              | Na             | Cl             | SO4             | NO3           | NH4          | Si             |
|--------------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|----------------|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | 19,3<br>(10,8) | -10,1<br>(10,7) | 41,9<br>(14,8) | 24,9<br>(7,9) | 11,6<br>(10)   | 56,7<br>(25,7) | 50<br>(29,1)   | 93,5<br>(19,2)  | 3,4<br>(4,5)  | 2<br>(2,6)   | 20,4<br>(12,9) |
| URFRUITS<br>(Epicéas)    | 14,9<br>(13)   | -3,3<br>(12,7)  | 48,5<br>(14,3) | 31,3<br>(8,5) | 9,3<br>(8,3)   | 57,3<br>(10,7) | 49,9<br>(25,5) | 91,9<br>(18,4)  | 8,4<br>(9,5)  | 2,2<br>(2,7) | 38,4<br>(13,7) |
| LATTE<br>(Epicéas)       | 33<br>(15,1)   | -24,4<br>(10,1) | 103<br>(46,2)  | 45,7<br>(24)  | 29,7<br>(15,8) | 59,7<br>(42,4) | 63<br>(63,6)   | 106,6<br>(35,8) | 106,2<br>(65) | 8,9<br>(9,3) | 30<br>(15,4)   |

Tableau 21 :Composition chimique moyenne des eaux gravitaires sur toute la période de collecte.(écart-type entre parenthèses) concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

Figure 24 Composition moyenne des eaux gravitaires

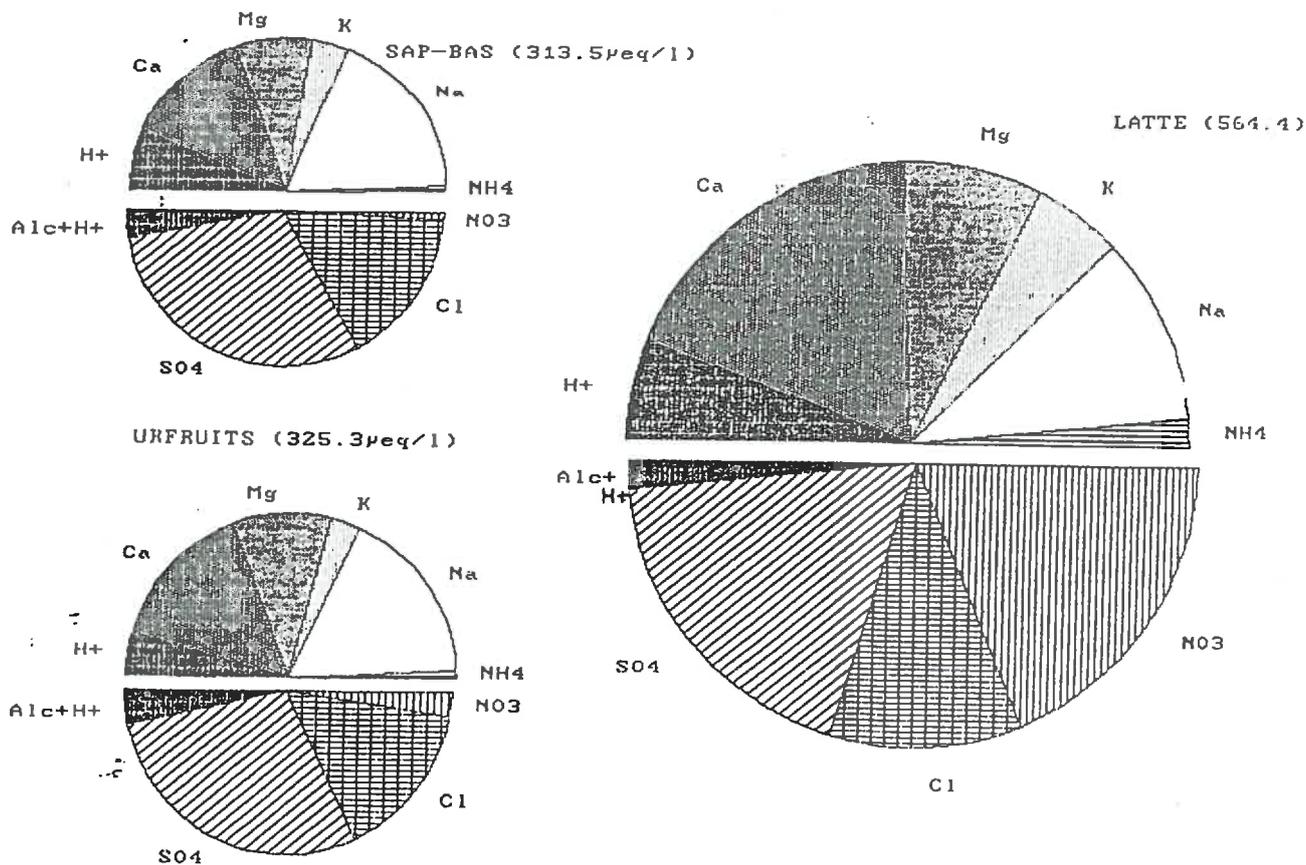


Tableau 22

Matrice des corrélations(Coef. de Pearson)

Eaux GRAVITAIRES

Les coef. soulignés sont significatifs à  $\alpha=0.01$   
 les chiffres inférieurs indiquent le nombre de couples

|      | Alc.        | Ca          | Mg         | K           | Na         | Cl          | SO4         | NO3         | NH4         | Si          | CHG         |
|------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| H*   | <u>-.74</u> | .26         | .22        | .30         | .24        | .32         | .21         | .18         | .29         | <u>-.66</u> | .32         |
| Alc. | 16          | 16          | 16         | 16          | 16         | 16          | 16          | 16          | 16          | 15          | 16          |
| Ca   |             | <u>-.10</u> | .02        | <u>-.48</u> | .03        | <u>-.10</u> | .32         | <u>-.37</u> | <u>-.06</u> | .54         | <u>-.13</u> |
| Mg   |             |             | <u>.93</u> | <u>.57</u>  | <u>.75</u> | <u>.80</u>  | .42         | .57         | <u>.77</u>  | .06         | <u>.94</u>  |
| K    |             |             | 16         | <u>.45</u>  | <u>.87</u> | <u>.89</u>  | .50         | .47         | .72         | .15         | <u>.95</u>  |
| Na   |             |             |            | 16          | .44        | .46         | <u>-.21</u> | .64         | .56         | .15         | <u>.60</u>  |
| Cl   |             |             |            |             | 16         | <u>-.92</u> | .53         | .27         | .69         | .14         | <u>.88</u>  |
| SO4  |             |             |            |             |            | 16          | .51         | .34         | <u>.83</u>  | <u>-.25</u> | <u>.93</u>  |
| NO3  |             |             |            |             |            |             | 16          | .16         | .45         | .15         | <u>.85</u>  |
| NH4  |             |             |            |             |            |             |             | 16          | .16         | .15         | <u>.59</u>  |
| Si   |             |             |            |             |            |             |             |             | 16          | <u>-.23</u> | <u>.81</u>  |
| CHG  |             |             |            |             |            |             |             |             |             | 15          | <u>-.08</u> |

LATTE (Epiceas)

|      | Alc.        | Ca         | Mg         | K          | Na         | Cl  | SO4 | NO3 | NH4 | Si  | CHG |
|------|-------------|------------|------------|------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H*   | <u>-.71</u> | .29        | .14        | .49        | .36        | .04 | .12 | .14 | .04 | .57 | .27 |
| Alc. | 18          | 19         | 19         | 19         | 19         | 19  | 19  | 19  | 19  | 19  | 19  |
| Ca   |             | <u>.22</u> | .34        | .60        | .42        | .23 | .36 | .12 | .34 | .36 | .42 |
| Mg   |             | 18         | <u>.78</u> | 18         | 18         | 18  | 18  | 18  | 18  | 18  | 18  |
| K    |             |            | 20         | <u>.80</u> | .62        | .47 | .36 | .69 | .35 | .57 | .80 |
| Na   |             |            |            | 20         | <u>.70</u> | .69 | .49 | .38 | .27 | .36 | .89 |
| Cl   |             |            |            |            | 20         | .56 | .40 | .40 | .35 | .68 | .84 |
| SO4  |             |            |            |            |            | 20  | .25 | .35 | .25 | .62 | .91 |
| NO3  |             |            |            |            |            |     | 20  | .32 | .37 | .4  | .84 |
| NH4  |             |            |            |            |            |     |     | 20  | .09 | .05 | .48 |
| Si   |             |            |            |            |            |     |     |     | .37 | .45 | .48 |
| CHG  |             |            |            |            |            |     |     |     | 20  | .01 | .35 |
|      |             |            |            |            |            |     |     |     |     | 20  | .56 |
|      |             |            |            |            |            |     |     |     |     |     | 20  |

SAP-BAS (Hêtres)

|      | Alc.        | Ca          | Mg  | K          | Na         | Cl  | SO4 | NO3 | NH4 | Si  | CHG |
|------|-------------|-------------|-----|------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H*   | <u>-.76</u> | .13         | .24 | .29        | .09        | .23 | .37 | .18 | .22 | .10 | .44 |
| Alc. | 33          | 32          | 33  | 33         | 33         | 33  | 31  | 35  | 34  | 35  | 29  |
| Ca   |             | <u>-.06</u> | .29 | .38        | .05        | .34 | .42 | .27 | .33 | .07 | .46 |
| Mg   |             | 30          | 31  | 31         | 31         | 31  | 33  | 33  | 33  | 33  | 28  |
| K    |             |             | 35  | <u>.36</u> | .57        | .56 | .26 | .34 | .25 | .08 | .71 |
| Na   |             |             |     | 35         | <u>.34</u> | .34 | .33 | .34 | .34 | .35 | .30 |
| Cl   |             |             |     |            | 35         | .56 | .59 | .65 | .17 | .18 | .77 |
| SO4  |             |             |     |            |            | 35  | .34 | .35 | .35 | .36 | .30 |
| NO3  |             |             |     |            |            |     | .44 | .41 | .53 | 0   | .66 |
| NH4  |             |             |     |            |            |     | 35  | 35  | 35  | 36  | 30  |
| Si   |             |             |     |            |            |     |     | .43 | .21 | .36 | .81 |
| CHG  |             |             |     |            |            |     |     | 34  | 31  | 35  | 30  |
|      |             |             |     |            |            |     |     | 33  | .24 | .04 | .91 |
|      |             |             |     |            |            |     |     | 33  | .35 | .34 | .86 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     | .49 | .15 | .69 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     | .64 | .16 | .69 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     | .33 | .37 | .30 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     |     | .39 | .48 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     |     | 37  | .30 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     |     |     | .10 |
|      |             |             |     |            |            |     |     |     |     |     | 30  |

URFRUITS(Epiceas)

tion du Potassium et de l'ammonium au profit du Sodium et du Calcium(et de l'Aluminium). L'élément qui varie le plus est évidemment la Silice, qui voit ses concentrations doubler,atteignant ainsi la moitié de la concentration dans la rivière.

-Aux Urfruits, on constate une baisse très nette des concentrations,un pH légèrement plus élevé et une concentration en silice assez forte.Les concentrations en azote minéral chutent,de même que celle en Potassium.Il convient de noter qu'on observe sur ce site une certaine circulation latérale de l'eau,et que l'écoulement peut se maintenir plusieurs jours. Les percolats recueillis ont donc en moyenne un temps de séjour plus long,qui peut être l'explication de l'évolution plus marquée de la composition des eaux.

-Dans la pessièrre "mal en point" de La Latte,les eaux ont les caractéristiques d'un site en voie d'acidification,avec un pH restant en dessous de 4,5 ,une composition anionique largement dominée par les ions d'acides forts (NO<sub>3</sub>,SO<sub>4</sub>).Il est quand même à noter l'origine différente des deux anions,SO<sub>4</sub> venant des pluviollessivats(la concentration est ici presque deux fois moindre),alors que NO<sub>3</sub> est endogène.On n'observe pas ici de réduction de la concentration de K,et la teneur en Silice est moins élevée qu'aux Urfruits.Au total,la charge est sensiblement la même que dans les pluviollessivats.

On ne distingue pas d'effet saisonnier marqué,tout au plus une légère augmentation des concentrations en Silice en période chaude, alors que les concentrations en cations basiques et en nitrates seraient plus élevées en période froide.

### 3.2.1.2 Les relations entre éléments

Du fait du peu d'analyses disponibles, nous nous bornerons à l'examen des matrices de corrélation (Tab. n°22) et de quelques régressions caractéristiques.

Contrairement à ce qui précède,ce sont les stations de La Sapine et de La Latte qui montrent les matrices de corrélation les plus ressemblantes.On y trouve une certaine liaison entre l'alcalinité et la silice,et un groupe comprenant les cations et NO<sub>3</sub>.Les sulfates se retrouvent aussi dans ce groupe,ayant une corrélation maximum avec Mg(Sapine) ou Na(Latte).Aux Urfruits, La silice ne semble corrélée avec rien,mais on retrouve la "classique" association SO<sub>4</sub>,NO<sub>3</sub> et H<sup>+</sup> de la pluie et des pluviollessivats. Des procédures de régression multiples ont été utilisées pour les sulfates,les protons,la silice,avec des résultats assez peu probants.Les sulfates semblent être surtout accompagnés de K et Mg;pour les protons,les modèles à plusieurs variables n'améliorent guère l'information,le "meilleur" anion étant suivant les cas NO<sub>3</sub>(Latte), Cl(Sapine),ou SO<sub>4</sub>(Urfruits),mais avec des coefficients toujours peu ou pas significatifs.Il semblerait

donc qu'à ce stade, les protons soient surtout liés à des acides organiques.

Pour la Silice, l'absence du paramètre Aluminium limite passablement l'intérêt des régressions multiples. Outre la corrélation assez bonne avec l'alcalinité constatée à La Latte et à La Sapine, on la retrouve liée tantôt à  $\text{NO}_3$  (Latte), tantôt à  $\text{NO}_3, \text{K}, \text{Na}$  (Sapine), ou encore à  $\text{Mg}, \text{Na}$  (Ur-fruits).

Avant d'aller plus avant dans l'interprétation, il convient de remarquer que ces eaux résultent d'un mélange entre les eaux de pluviollessivats plus ou moins modifiées par le lessivage des litières, et les eaux déjà présentes dans les pores du sol, sur lesquelles les extractions réalisées peuvent apporter quelques informations.

### II.3.2.2 les eaux liées

#### II.3.2.2.1 Comparaison des deux méthodes d'extraction

Pour 26 échantillons de sols, on dispose des résultats d'analyses des eaux extraites par les deux méthodes. On dispose donc de variables appariées dont nous avons testé l'égalité par le test de Wilcoxon (CEA, 78). Il apparaît que l'influence de la méthode de prélèvement est significative au seuil de 5% pour  $\text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}, \text{NO}_3, \text{NH}_4$  (concentrations plus fortes dans les "jus" de centrifugation), et pour Si (effet inverse). Pour ce dernier élément, les écarts sont assez considérables, l'extraction par pression donnant des concentrations en Silice en moyenne cinq fois plus fortes. Rien ne nous permet actuellement d'expliquer ces différences. Le pF d'extraction est logiquement plus élevé dans les cellules à pression, où la pression de 1 bar est maintenue pendant 24h, que dans les pots de centrifugation où un potentiel équivalent ou un peu inférieur n'est maintenu que quelques minutes. Cela est d'ailleurs confirmé par les volumes extraits, qui sont toujours plus élevés dans le premier cas. Mais il est possible que la destruction de structure imposée par la centrifugation modifie la nature des eaux mobilisées. On sait par exemple que les caractéristiques du complexe d'échange peuvent varier considérablement entre les parois des pores grossiers et l'intérieur des agrégats.

A défaut d'être parfaitement superposables, les deux séries d'analyses sont néanmoins comparables, et montrent sensiblement les mêmes tendances entre les végétations ou les horizons (Tableau 23). De plus la chimie des eaux de centrifugation telle qu'elle apparaît là est tout à fait en accord avec les résultats obtenus par la même technique par B. Dumazet. Pour cette raison, c'est essentiellement sur ces données que nous fonderons notre propos.

#### III.3.2.2.2 Résultats

Les eaux liées sont environ cinq fois plus chargées que les eaux lysimétriques recueillies à la même profondeur.

| Station                  |   | Ca    | Mg    | K    | Na    | Cl    | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 | Si    |
|--------------------------|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | a | 50,4  | 42,3  | 32,0 | 108,5 | 145,2 | 318,2 | 6,1   | 3,9   | 369,5 |
|                          | b | 55,1  | 49,5  | 24,4 | 130,5 | 150,4 | 63,4  | 11,1  | 1,4   | 205,6 |
|                          | c | 55,8  | 32,9  | 15,3 | 58,7  | 102,3 | 164,3 | 1,0   | 1,0   | 87,5  |
| URFRUITS<br>(Epiceas)    | a | 167,2 | 152,1 | 17,0 | 167,9 | 167,5 | 132,1 | 389,5 | 0,7   | 224,9 |
|                          | b | 89,1  | 57,9  | 11,0 | 96,6  | 71,8  | 202,8 | 67,8  | 1,4   | 209,0 |
|                          | c | 39,4  | 32,1  | 11,5 | 157,5 | 60,1  | -     | 32,1  | 3,6   | 185,6 |
| LATTE<br>(Epiceas)       | a | 141,5 | 80,5  | 36,1 | 159,2 | 158,5 | 357,8 | 80,0  | 3,2   | 437,0 |
|                          | b | 127,7 | 80,1  | 97,1 | 180,5 | 226,3 | 137,8 | 42,7  | 3,6   | 260,0 |

Tableau 23a: Composition des eaux extraites par pression  
(moyennes de deux valeurs)  
a. profondeur 10/20cm  
b. profondeur 50/60cm  
c: profondeur 80/90cm  
valeurs en µeq/l (µmoles/l pour Si)

| Station                  |   | Ca    | Mg    | K     | Na    | Cl    | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 | Si    |
|--------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | a | 164,6 | 112,6 | 103,7 | 178,3 | 230,5 | 375,5 | 10,3  | 38,6  | 66,4  |
|                          | b | 149,7 | 53,4  | 69,9  | 121,8 | 152,3 | 145,6 | 12,9  | 46,4  | 61,8  |
|                          | c | 84,8  | 45,2  | 27,9  | 107,1 | 91,1  | 104,0 | 0,0   | 8,6   | 25,3  |
| URFRUITS<br>(Epiceas)    | a | 259,5 | 179,3 | 33,4  | 180,0 | 150,7 | 270,4 | 432,0 | 15,1  | 113,4 |
|                          | b | 164,7 | 67,4  | 18,2  | 120,7 | 87,8  | 114,4 | 124,9 | 15,0  | 56,9  |
|                          | c | 74,8  | 42,7  | 15,1  | 82,7  | 70,8  | 125,2 | 61,4  | 10,0  | 39,6  |
| LATTE<br>(Epiceas)       | a | 801,0 | 193,3 | 136,0 | 920,0 | 996,9 | 343,2 | 888,9 | 47,5  | 148,0 |
|                          | b | 242,0 | 84,3  | 69,9  | 166,6 | 170,1 | 218,4 | 278,4 | 14,3  | 23,9  |

Tableau 23b: Composition des eaux extraites par centrifugation  
(moyennes de deux valeurs)  
a. profondeur 10/20cm  
b. profondeur 50/60cm  
c: profondeur 80/90cm  
valeurs en µeq/l (µmoles/l pour Si)

Cette différence est plus forte que celle relevée par Gras(1988) dans les Vosges, mais va dans le même sens. Les cations qui dominent sont Ca et Na, celui-ci accentuant sa prépondérance en profondeur. Mg vient ensuite, devançant largement K. Pour les anions, on observe une différence très nette entre la hêtraie d'une part, où les sulfates sont majoritaires, et les nitrates presque absents, et les deux pessières où les nitrates sont bien plus abondants en surface, leur niveau diminuant plus rapidement que celui des sulfates en profondeur. Le fait surprenant est d'ailleurs plus les faibles quantités d'azote minéral dans la hêtraie, à tous les niveaux du parcours des eaux et à toutes les saisons, que leur présence dans la pessière, et surtout dans la pessière agonisante où la stimulation de la minéralisation de la litière par l'ouverture du peuplement se conjugue avec la baisse du prélèvement biologique pour provoquer ces fortes concentrations. On ne dispose que de très peu d'informations sur le pH de ces eaux par suite d'un problème matériel, mais il semble qu'il soit, pour les échantillons les plus superficiels, entre 4.5 et 4.8 à la Sapine et aux Urfruits, vraisemblablement plus bas à La Latte, pour remonter à 5 (Latte), 5.5 (Sapine et Urfruits), dès 60cm. Les balances ioniques accusent un fort déficit de charges positives en surface, surtout sous pessière, alors qu'en profondeur, cette balance a tendance à être plus équilibrée, avec même le plus souvent un excès de cations. Il n'est cependant guère possible d'en tirer des conclusions sur l'alcalinité de ces eaux, eu égard aux erreurs analytiques (amplifiées par les dilutions) et à l'absence de dosage de l'aluminium. On observe aussi une chute très nette des concentrations en profondeur, intéressant à peu près tous les éléments, conformément aux observations de B. Dumazet (op.cit.). Nous reviendrons plus loin en détail sur ce point.

### II.3.3 Synthèse et estimation des flux à 20cm.

Si l'on essaie d'interpréter la composition des eaux gravitaires à la lumière de ce qui précède, on s'aperçoit que la conjugaison de trois mécanismes supposés responsables de cette composition, à savoir pluviollessivage, lessivage des litières et mélange avec les eaux retenues dans le sol devrait aboutir à des eaux nettement plus concentrées. En effet on part de pluviollessivats de charges comparables ou supérieures, et le lessivage des litières et des produits de leur minéralisation, comme le mélange avec des eaux plus chargées ne devraient évidemment que faire progresser cette charge dissoute. Pour tenter d'expliquer ce paradoxe, il convient d'envisager quels éléments sont importés préférentiellement par les trois voies:

- Les pluviollessivats sont riches en Calcium, Potassium, Sulfates (et Nitrates pour les Urfruits).
- les litières, si l'on en croit la littérature, sont plus riches que les organes verts en Ca, plus pauvres

|                | SAPINE BASSE | URFRUITS | LATTE  |
|----------------|--------------|----------|--------|
| Pluie          | 2481         | 2550     | 2634   |
| Pluie-débit    | 753          | (800)    | 616    |
| Pluiolessivage | (2188)       | (1972)   | (2110) |
| Flux à 20cm    | (1957)       | (1850)   | (2039) |

Tableau 2.4: Flux hydriques dans les trois stations  
 Valeurs en mm.  
 Les valeurs entre parenthèses sont estimées

| Station                  | Ca   | Mg   | K    | Na   | Cl   | S04  | NO3  | NH4 | Si   |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | 16,4 | 5,9  | 8,9  | 25,5 | 34,7 | 29,3 | 0,9  | 0,5 | 11,1 |
| URFRUITS<br>(Epiceas)    | 18,0 | 7,0  | 6,7  | 24,3 | 32,7 | 27,2 | 2,2  | 0,6 | 19,9 |
| LATTE<br>(Epiceas)       | 42,0 | 11,3 | 23,7 | 27,9 | 45,5 | 34,8 | 30,3 | 2,5 | 17,1 |

Tableau 2.5: Flux hydrochimiques à 20cm dans le sol, cycle 1987-88  
 Valeurs en kg/ha/an

en N et K, (AUSSENAC et al, 1972), mais ces ions sont plus ou moins lessivables suivant des critères comme l'âge de la litière, la température, etc. (BULDGEN et REMACLE, 81). BULDGEN (1981), propose la classification suivante, par mobilité décroissante:

Na>K>SO<sub>4</sub>>Mg>Ca>NH<sub>4</sub>. Mais comme cet ordre est presque exactement l'inverse de l'ordre d'abondance dans la litière (même auteur), il est difficile de dire en quels éléments l'enrichissement est le plus significatif.

Une étude sur les litières vient de débiter sur nos sites.

-les eaux liées sont riches en Calcium, Sodium, Magnésium, Sulfates, et Nitrates pour La Latte et pauvres en K.

Si l'on fait maintenant le bilan des transformations des eaux gravitaires, (tab. n°26, à la fin de ce chapitre) on constate des tendances différentes suivant les stations:

-Appauvrissement relatif en K et Ca, enrichissement relatif en Mg, Na et Cl dans la hêtraie

-Appauvrissement en K, Ca, Na, Cl, et N, enrichissement en Mg aux Urfruits.

-Appauvrissement en K, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, et enrichissement en NO<sub>3</sub> et Mg à La Latte.

En conséquence, il semble bien que les eaux de percolations aient acquis dans les 20 premiers cm beaucoup des caractéristiques des eaux de rétention, malgré un transit rapide et des concentrations toujours faibles. En fait, si l'on examine les profils de concentrations obtenus par Dumazet et ceux présentés par Prevosto (1988) pour le bassin d'Aubure (v. plus loin), il apparaît que ces eaux se situent en aval d'un pic de concentration situé tout à fait sous les horizons holorganiques, et que les processus tendant à diminuer la charge des solutions (adsorption, précipitation, prélèvement biologique etc.) jouent déjà leur rôle.

Plus encore que pour les pluviollessivats, l'estimation de flux hydrique et hydrochimique est très hasardeuse, car les concentrations sont très variables et l'on ne dispose pas de mesure volumiques fiables. En effet, les dispositifs utilisés ont tendance à fonctionner suivant le modèle du tout ou rien: débordement des bidons de 5l ou pas d'eau ou presque. Les conditions d'infiltration sont de toutes façons éminemment variables dans ce type de milieu (v. chapitre I.), et notre modeste réseau tout à fait inadapté pour les appréhender de manière satisfaisante.

Il en résulte que nous ne pouvons que faire une estimation grossière, pour le cycle 87-88, des flux à 20cm, à partir des moyennes arithmétiques des concentrations et d'une lame drainée dont nous allons passer en revue les moyens d'évaluation:

-utiliser le chlorure, réputé peu impliqué dans les processus biologiques ou pédochimiques d'adsorption (JOHNSON et COLE, 1980), comme traceur et postuler un flux constant. Dans notre cas, cette méthode n'est guère applicable, les concentrations en chlorure

étant, pour les épicéas, plus faibles dans les eaux du sol que dans les pluviolésivats. Si l'on ne prend pas en compte les pluviolésivats et que l'on raisonne à partir des pluies brutes hors couvert, on obtient les lames d'eau suivantes: 1350mm (Sapine), 1400mm (Urfruits), 1150mm (Latte), très inférieures aux lames d'eaux écoulées aux exutoires. Il semble donc qu'il y ait stockage, au moins provisoire, du chlore en dans les premiers cm de sols.

-utiliser les évaluations bioclimatiques de l'ETP, la réserve utile des 20 premiers cm de sol, et calculer un bilan hydrique, (type Thornwaithe par exemple) sur ce système. Si cette méthode devra certainement, à terme, être utilisée, nous avons renoncé à l'adopter ici pour plusieurs raisons: d'une part, la station météorologique des bassins-versants, sur laquelle doivent être calée les calculs d'ETP, est située assez loin des trois stations forestières, dans des conditions microclimatiques plutôt différentes; une meilleure connaissance des variations spatiales de l'ETP sur l'ensemble du périmètre étudié est d'ailleurs nécessaire à bien des égards. D'autre part, cette ETP devrait être corrigée pour prendre en compte le fait que l'on ne raisonne pas sur l'ensemble de la sphère racinaire. De plus, la R.U. des sols est, on l'a vu, connue avec une précision faible. Enfin, cette méthode offre surtout l'intérêt de travailler à un pas de temps plus fin que l'année, ce qui nous semble un peu superflu en l'état actuel de nos connaissances.

-Se servir de l'estimation réalisée sur l'interception, et des bilans hydrologiques des bassins-versants pour en déduire une lame d'eau drainante à 20cm, en répartissant le déficit d'écoulement entre ces différents compartiments (en considérant par exemple que 50% de l'évaporation dans le sol se produit dans les 20 premiers cm). Il s'agit certes d'une grossière estimation, qui a cependant l'avantage de se baser sur les termes les mieux connus (P et Q) et d'être cohérente avec la démarche adoptée pour l'évaluation des flux sous couvert. Le tableau n° 24 donne les résultats de cette estimation.

Ces approximations ne sont encore une fois qu'une hypothèse de travail, et comme on peut le voir, ils exagèrent les différences réelles entre les trois stations, qui sont d'une part la plus grande interception sous épicéas, d'autre part un prélèvement racinaire quasi nul pour la pessière malade, et, très probablement des flux hydriques à 20cm dans cet ordre: Latte > Sapine > Urfruits, qui est l'ordre inverse de la productivité de ces écosystèmes.

Le passage aux flux hydrochimiques (Tableau 25) amène un certain nombre de remarques:

-L'opposition n'apparaît plus, comme pour les apports atmosphériques, entre les deux types d'essences, feuillus et conifères, mais entre les écosystèmes "en bonne santé" et l'écosystème malade, celui-ci

| Station                  | Ca    |      | Mg    |      | K     |      | Na    |      | Cl    |      | S-SO4 |       | N-NO3 |      | N-NH4 |      | Si    |      |      |
|--------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|------|
|                          | Ss.c. | 20cm  | Ss.c. | 20cm | Ss.c. | 20cm | Ss.c. | 20cm |      |
| SAPINE BASSE<br>(Hêtres) | a     | 53,4 | 41,9  | 16,5 | 24,9  | 28,5 | 11,6  | 37,8 | 56,7  | 41,4 | 50,0  | 76,5  | 93,5  | 22,2 | 3,4   | 17,1 | 2,0   | 3,7  | 20,4 |
|                          | b     | 23,4 | 16,4  | 4,4  | 5,9   | 24,4 | 8,9   | 19,0 | 25,5  | 32,1 | 34,7  | 26,8  | 29,3  | 6,8  | 0,9   | 5,3  | 0,5   | 2,3  | 11,1 |
| URFRUITS<br>(Epicéas)    | a     | 61,5 | 48,5  | 24,2 | 31,3  | 40,8 | 9,3   | 69,7 | 57,3  | 74,1 | 49,9  | 105,5 | 91,9  | 47,4 | 8,4   | 27,1 | 2,2   | 15,3 | 38,4 |
|                          | b     | 24,3 | 18,0  | 5,8  | 7,0   | 31,5 | 6,7   | 31,6 | 24,3  | 51,8 | 32,7  | 33,3  | 27,2  | 13,1 | 2,2   | 7,6  | 5,6   | 8,5  | 19,9 |
| LATTE<br>(Epicéas)       | a     | 94,6 | 103,0 | 35,1 | 45,7  | 44,4 | 29,7  | 80,0 | 59,7  | 85,7 | 63,0  | 172,3 | 106,6 | 13,9 | 106,2 | 5,3  | 8,9   | 7,6  | 30,0 |
|                          | b     | 40,0 | 42,0  | 9,0  | 11,3  | 36,6 | 23,7  | 38,8 | 27,9  | 64,1 | 45,5  | 58,2  | 34,8  | 4,1  | 30,3  | 1,6  | 2,5   | 4,5  | 17,1 |

Tableau n°26: Comparaison des concentrations et des flux sous couvert (Ss.c.)  
et dans le sol (20cm). Cycle 87-88.

a: concentrations en microeq/l

b: flux en kg/ha.

présentant des flux presque deux fois plus forts.  
-Les flux de protons libres ou d'acidité, déduits des valeurs de pH ou de l'alcalinité, donnent des valeurs de l'ordre de 0,1 à 0,3 keq/ha/an à La Sapine et aux Urfruits, et de l'ordre de 0,5 à 0,7 keq/ha/an à la Latte. Bien qu'une forte incertitude les entache, on peut quand même remarquer que près de la moitié du flux incident semble neutralisé à ce niveau (L'évolution des concentrations des eaux liées corrobore d'ailleurs cette impression).

-La comparaison avec les flux sous couvert (tab. n°26) amène les remarques suivantes:

Les bilans dans la hêtraie sont fortement positifs (Entrées > Sorties) pour K et l'azote, impliqués dans les cycles biologiques, et un peu moins pour Ca. Ils sont négatifs pour les autres éléments. Aux Urfruits, ils sont positifs pour tous les éléments sauf le Magnésium et la Silice. A La Latte, ils sont négatifs pour Ca, Mg, N et Si, et positifs pour les autres éléments. Il convient de remarquer que ces bilans d'éléments pour l'horizon superficiel ne permettent pas de déterminer pour un élément donné s'il est véritablement accumulé ou lixivié au niveau de cet horizon, puisque l'on ne prend pas en compte les prélèvements par les racines. De plus, un point de mesure sous la litière permettrait de pousser plus loin l'interprétation. Il paraît cependant assez clair que dans les trois cas il y a appauvrissement en Mg, que les pools d'azote sont en phase de minéralisation rapide à la Latte, et que pour les autres éléments, les exportations, si elles existent, sont modérées.

Il va s'agir dans la suite de ce travail de passer de l'échelle de la station à celle du bassin versant, et de vérifier la compatibilité et la complémentarité des deux approches.

### III LES FLUX ECOULES ET LES BILANS DES BASSINS-VERSANTS

#### III.1 LES VOLUMES D'EAUX ECOULES

##### III.1.1. Rappels sur les moyens de mesure

Les exutoires des trois bassins-versants sont équipés depuis l'origine de seuils limnimétriques en "V" et de limnigraphes mécaniques à flotteur. Le passage progressif à des appareils à saisie électronique est en oeuvre depuis l'été 1988. Les courbes de tarage permettant le passage des hauteurs d'eau enregistrées aux débits ont été établies de manière empirique à partir des jaugeages expérimentaux réalisés (au micromoulinet et par dilution) en tenant compte également du modèle théorique pour ce type de déversoir et de l'évolution de la section mouillée quand la cote dépasse le haut des seuils. Ces stations font partie du réseau ARHMA du Ministère de l'Agriculture. Le détail des modes d'acquisition des données hydrologiques et des erreurs afférentes a été traité par C. DUPRAZ (1984), qui conclut à une erreur sur la lame d'eau drainée de l'ordre de 5% pour les Cloutasses et La Sapine, 10% pour La Latte, ces erreurs venant pour moitié de l'incertitude sur les volumes écoulés, et pour moitié de l'incertitude sur les superficies des bassins.

##### III.1.2 Généralités

L'étude détaillée de l'hydrologie des bassins-versant n'est certes pas de notre propos, mais il convient de rappeler les quelques faits essentiels qui nous sont connus à ce jour (DUPRAZ, 1984, GUERIN, 1987) et qui sont de nature à éclairer le comportement hydrogéochimique de nos trois systèmes.

Si l'on se souvient de ce qui a été dit du régime des pluies (chap. II.1), on ne s'étonnera pas de trouver là des torrents au régime extrêmement capricieux, pouvant passer en quelques heures d'un étiage sévère à une crue imposante. Ainsi dans le plus grand bassin (81ha), la gamme des débits mesurés va de moins de 1l/s à plus de 2000l/s. Le ruisseau drainant la hêtraie (54ha) s'est tari complètement lors de l'étiage de l'automne 85, et pourtant le module spécifique moyen est très élevé, de l'ordre de 0,5l/s/ha.

Pour comparer les trois bassins, il est nécessaire de distinguer les périodes précédant et suivant le dépérissement massif et la coupe du peuplement d'épicéas, cet événement ayant entraîné à partir du cycle 85-86 des modifications du comportement hydrologique du bassin-versant qui sont en cours d'étude, le plus flagrant étant la diminution du déficit d'écoulement (v. § suivant).

De 1981 à 1985, donc, on a pu relever les faits suivants:

- Lors des crues, le pic de ruissellement le plus accentué s'observait dans le bassin en pelouse, et le plus atténué dans la hêtraie. La récession qui sui-

vait être le plus rapide dans la hêtraie et la plus lente dans la pessière.

-De même, les étiages étaient plus lents et moins accentués sous pessière, puis sous pelouse, le tarissement n'ayant jamais été complet dans ces deux bassins.

-La part d'écoulement rapide dans la lame d'eau annuelle, calculée à partir d'une décomposition polynomiale des hydrogrammes de crues (cf. DUPRAZ, 1984) est toujours la plus élevée aux Cloutasses (Pelouse) et la plus faible à La Latte, et elle est en moyenne peu élevée (les moyennes sur 7 ans sur les trois bassins sont respectivement de 7,2%, 3,8% et 2,8%). Bien qu'il n'y ait pas identité entre cette grandeur et le ruissellement effectif sur les versants, il y a concordance entre ces données et les observations sur les propriétés hydrodynamiques des sols (chap. I.4).

Le suivi de la coupe forestière apportera sans nul doute des informations importantes sur le rôle exact de la variable "couvert végétal" dans ces différences, mais s'il semble se dessiner actuellement que ce rôle n'est pas aussi prépondérant que pouvaient le laisser entendre les premières conclusions de Dupraz (1984) (GUERIN, 87, COSANDEY, VALADAS et BERNARD-ALLEE, comm. or.), le schéma général qu'il a proposé semble toujours valable:

Le type de végétation influe sur l'hydrologie d'autant moins que les conditions deviennent plus extrêmes: en cas de très forte crue ou de sécheresse sévère, ce sont les propriétés géomorphologiques, pédologiques et hydrogéologiques qui conditionnent les réponses des différents bassins.

### III.1.3. Lames d'eau et déficit d'écoulement

L'étude des variations mensuelles des lames d'eau incidentes et écoulées (figures n° 25 à 30) permet de se faire une idée de la gestion de l'eau dans les bassins-versants. Si les courbes sont grossièrement parallèles, ce qui est normal pour de petits bassins à faibles réserves, on observe toutefois des décalages notables:

-à partir de Mai-Juin et jusqu'en Novembre, la courbe des précipitations est nettement au dessus de la courbe des débits, par suite d'une forte évapotranspiration. Les orages d'été de moyenne importance n'ont aucune influence sur les débits, ils servent essentiellement à réhumecter des sols souvent très secs.

-En période hivernale, le parallélisme des courbes peut être plus ou moins fortement affecté par la neige. Citons deux cas extrêmes: L'hiver 87-88, fortement arrosé, mais sous forme de pluie essentiellement, d'où des lames d'eau exportés très étroitement corrélées aux précipitations; Au contraire de l'hiver 85-86 où d'abondantes chutes de neiges tombant sur un sol froid et peu humide en janvier-février n'ont

Figure25:Lames d'eau mensuelles aux Cloutasses

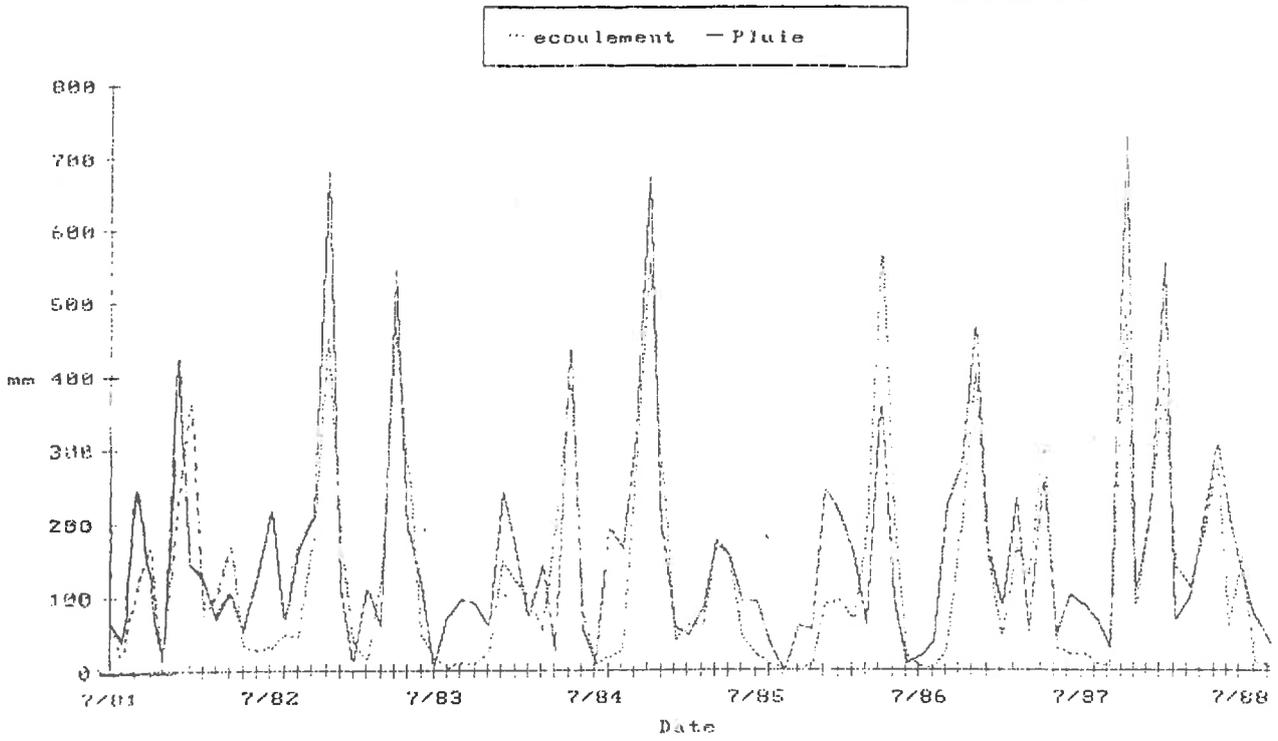


Figure26:Cloutasses:Lames d'eau moyennes mensuelles (1981-88)

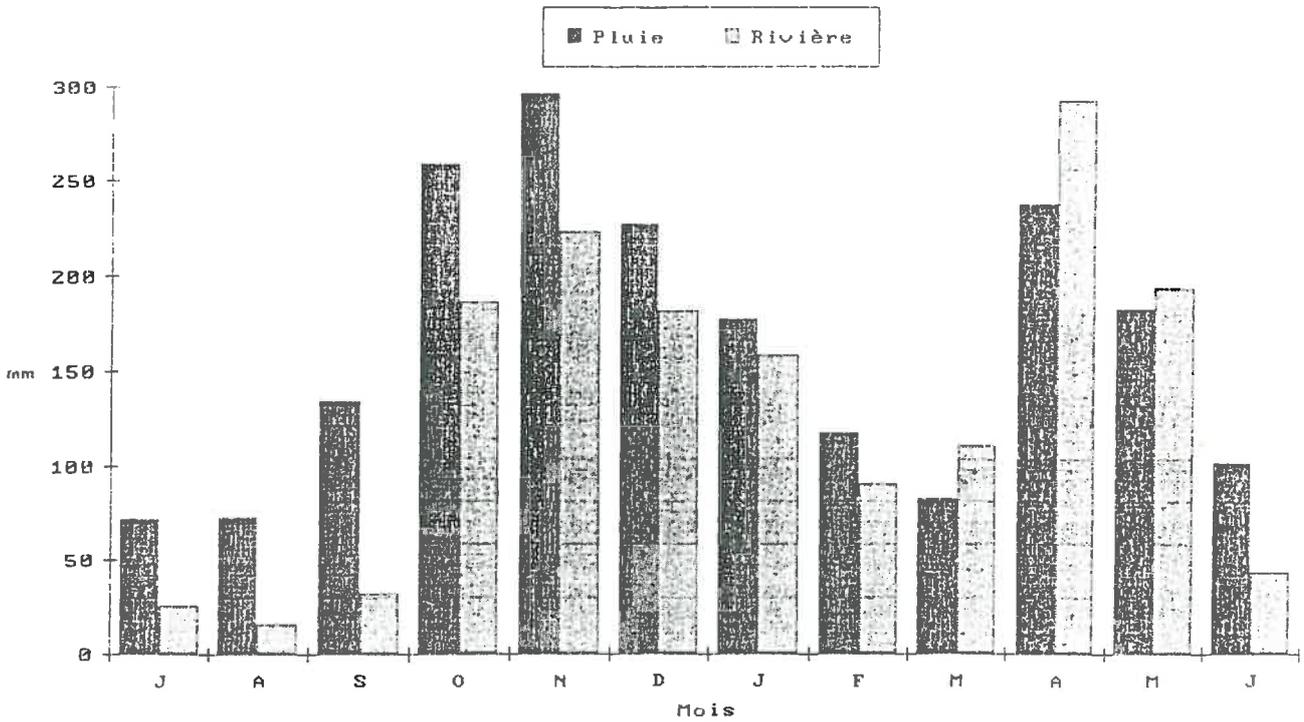


Figure 27: Lames d'eau mensuelles à La Sapine

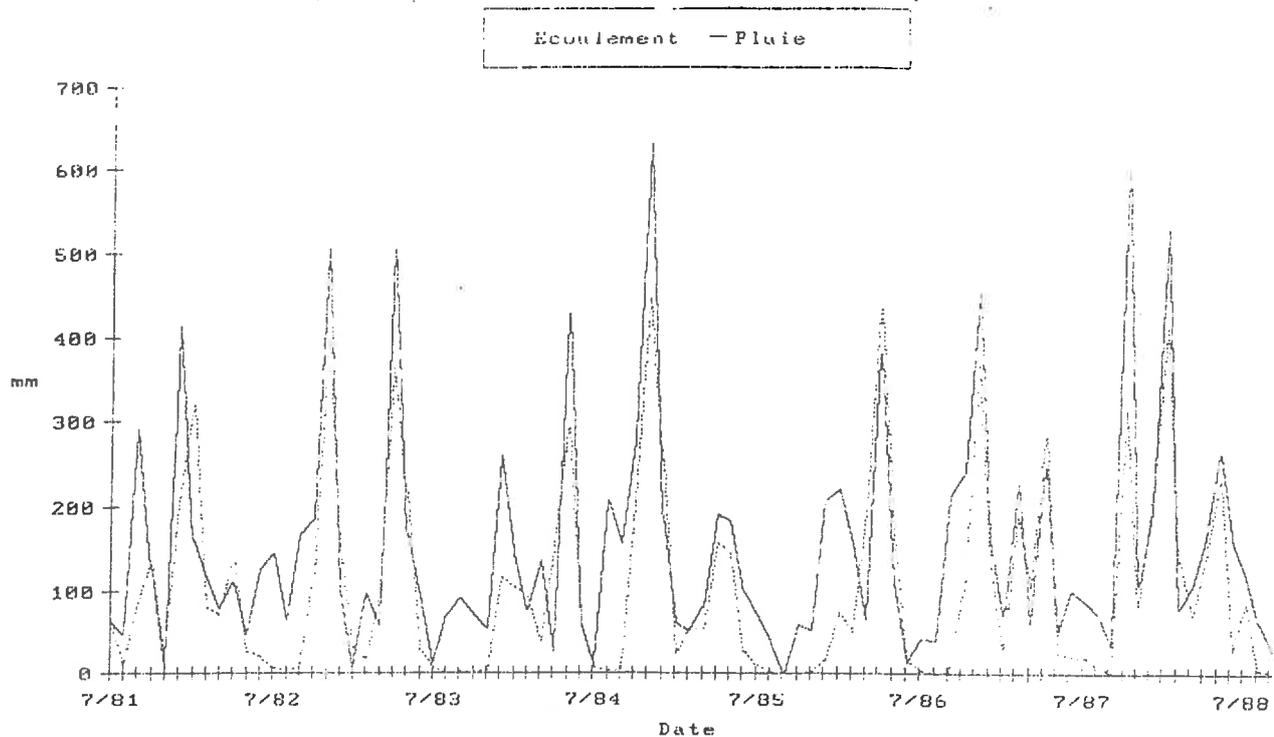


Figure 28: Sapine: Lames d'eau moyennes mensuelles (1981-88)

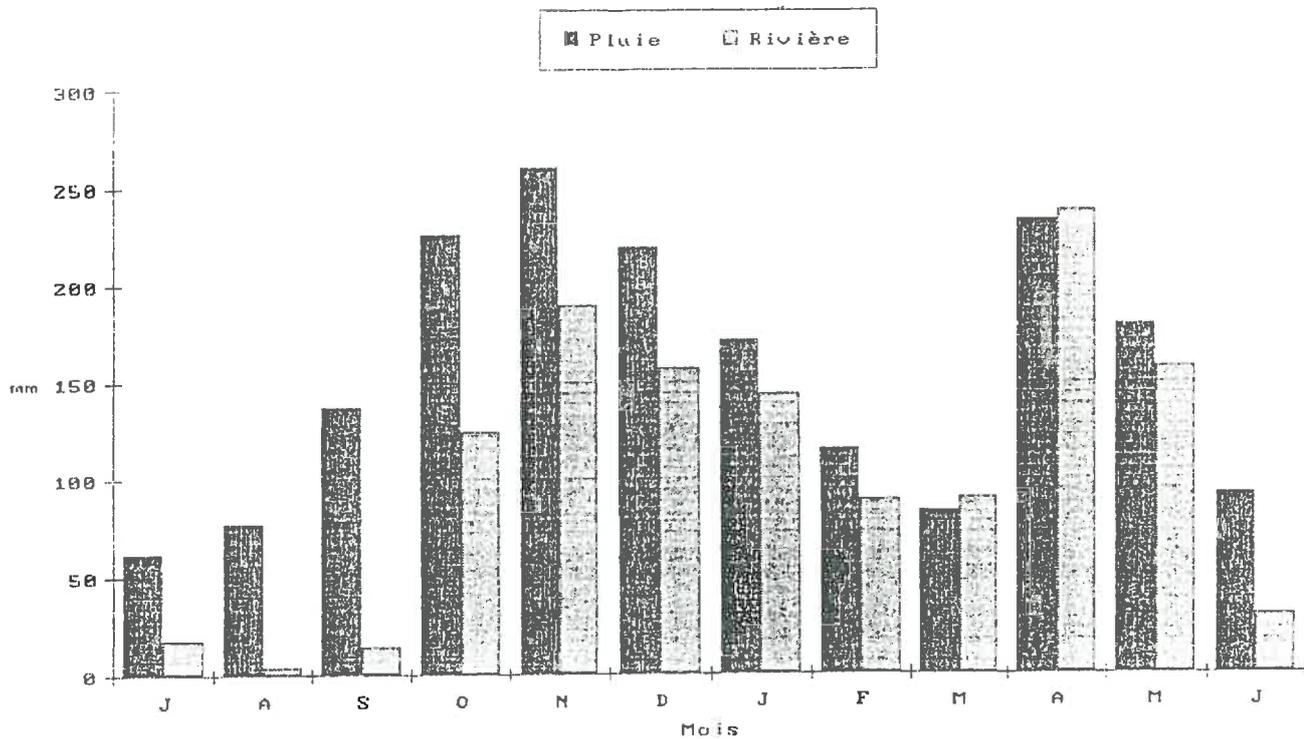


Figure 29: Lames d'eau mensuelles à La Latte

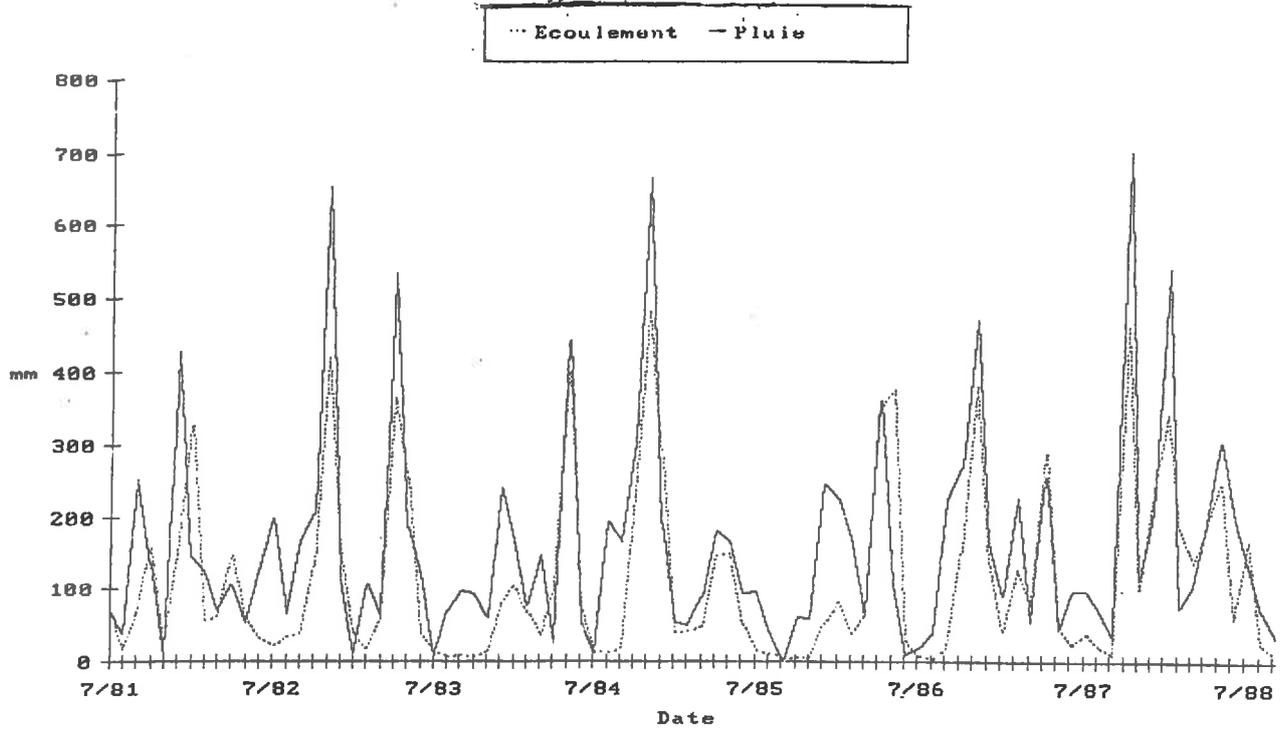
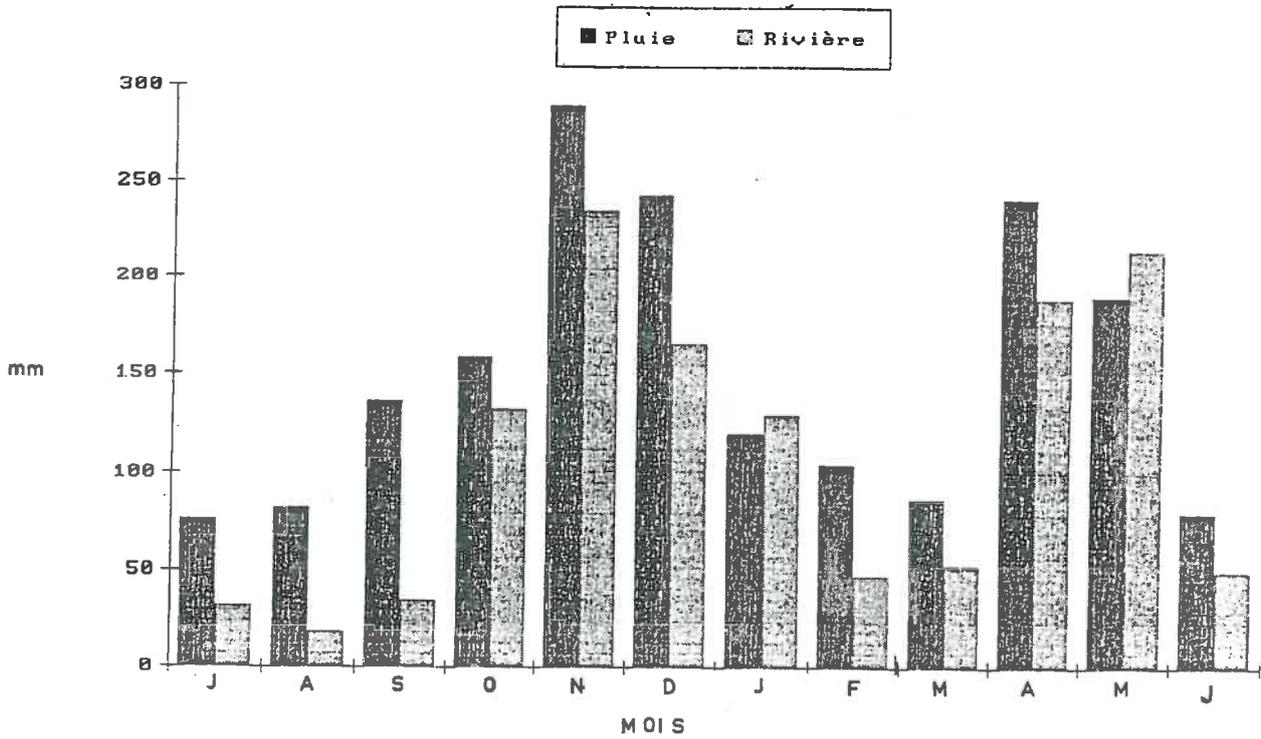


Figure 30: Latte: Lames d'eau moyennes mensuelles (1981-86)



été évacuées par les rivières qu'en avril(mai dans la pessière), selon un schéma plus typiquement montagnard.

Ces remarques un peu triviales visent à attirer l'attention sur ces altérations temporaires de la linéarité du transfert pluie/débits (v. GUERIN,1987), qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des bilans entrées-sorties au pas de temps mensuels,et qui d'autre part posent le problème de la définition du cycle hydrologique:il convient en effet de choisir des dates de début et fin de cycle où l'état des réserves hydriques est le moins différent,afin de s'affranchir de l'estimation des variations de stocks.Deux problèmes rendent ce choix délicat:

-La fluctuation des dates limites du cycle hydrologique.Ainsi la date d'observation des débits minimum a varié, sur les sept ans,entre le 3 juin et le 5 décembre (tableau 27), même si ,le plus souvent,le debit moyen mensuel le plus faible est celui du mois d'août (figures 26,28 et 30).

| Années     | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Date       | 7/9  | 3/6  | 24/8 | 22/8 | 5/12 | 18/8 | 23/9 | 29/9 |
| débit mini |      |      |      |      |      |      |      |      |

Tableau 27:dates de relevé du débit instantané minimum à la Station des Cloutasses de 1981 à 1988.

-dans ce type de milieu,le volume de la réserve drainable et de la réserve de la zone non saturée sont du même ordre de grandeur,et le niveau de remplissage de cette dernière est, comme nous l'avons vu, très peu corrélé avec le débit en été:comme le note Dupraz,la reprise des écoulements passe par une recharge des réserves de la zone non saturée et à un même débit peuvent correspondre des stocks d'eau très différents.

Pour avancer un peu plus sur cette question,nous avons calculé, pour les sept cycles,des bilans hydrologiques avec quatre limites différentes,allant du 30 juin au 30 septembre(Tableau 28). On s'aperçoit que si les moyennes sur sept ans sont sensiblement identiques,les résultats annuels peuvent diverger notablement, avec des écarts de plus de 150mm sur le déficit d'écoulement.Notons au passage que la tentation d'utiliser la moyenne de ces quatre résultats année par année n'est guère justifiée,car rien ne permet de penser qu'elle serait plus juste que l'une des quatre autres valeurs,seule l'estimation des stocks permettant de trancher.

En attendant donc une modélisation correcte des variations des réserves au pas de temps mensuel,nous continuerons donc à utiliser les limites définies à l'origine(de juillet à juillet), tout en gardant présent à l'esprit que l'estimation de l'ETR annuelle par le déficit d'écou-

|                  | CLOUTASSES (pelouse) |        |        | SAPINE (Hêtres) |        |        | LATTE (Épicéas) |        |        |       |
|------------------|----------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|-------|
|                  | Pmm                  | Qmm    | P-Q    | Pmm             | Qmm    | P-Q    | Pmm             | Qmm    | P-Q    |       |
| 81-82            | a                    | 1554,2 | 1353,7 | 200,5           | 1587,3 | 1173,6 | 413,7           | 1554,2 | 1179,7 | 374,5 |
|                  | b                    | 1699,8 | 1315,9 | 383,9           | 1666,9 | 1113,7 | 553,2           | 1681,6 | 1128,9 | 552,7 |
|                  | c                    | 1723,9 | 1349,2 | 374,7           | 1683,5 | 1109   | 574,5           | 1707,3 | 1146,6 | 560,7 |
|                  | d                    | 1636,8 | 1297,2 | 339,6           | 1557,9 | 1036,9 | 521             | 1621,3 | 1116,3 | 505   |
| 82-83            | a                    | 2474,5 | 1903,8 | 570,7           | 2098,5 | 1440,7 | 657,8           | 2415,6 | 1578,7 | 836,9 |
|                  | b                    | 2262,6 | 1889   | 373,6           | 1966,4 | 1441,5 | 524,9           | 2224,5 | 1572,1 | 652,4 |
|                  | c                    | 2271,9 | 1843   | 428,9           | 1973,7 | 1437,1 | 536,6           | 2228,6 | 1546,3 | 682,3 |
|                  | d                    | 2203,7 | 1807,2 | 396,5           | 1898,8 | 1431,2 | 467,6           | 2159,2 | 1518,5 | 640,7 |
| 83-84            | a                    | 1472,6 | 1159,7 | 312,9           | 1434,7 | 874,6  | 560,1           | 1478,2 | 921,8  | 556,4 |
|                  | b                    | 1479,4 | 1152,4 | 327             | 1434,6 | 873,5  | 561,1           | 1482,8 | 920,2  | 562,6 |
|                  | c                    | 1595,9 | 1166,8 | 429,1           | 1570,2 | 876,8  | 693,4           | 1605,9 | 924,9  | 681   |
|                  | d                    | 1664,5 | 1184   | 480,5           | 1634,1 | 882    | 752,1           | 1674,7 | 933,1  | 741,6 |
| 84-85            | a                    | 2154,3 | 1694   | 460,3           | 2137,5 | 1383,6 | 753,9           | 2161,5 | 1508,8 | 652,7 |
|                  | b                    | 2237,6 | 1705,2 | 532,4           | 2196,1 | 1385,7 | 810,4           | 2244,6 | 1510,7 | 733,9 |
|                  | c                    | 2083,2 | 1694,3 | 388,9           | 2029,1 | 1383,6 | 645,5           | 2092,2 | 1508,3 | 583,9 |
|                  | d                    | 1919   | 1669,1 | 249,9           | 1873,5 | 1377   | 496,5           | 1927,9 | 1494,5 | 433,4 |
| 85-86            | a                    | 1387,3 | 1268,4 | 118,9           | 1372   | 970,4  | 401,6           | 1418,4 | 1041,1 | 377,3 |
|                  | b                    | 1311,5 | 1252,9 | 58,6            | 1343,2 | 965    | 378,2           | 1343,8 | 1032,8 | 311   |
|                  | c                    | 1315   | 1248   | 67              | 1344   | 963,3  | 380,7           | 1344,9 | 1026,7 | 318,2 |
|                  | d                    | 1537,9 | 1272,2 | 265,7           | 1557   | 966,1  | 590,9           | 1566,1 | 1041,5 | 524,6 |
| 86-87            | a                    | 1977,6 | 1473,9 | 503,7           | 1906,1 | 1255,2 | 650,9           | 1947,4 | 1306,6 | 640,8 |
|                  | b                    | 2049,8 | 1491,4 | 558,4           | 1951,7 | 1270,7 | 681             | 2024   | 1337,1 | 686,9 |
|                  | c                    | 2080,3 | 1498,2 | 582,1           | 1982   | 1276,3 | 705,7           | 2051,6 | 1352,9 | 698,7 |
|                  | d                    | 1887,5 | 1476,8 | 410,7           | 1802,6 | 1275,3 | 527,3           | 1864,3 | 1343,7 | 520,6 |
| 87-88            | a                    | 2679,6 | 2002,6 | 677             | 2407   | 1652,4 | 754,6           | 2634,9 | 2016,3 | 618,6 |
|                  | b                    | 2721,4 | 2133,7 | 587,7           | 2436,4 | 1718   | 718,4           | 2670,2 | 2144,8 | 525,4 |
|                  | c                    | 2724,7 | 2135   | 589,7           | 2427,1 | 1717   | 710,1           | 2671,5 | 2147,8 | 523,7 |
|                  | d                    | 2731,5 | 2133,7 | 597,8           | 2422,2 | 1716,4 | 705,8           | 2672   | 2146,6 | 525,4 |
| moyenne<br>81-85 | a                    | 1913,9 | 1527,8 | 386,1           | 1814,5 | 1218,1 | 596,4           | 1902,4 | 1297,3 | 605,1 |
|                  | b                    | 1919,9 | 1515,6 | 404,2           | 1816,0 | 1203,6 | 612,4           | 1908,4 | 1283,0 | 625,4 |
|                  | c                    | 1918,7 | 1513,3 | 405,4           | 1814,1 | 1201,6 | 612,5           | 1908,5 | 1281,5 | 627,0 |
|                  | d                    | 1856,0 | 1489,4 | 366,6           | 1741,1 | 1181,8 | 559,3           | 1845,8 | 1265,6 | 580,2 |
| moyenne<br>81-88 | a                    | 1957,2 | 1550,9 | 406,3           | 1849,0 | 1250,1 | 598,9           | 1944,3 | 1364,7 | 579,6 |
|                  | b                    | 1966,0 | 1562,9 | 403,1           | 1856,5 | 1252,6 | 603,9           | 1953,1 | 1378,1 | 575,0 |
|                  | c                    | 1970,7 | 1562,1 | 408,6           | 1858,5 | 1251,9 | 606,6           | 1957,4 | 1379,1 | 578,4 |
|                  | d                    | 1940,1 | 1548,6 | 391,5           | 1820,9 | 1240,7 | 580,2           | 1926,5 | 1370,6 | 555,9 |

Tableau 28: Bilans hydrologiques des bassins-versants

- a. calcul du 1/7 au 30/6
- b. calcul du 1/8 au 30/7
- c. calcul du 1/9 au 30/8
- d. calcul du 1/10 au 30/9

lement n'a une précision satisfaisante que sur une période de référence d'au moins cinq ans.

Ces réserves formulées, on peut remarquer que jusqu'en 1985, les deux forêts présentent une ETR identique (600mm), de 200mm supérieure à celle de la pelouse. Cette différence n'est due que pour une faible part à l'évacuation plus rapide des pluies (les lames d'eau correspondant à l'écoulement rapide sont de 110mm pour la pelouse, 45mm pour la hêtraie et 35mm pour la pessière), mais surtout à une meilleure gestion des réserves en période sèche: en effet, l'écart est plus important en année sèche qu'en année humide. Il n'est que de voir l'aspect quasi steppique du bassin des Cloutasses en fin d'été pour se convaincre de la réalité de ce phénomène. Le manque d'eau estival atteint cependant toutes les formations végétales, car on peut observer que le déficit d'écoulement croît en même temps que la lame d'eau incidente (LELONG et al., 1987). Ces mêmes auteurs observent également que l'identité d'évapotranspiration des deux forêts doit être relativisée, eu égard à la différence altitudinale entre les deux bassins. Il est fort probable qu'à altitude égale, la pessière présenterait un déficit d'écoulement plus fort.

Cette dernière tendance s'inverse nettement depuis 1986, et ainsi en 1988 le déficit d'écoulement a été plus bas à La Latte que dans les deux autres bassins.

#### III.1.4 Conclusions

Avec sept années d'observations hydrologiques, on dispose d'une somme de données appréciables, bien qu'incomplètement exploitées. Il reste encore à faire la part entre le rôle joué par les différences de végétation et les différences de terrain et de sous-sol dans les comportements des trois bassins, qui restent malgré tout assez comparables. Une meilleure connaissance de l'ETR, en croisant les approches climatiques et hydrologiques, par exemple, reste une étape importante à franchir pour raisonner sur de courtes périodes. Elle permettrait en outre une estimation plus précise des réserves en eau des bassins, nécessaire pour confirmer la validité de notre approche comparative. En effet, les différences dans les bilans hydrogéochimiques ne peuvent être à coup sûr attribuées aux végétations que si le fonctionnement hydrologique est proche, en particulier au niveau des temps de séjour de l'eau dans les bassins (CLARIDGE, 1975, in DUPRAZ, 1983). Or cette variable peut être estimée par le rapport entre le volume moyen des stocks hydriques et le volume des entrées. D'après Dupraz, le temps de séjour moyen dans la nappe serait de 20 jours, et d'une quarantaine de jours dans la zone non saturée, sans différences significatives entre les trois sites. Jusqu'à plus ample informé, cette estimation restera notre hypothèse de travail.

## III.2.LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE RIVIERES

### III.2.1 Données disponibles

Les eaux de rivières des trois bassins-versants sont prélevées, à l'exutoire, depuis juillet 1981. Après une période exploratoire durant laquelle les prélèvements furent très fréquents, surtout pendant les crues (cf. DUMAZET, 1983, DUPRAZ, 1984), le pas de temps d'échantillonnage s'est progressivement espacé, jusqu'à atteindre environ la semaine, tout en restant très variable en fonction des conditions hydrologiques, conformément à la méthode de calcul de flux adoptée (v. § III.3.1). Jusqu'au printemps 86, les éléments dosés en routine étaient les suivants: Ca, Mg, K, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, Si, auxquels se sont adjoints NH<sub>4</sub>, pH et alcalinité (jusqu'alors mesurés occasionnellement), et enfin NO<sub>3</sub> (figures 31 à 33). Il convient donc de remarquer que les résultats statistiques présentés ci-après ne concernent pas forcément le même laps de temps suivant qu'ils incluent ou non les quatre derniers paramètres, ceci revêtant une importance particulière pour le bassin en épicéas, qui a subi les changements que l'on sait durant les deux dernières années.

### III.2.2 Généralités

Les eaux des trois ruisseaux sont très diluées (charge totale de l'ordre de 10mg/l), peu acides (pH voisin de 6), leur composition étant dominée par SO<sub>4</sub>, Ca, Si et Na (Figure n°34).

La variabilité des concentrations est beaucoup plus faible que dans les autres eaux étudiées (Tab. 29 à 31): les coefficients de variations se situent autour de 20% pour les éléments les plus abondants, et s'ils sont plus élevés pour les éléments en faible concentrations, il faut peut-être y voir un poids plus grand des erreurs analytiques qu'une réelle signification physique.

Comme pour les eaux de pluie et de pluviollessivats, des ajustements à des lois de distribution ont été tentés. Mais ici, aucun résultat probant n'a été obtenu. Les distributions des différentes populations sont assez proches les unes des autres, comme le montrent les valeurs des coefficients de symétrie et d'aplatissement: elles ne sont pas très dissymétriques, la branche la plus longue étant du côté des fortes valeurs (sauf pour Si). Elles sont en général unimodales, avec un mode très marqué, le reste de l'histogramme étant plutôt aplati (c'est là la principale cause des difficultés d'ajustement rencontrées). Il est vraisemblable que des techniques d'ajustement plus complexes permettront de trouver des lois satisfaisantes, de type gamma ou voisin.

Si l'on exclut le cas des eaux de La Latte en 1988, très particulières, on constate que les différences entre les trois rivières sont peu importantes, mais toutefois significatives: La pessière se distingue par des concentrations plus élevées, surtout en Calcium et en Sulfates. La propor-

Figure 31: Variations temporelles des concentrations dans la rivière des Cloutasses (pelouse) 1981-88

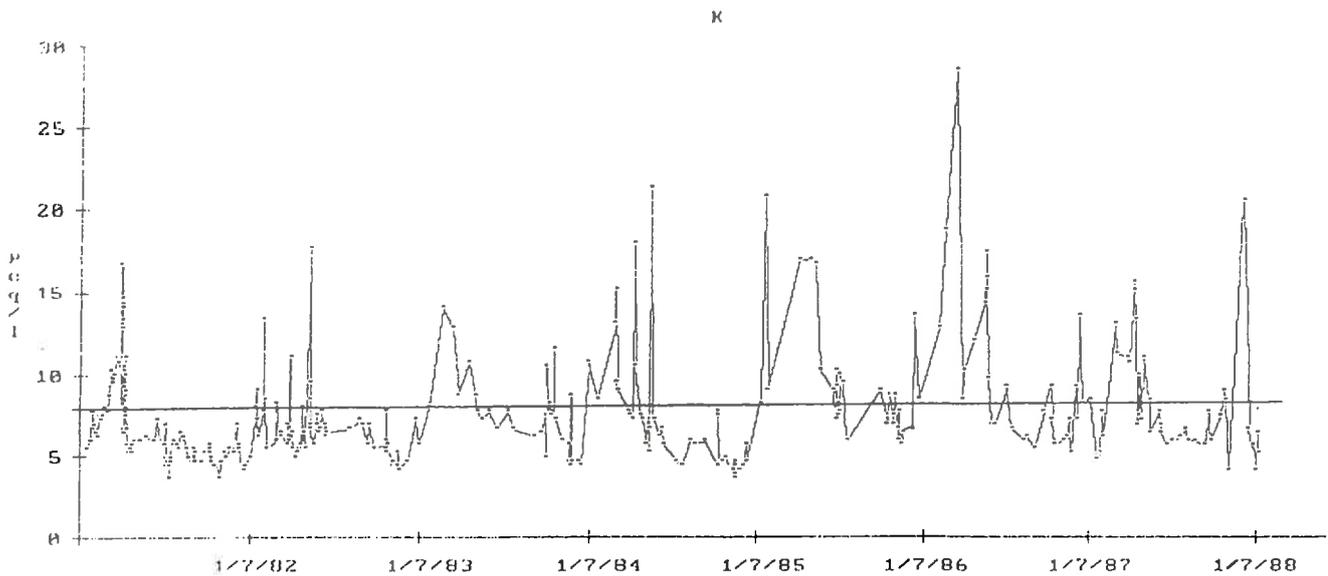
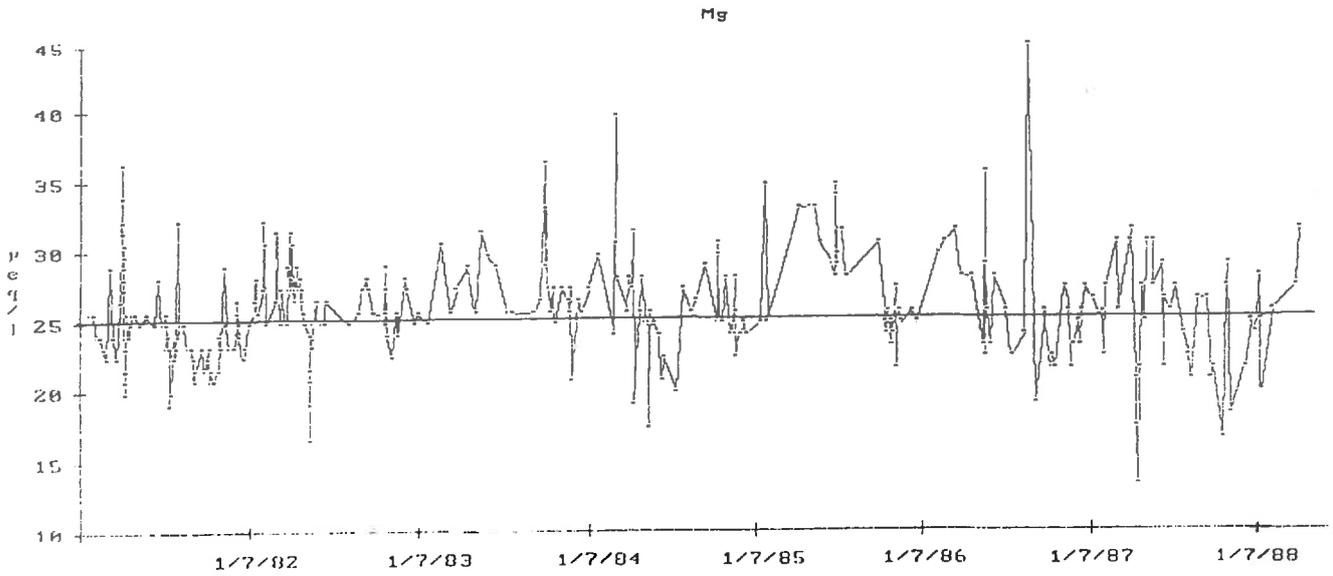
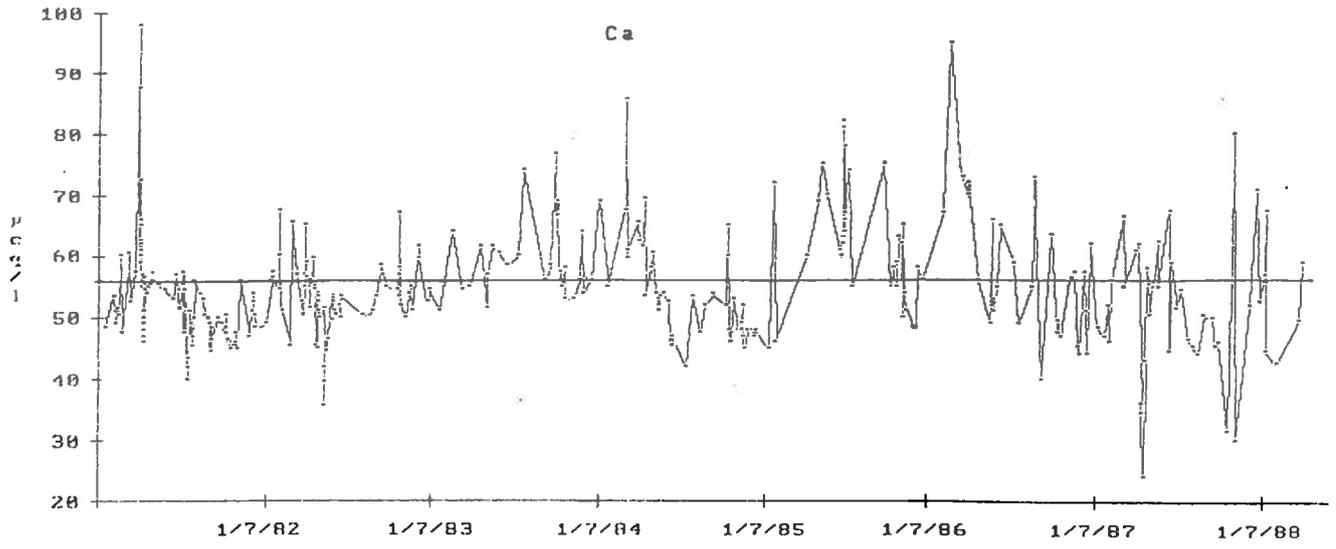


Figure 31: Variations temporelles des concentrations dans la rivière des Cloutasses (pelouse) 1981-88

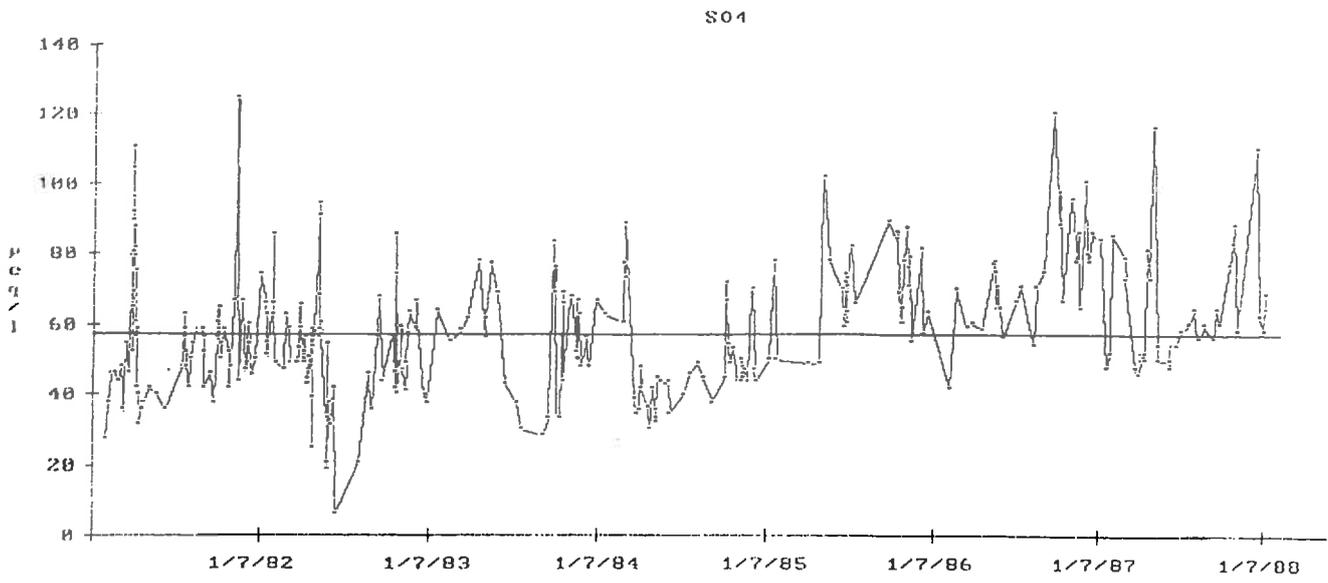
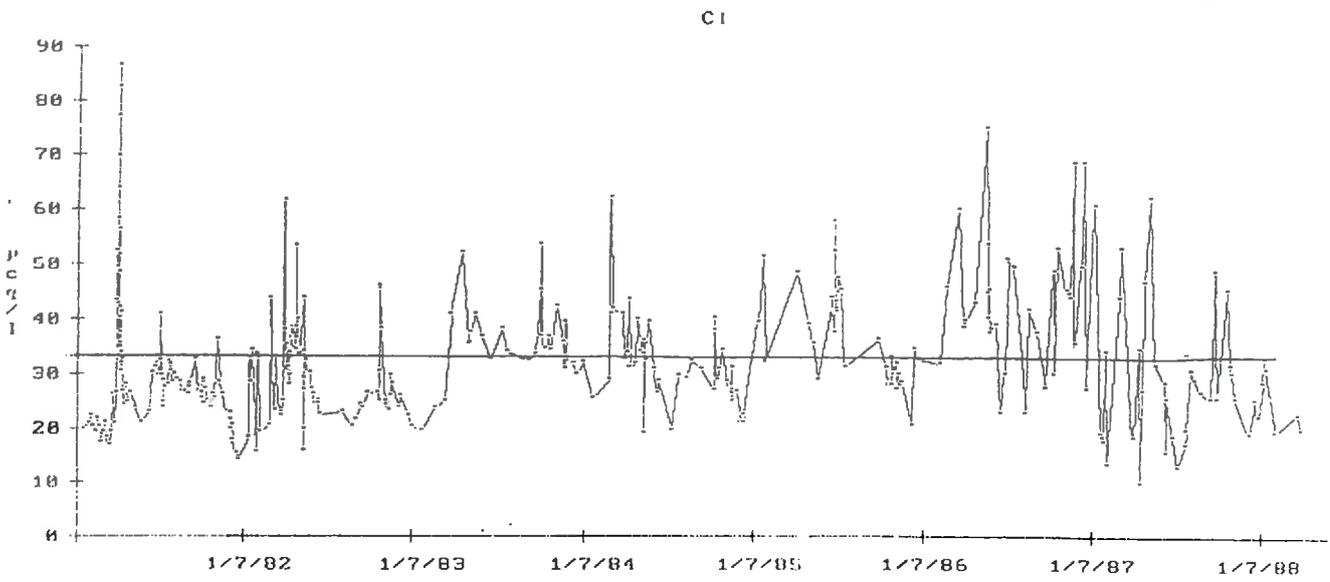
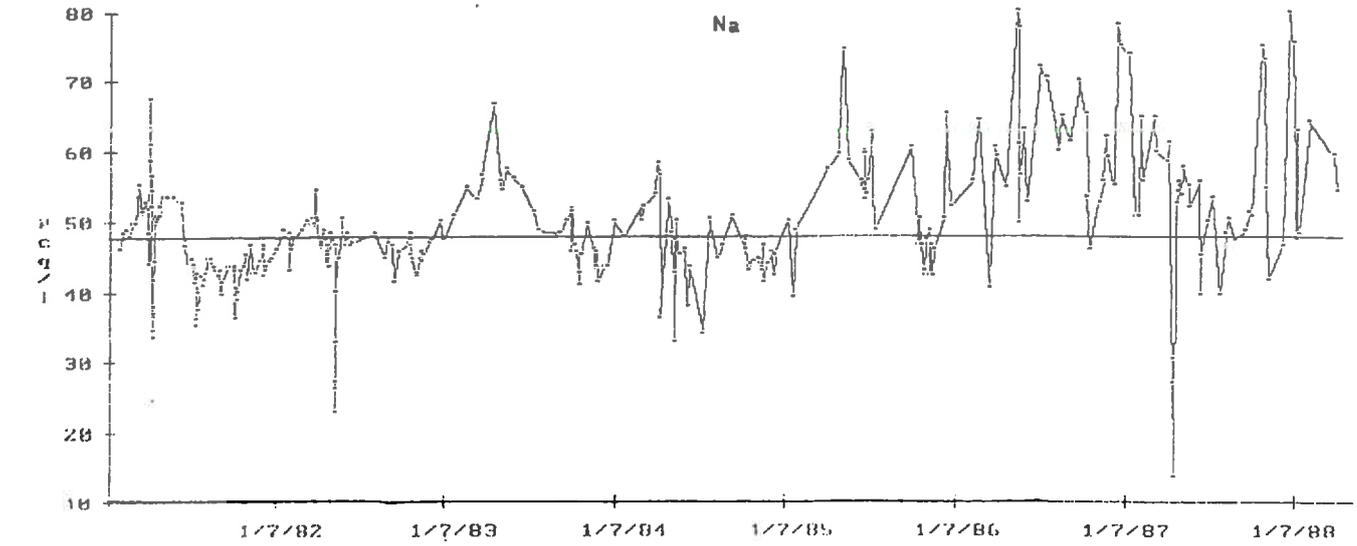


Figure 31: Variations temporelles des concentrations dans la rivière des Cloutasses (pelouse) 1981-88

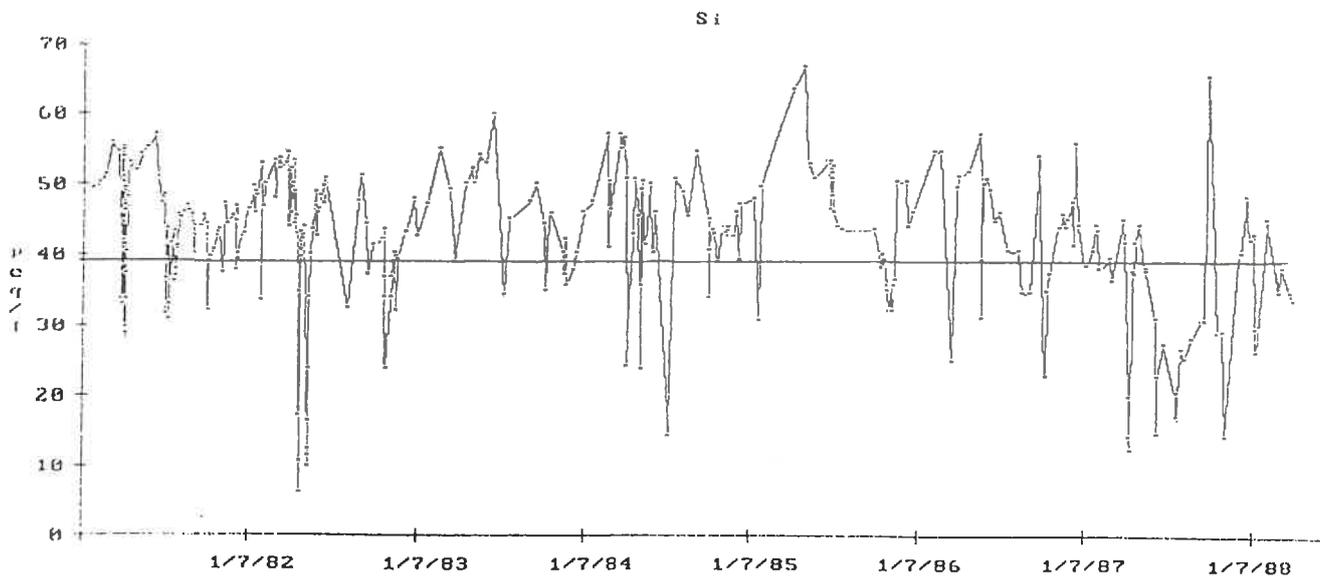
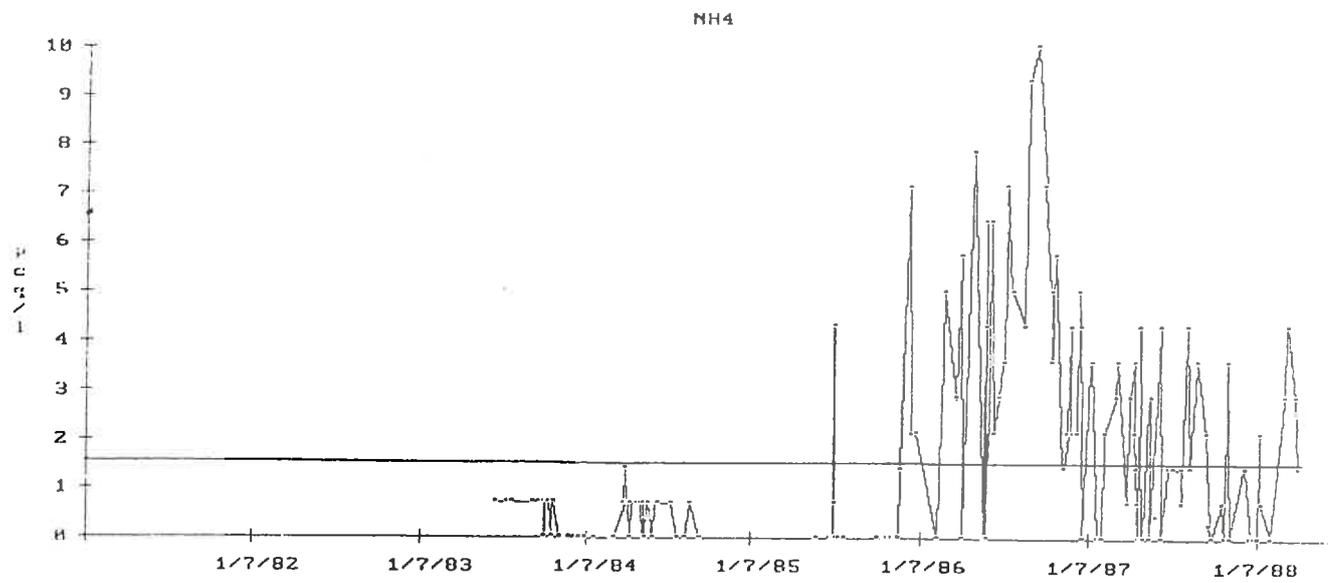
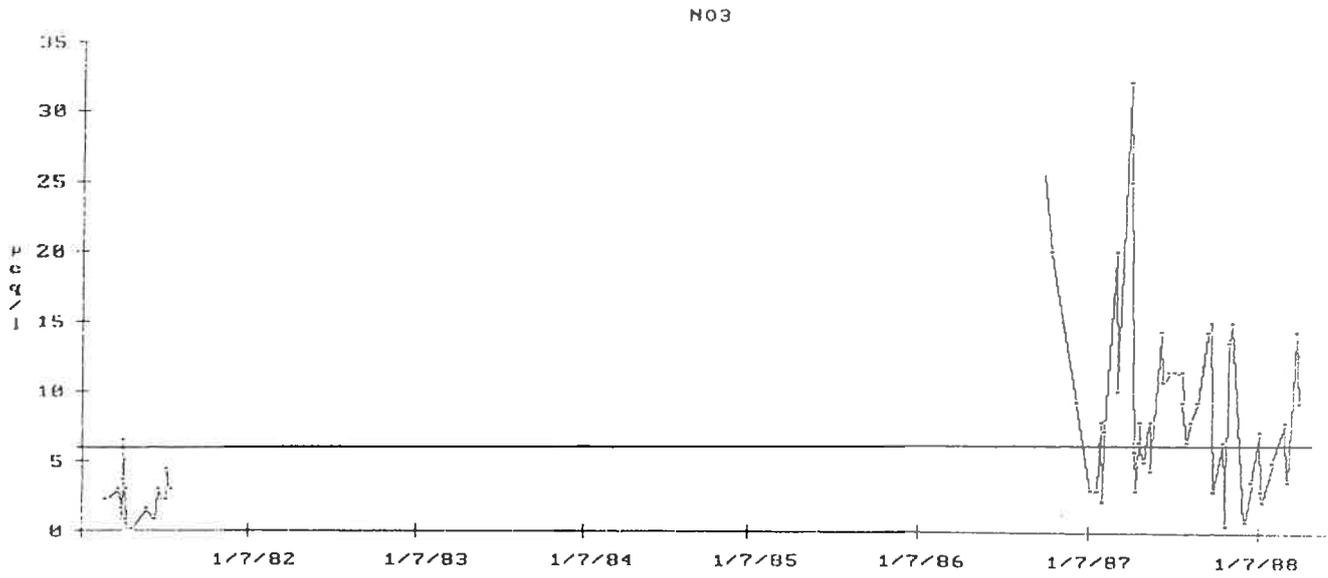


Figure 32: Variations temporelles des concentrations dans la riviere de la Sapine (hêtraie) 1981-88

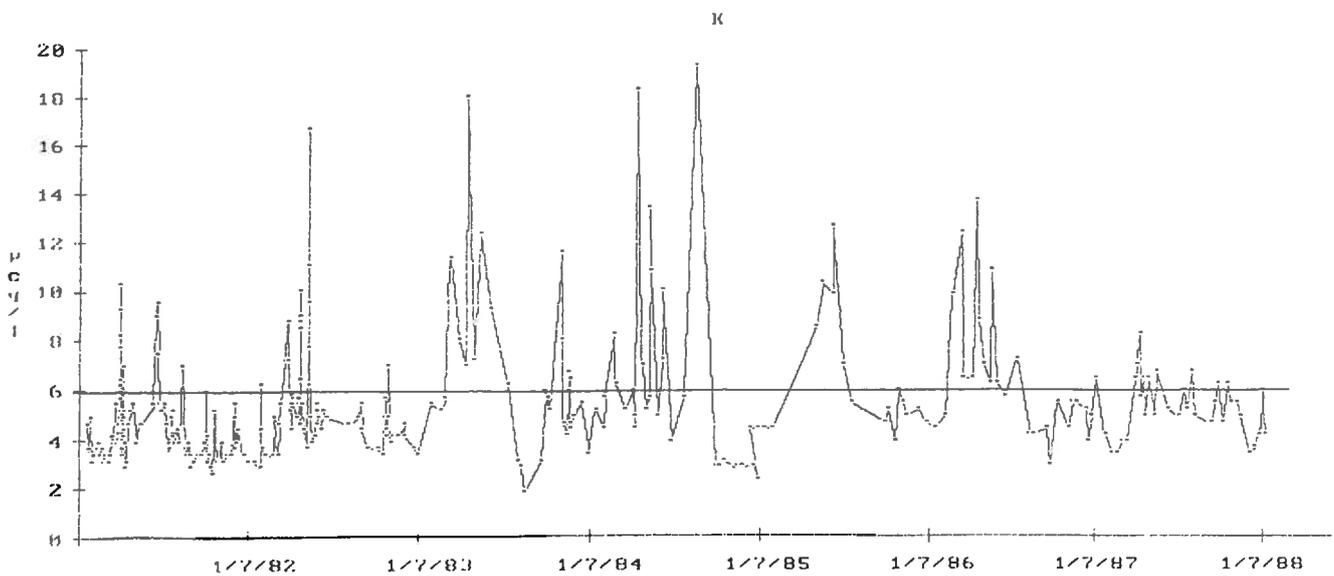
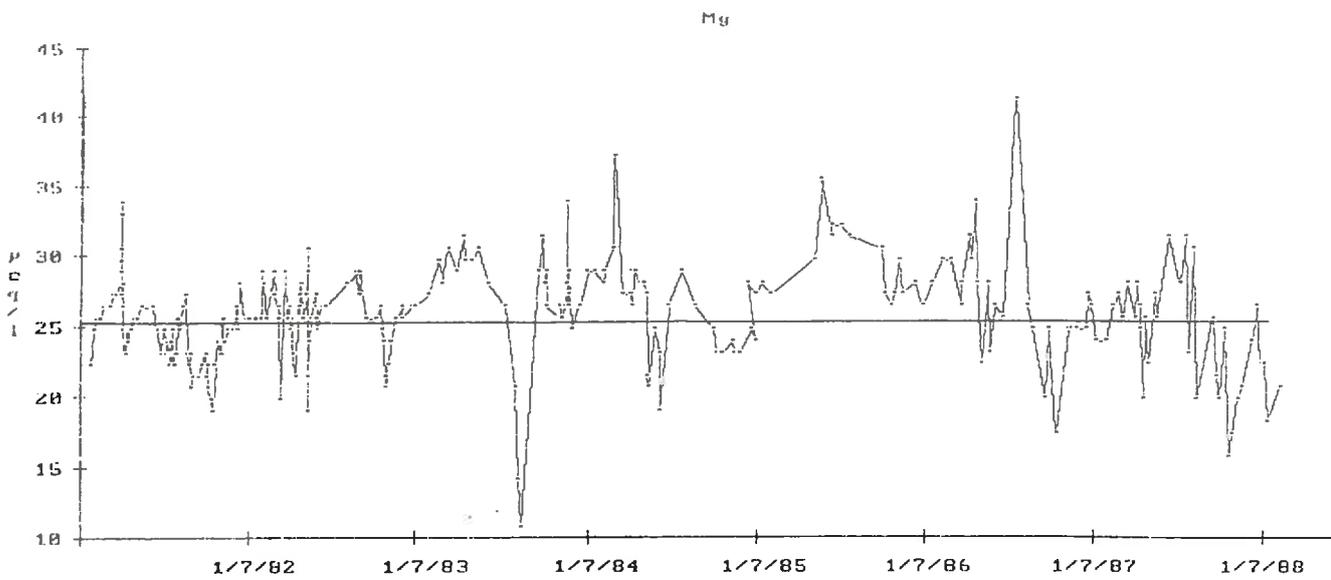
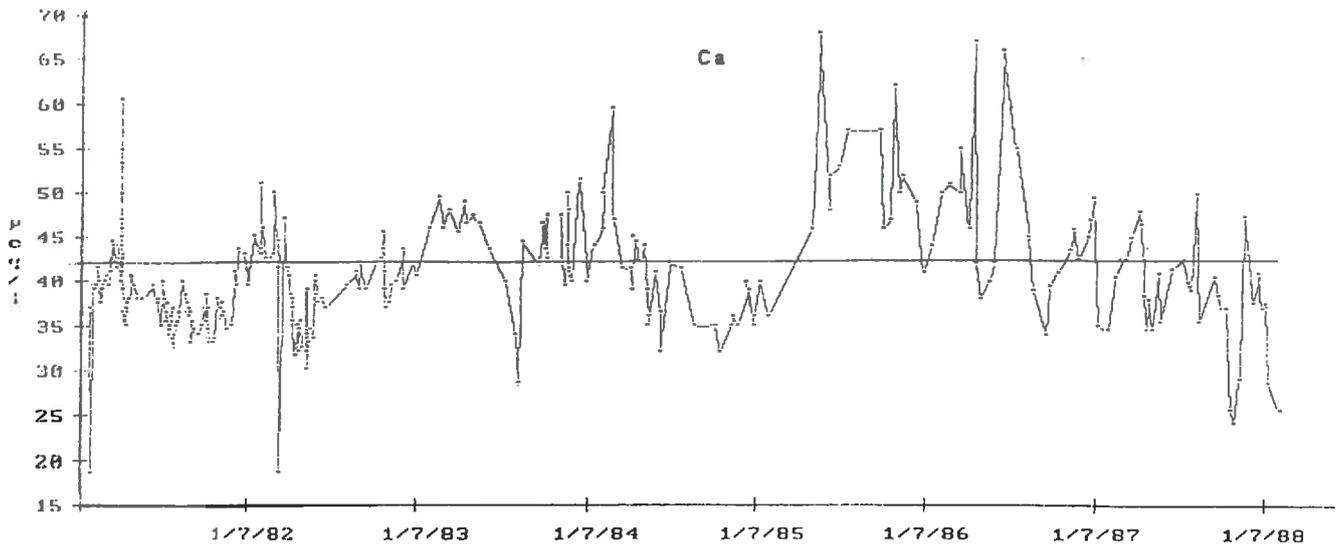


Figure 32: Variations temporelles des concentrations dans la riviere de la Sapine (h etraie) 1981-88

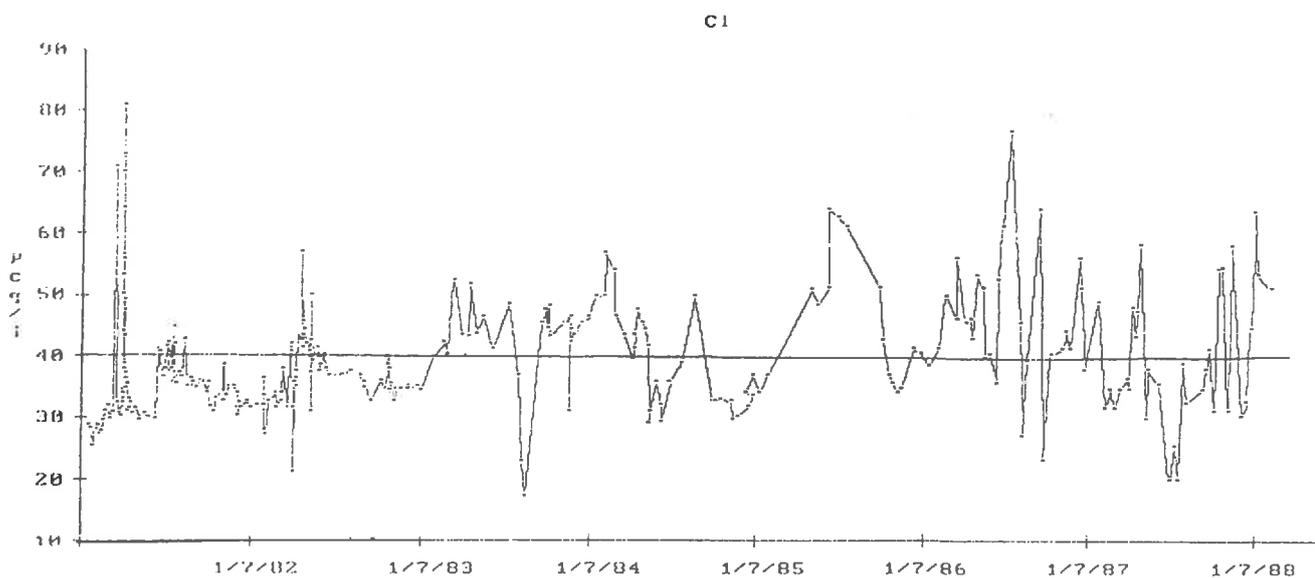
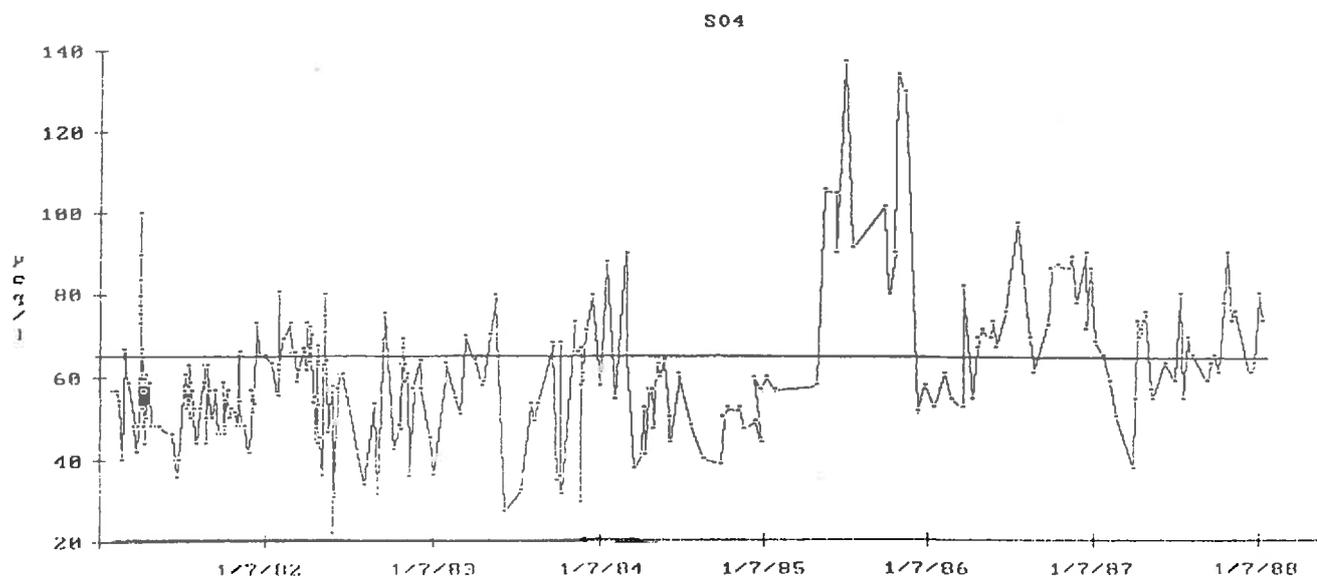
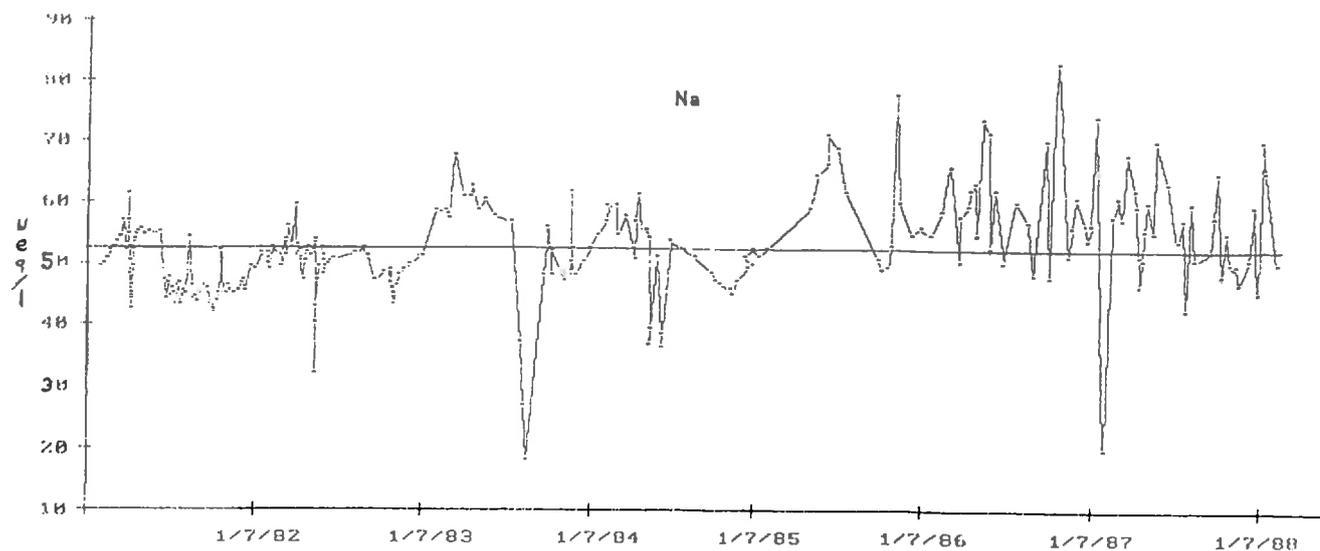
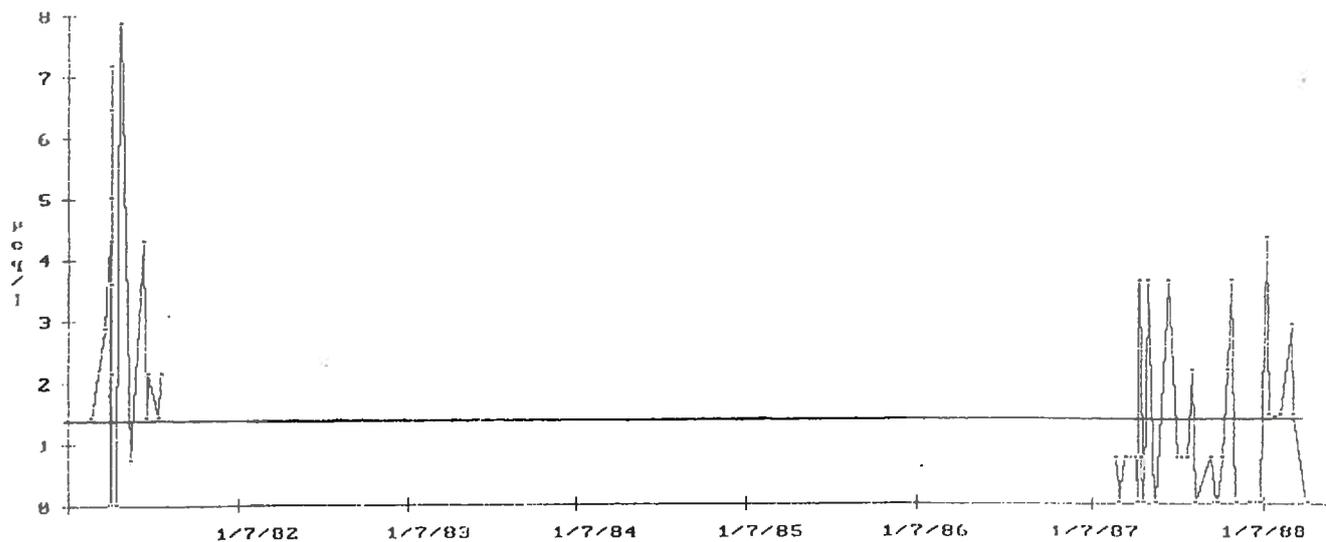
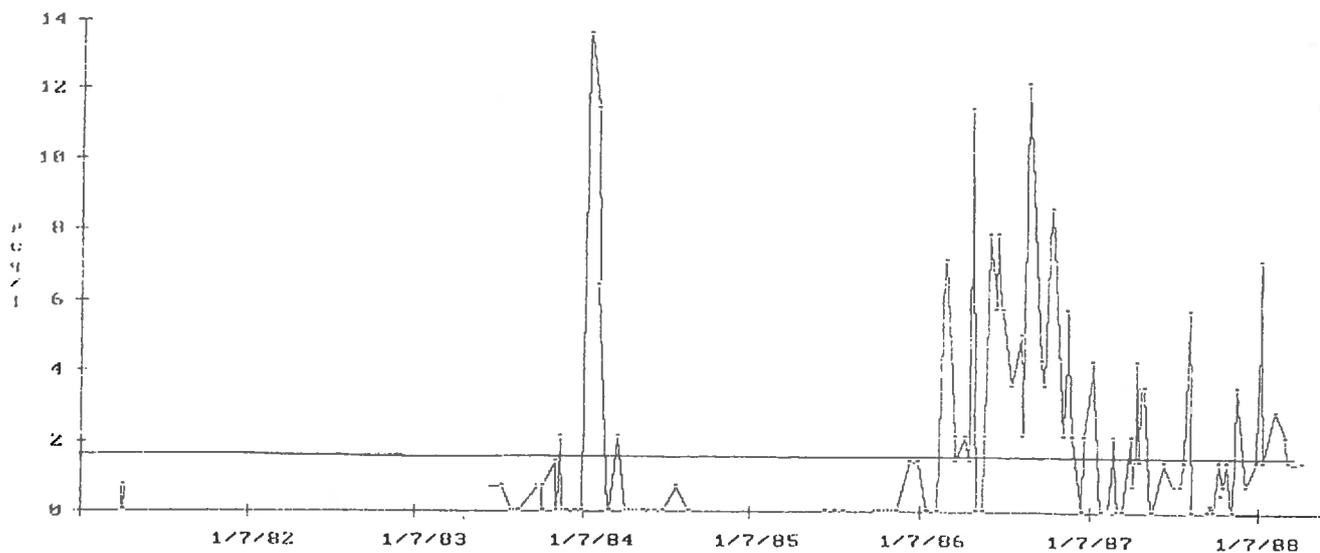


Figure 32: Variations temporelles des concentrations dans la riviere de la Sapine (hêtraie) 1981-88

NO3



NH4



Si

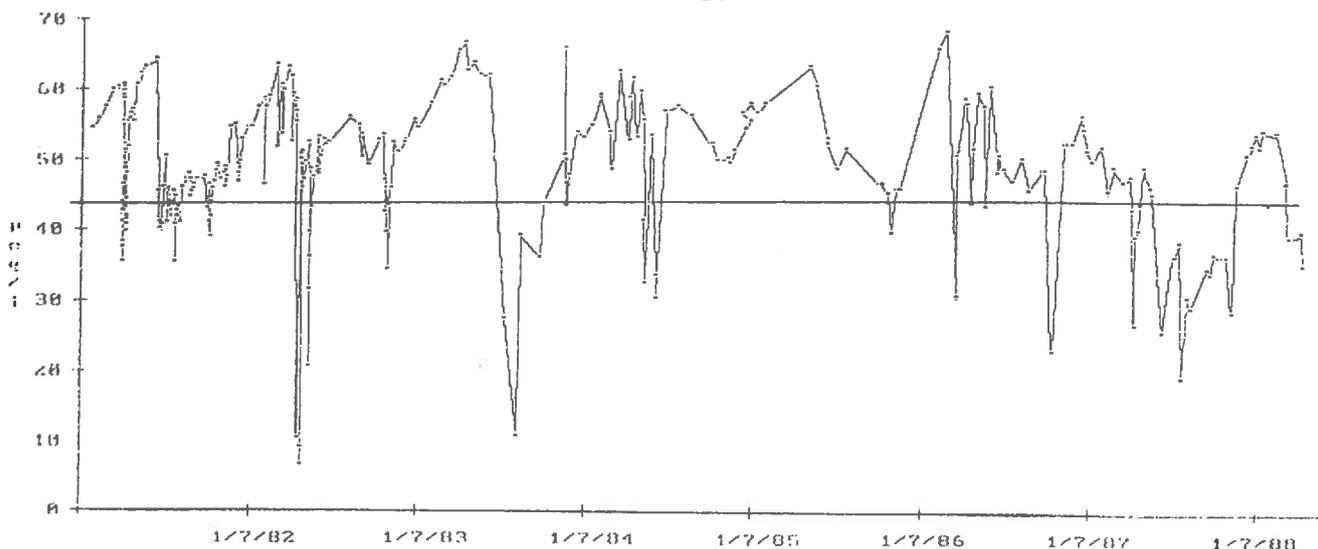


Figure 33: Variations temporelles des concentrations dans la  
de la Latte (épiceas) 1981-88

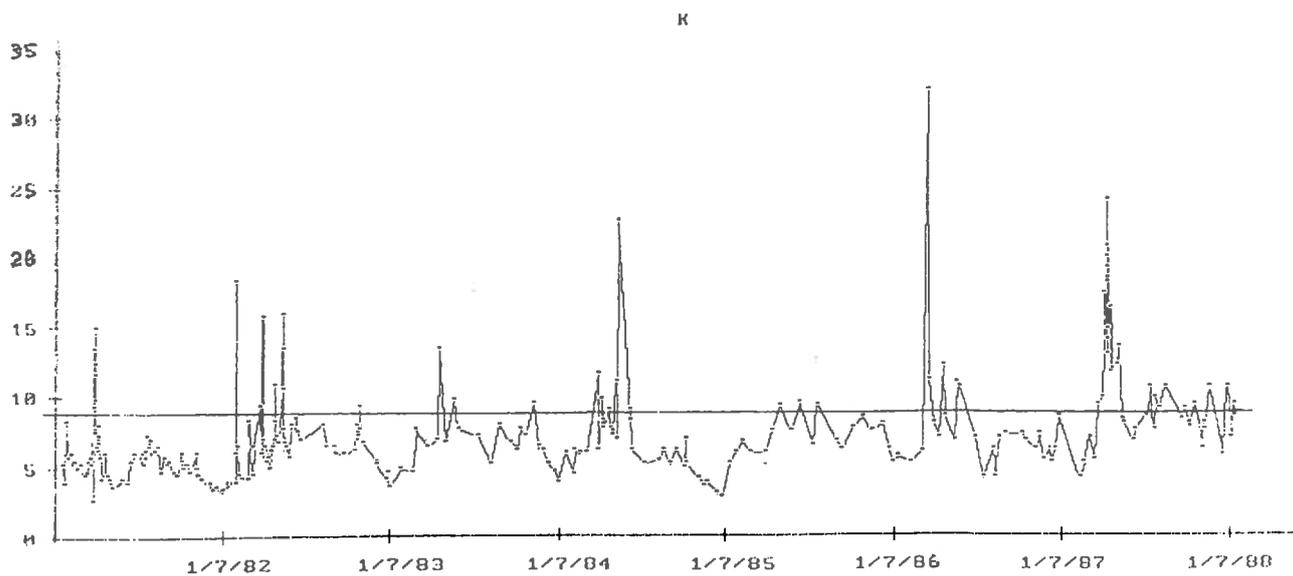
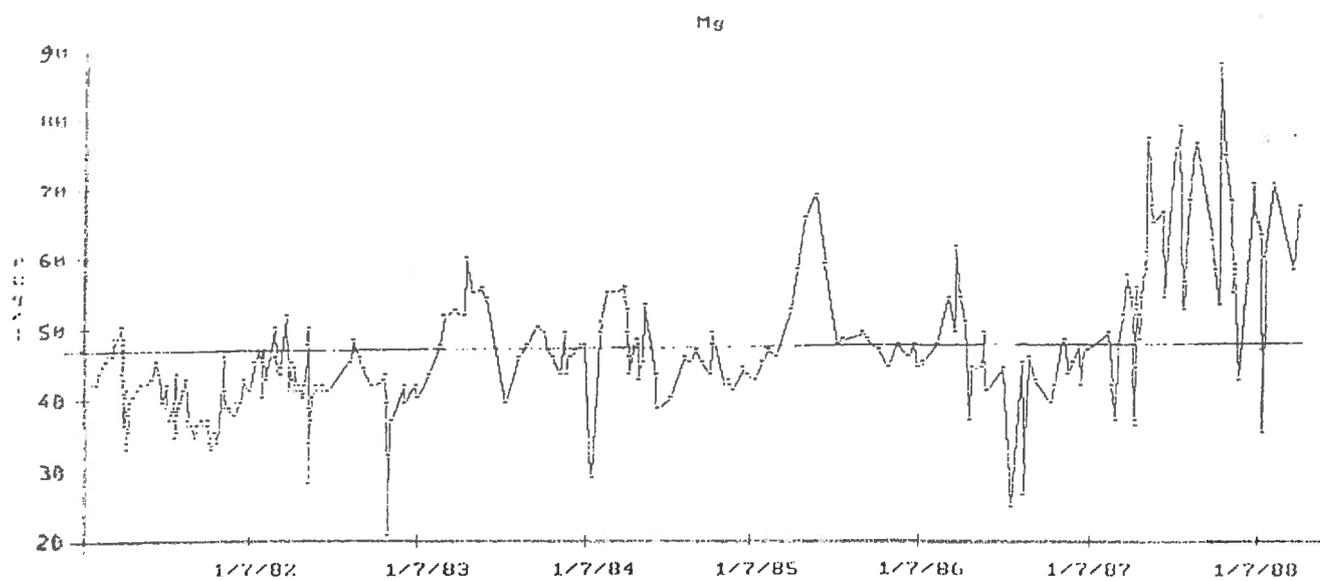
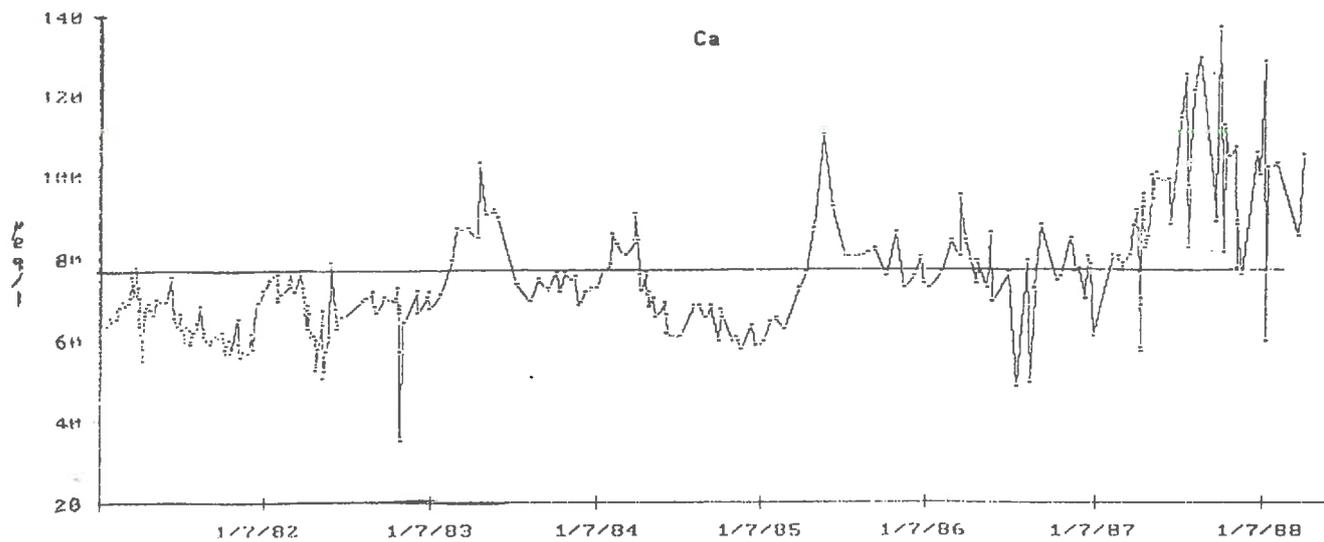


Figure 33: Variations temporelles des concentrations dans la  
de la Latte (épicéas) 1981-88

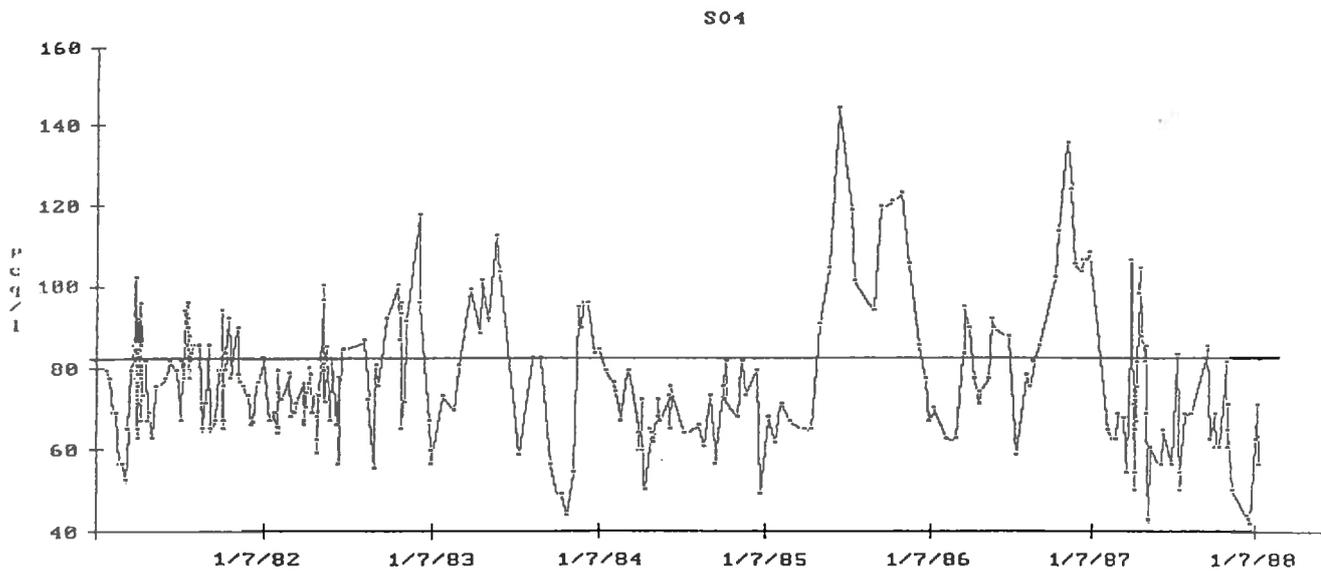
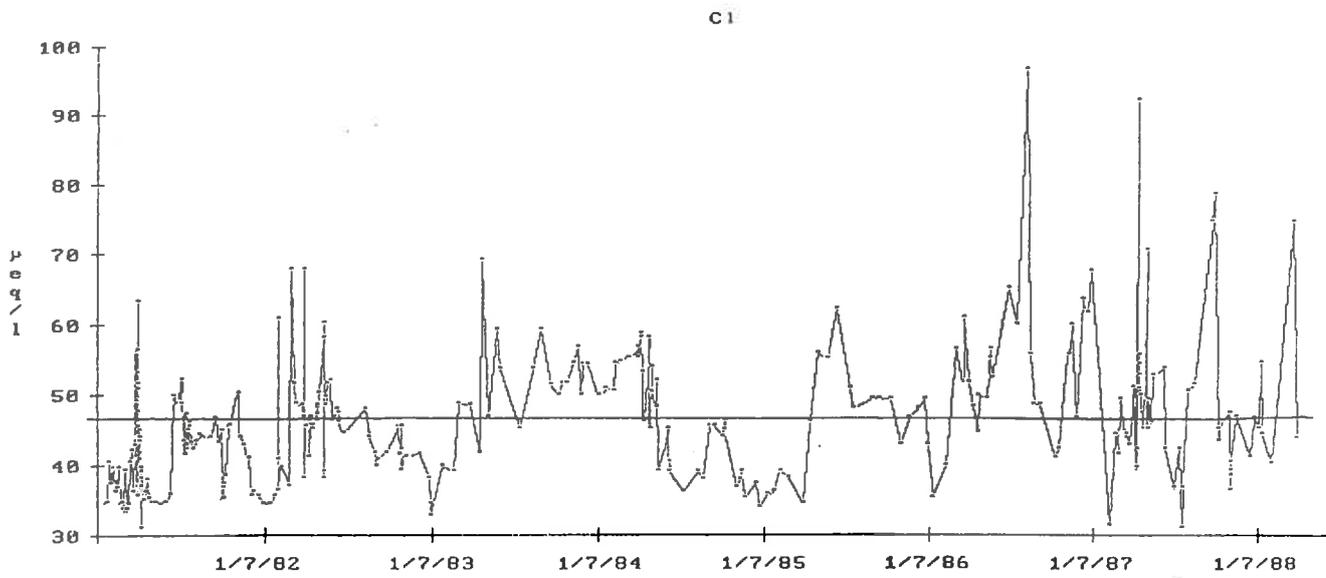
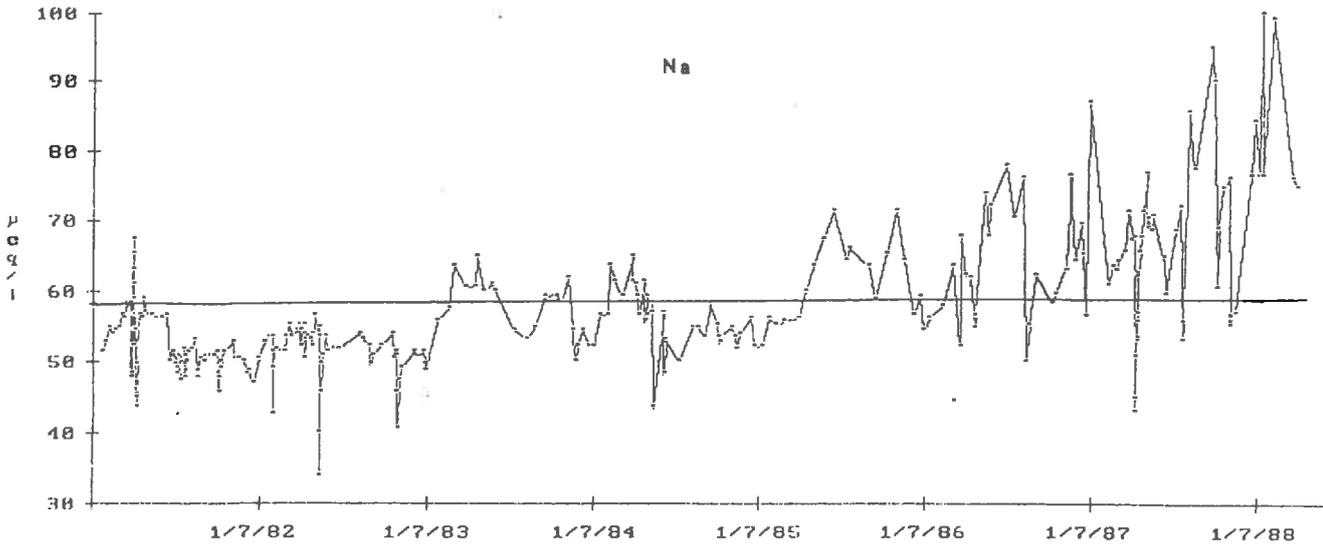
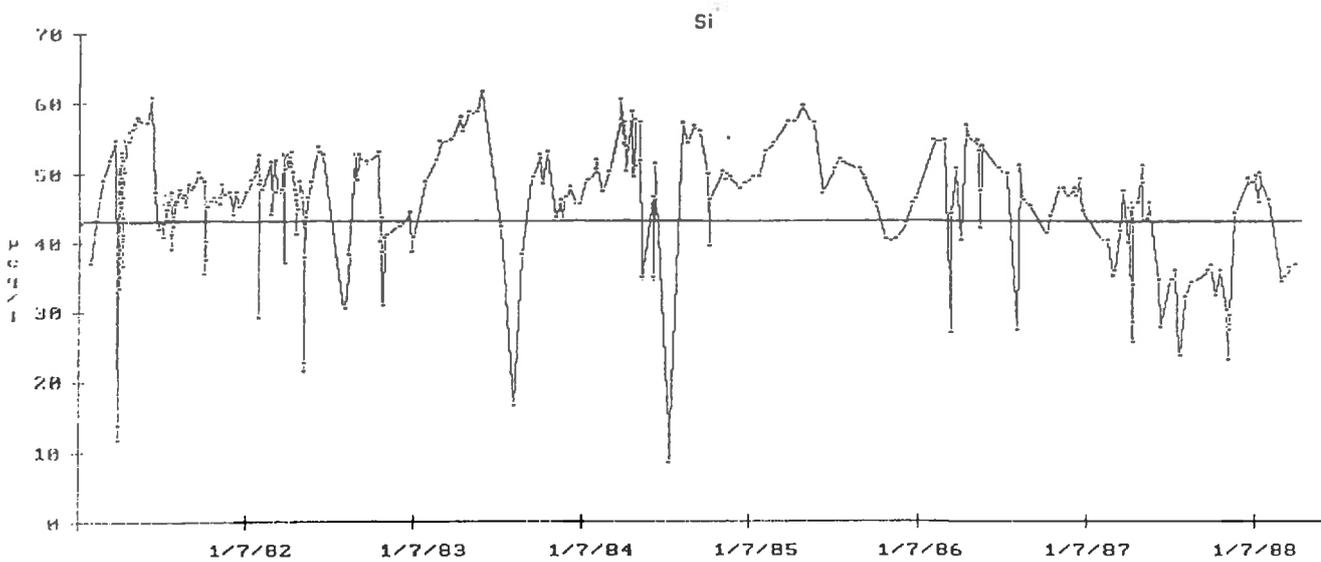
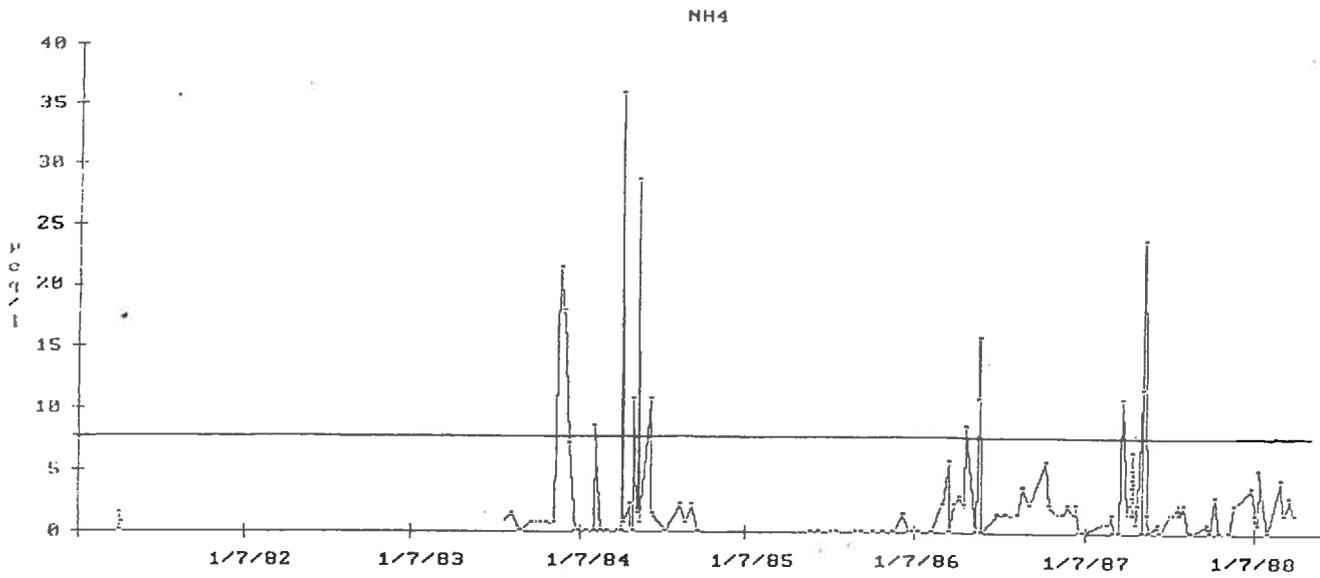
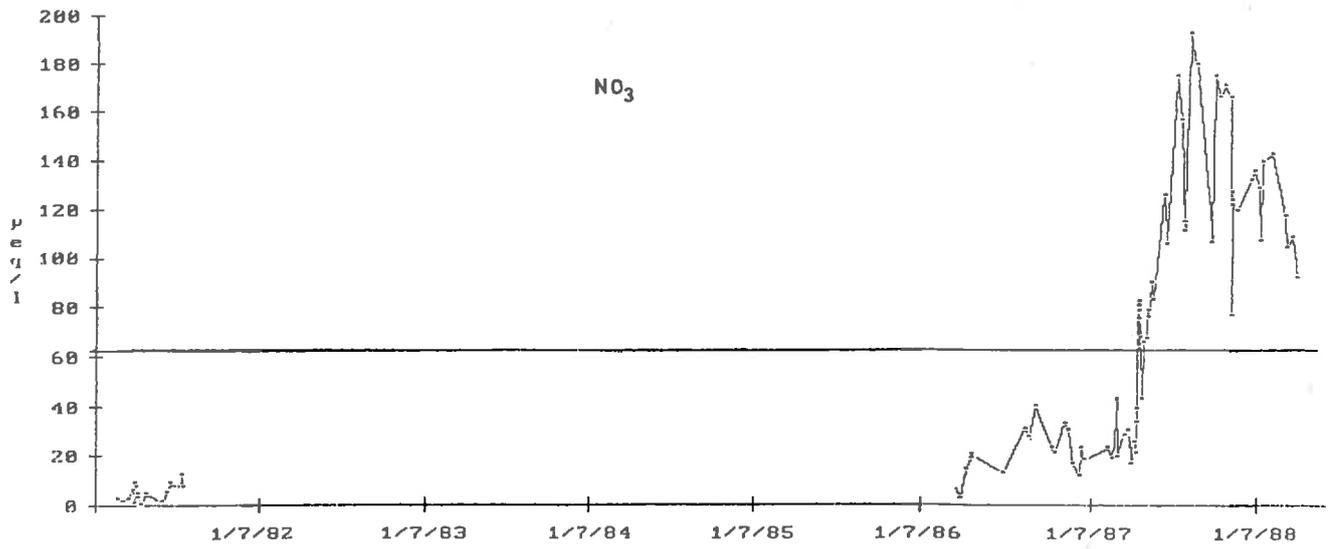


Figure 33: Variations temporelles des concentrations dans la  
de la Latte (épiceas) 1981-88



tion entre les cations est différente, Na dominant Ca dans la hêtraie, alors que c'est l'inverse dans la pessière et que dans la pelouse, ils sont en quantités voisines. Les pH sont très voisins, bien qu'il semble que les eaux de la pelouse présentent une alcalinité légèrement supérieure, cette alcalinité étant la plus faible sous hêtraie. Le dépérissement et la coupe des épicéas se traduit, comme dans les eaux du sol (cf. § II.3), par une baisse du pH et de l'alcalinité, une forte augmentation des teneurs en cations liée à la présence de nitrates dominant le cortège anionique, où les quantités de soufre et de chlore ne varient pas.

Quelques analyses d'Aluminium ont été effectuées en mai 85, indiquant des niveaux très faibles à la Sapine (moins de  $1\mu\text{moles/l}$ ) et aux Cloutasses ( $\approx 1,5\mu\text{moles/l}$ ), à peine plus élevés à La Latte ( $\approx 3,5\mu\text{moles/l}$ ).

### III.2.3 Variations des concentrations avec les débits.

Nous nous contenterons ici d'un bref résumé des faits remarquables, cette question ayant été traitée en détail par Dupraz (1984), puisqu'elle est à la base de l'élaboration du mode de calcul des flux (v. § III.3.1).

Globalement, au vu des coefficients de corrélations (Tab. 35 à 38), on constate que le débit (Q) est lié positivement à K et négativement à Si, Alcalinité, Na, Mg, et Ca (sauf dans la hêtraie pour Ca), mais pas aux anions, et ces liaisons ne sont pas très fortes.

Quand on examine les comportements crue par crue, on s'aperçoit qu'il n'existe pas de modèle unique valable, dans un bassin donné et pour un élément donné, pour toutes les crues, bien au contraire. Non seulement on peut avoir d'une crue à l'autre, des comportements opposés, mais lors d'une même crue on observe des phénomènes d'hystérésis ou des comportements plus ou moins erratiques. Cela s'explique à la fois par la forte influence du signal entrée "concentration des pluies" sur les concentrations en crue, signal éminemment variable, mais aussi sur la multiplicité des situations et des dynamiques possibles avant et pendant la crue, desquelles il résulte des proportions différentes des composantes du mélange que représente les eaux de crues (ruissellement, eaux du sol, eaux de nappe). Pour avancer dans la compréhension de ces phénomènes, il faudrait procéder à une décomposition hydrochimique des écoulements de crues, par exemple par traçage aux isotopes naturels (LOYE-PILLOT, 88, DRAY et FERHI, comm. or.).

Nous examineront dans la partie suivante l'évolution des concentrations lors des étiages.

### III.2.4 Variations temporelles et saisonnières

Ici encore, nous avons à traiter des séries chronologiques à pas de temps variables ne se prêtant guère aux analyses statistiques complexes. La simple observation des graphes de concentrations mesurées en fonction du temps (fig. 31 à 33) apporte néanmoins une foule d'informations, parmi

|   | H+   | Alc.  | Ca   | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO4   | NO3  | NH4   | Si    |
|---|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| n   | 92   | 108   | 353  | 364  | 374  | 364  | 376  | 345   | 71   | 152   | 355   |
| Moy. arithm.                              | 0,9  | 33,4  | 54,8 | 25,8 | 7,5  | 48,9 | 32,4 | 58,7  | 6,9  | 1,5   | 42,3  |
| Moy. pond.                                | 1,7  | 25,0  | 55,8 | 25,1 | 8,1  | 47,7 | 32,9 | 58,7  | 6,0  | 0,2   | 39,2  |
| écart-type                                | 0,6  | 14,9  | 9    | 3,7  | 3,3  | 8,6  | 11,4 | 18    | 6,5  | 2,1   | 9,7   |
| mini                                      | 0,1  | 0,7   | 24   | 13,2 | 3,6  | 13,5 | 9,9  | 6,2   | 0    | 0     | 6,1   |
| maxi                                      | 3,9  | 65    | 97,8 | 44,4 | 28,4 | 87   | 86,3 | 124,9 | 32,1 | 10    | 66,8  |
| coef. de var.<br>( $\sigma$ /moy. ar.)(%) | 66%  | 45%   | 16%  | 14%  | 43%  | 18%  | 35%  | 31%   | 94%  | 139%  | 23%   |
| coef. symétrie                            | 2,71 | 0,18  | 1,00 | 0,59 | 2,22 | 0,70 | 1,40 | 0,55  | 1,97 | 3,36  | -1,03 |
| coef. d'aplat.                            | 9,54 | -0,65 | 3,33 | 2,24 | 6,77 | 3,41 | 3,01 | 0,84  | 4,56 | 18,32 | 1,63  |

Tableau 29 :Composition chimique de la rivière des Cloutasses:Description statistique de la population d'échantillons étudiée,récoltée entre 1981 et 88 concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

|   | H+   | Alc. | Ca   | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO4   | NO3  | NH4  | Si    |
|---|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| n   | 70   | 85   | 326  | 317  | 326  | 317  | 328  | 305   | 61   | 128  | 304   |
| Moy. arithm.                              | 1,1  | 20,9 | 40,3 | 25,6 | 5,3  | 51,8 | 39,1 | 60,5  | 1,8  | 1,7  | 48,7  |
| Moy. pond.                                | 1,5  | 17,9 | 41,2 | 25,4 | 5,9  | 51,8 | 39,9 | 65,6  | 1,3  | 1,8  | 43,9  |
| écart-type                                | 0,5  | 12,8 | 6,5  | 3,4  | 2,5  | 8,3  | 9,1  | 16    | 2,1  | 2,7  | 9,7   |
| mini                                      | 0,2  | -9,1 | 18,5 | 10,7 | 1,8  | 17,8 | 16,9 | 21,9  | 0    | 0    | 6,4   |
| maxi                                      | 2,5  | 60,7 | 67,9 | 41,1 | 19,2 | 82,6 | 80,7 | 136,4 | 7,9  | 13,6 | 68,9  |
| coef. de var.<br>( $\sigma$ /moy. ar.)(%) | 43%  | 61%  | 16%  | 14%  | 47%  | 16%  | 23%  | 26%   | 115% | 165% | 20%   |
| coef. symétrie                            | 0,75 | 0,56 | 0,88 | 0,01 | 2,54 | 0,59 | 1,17 | 1,36  | 1,32 | 2,33 | -1,20 |
| coef. d'aplat.                            | 0,40 | 1,24 | 3,18 | 2,63 | 8,88 | 3,12 | 2,37 | 4,56  | 1,09 | 5,56 | 3,03  |

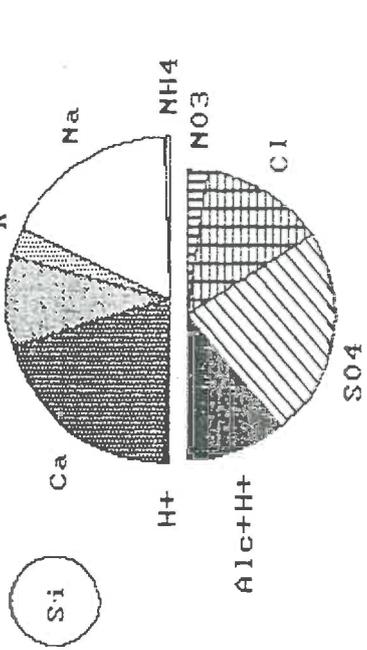
Tableau 30 :Composition chimique de la rivière de La Sapine:Description statistique de la population d'échantillons étudiée,récoltée entre 1981 et 88 concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

|   | H+   | Alc.  | Ca    | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO4   | NO3   | NH4   | Si    |
|---|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| n   | 86   | 97    | 329   | 320  | 327  | 318  | 324  | 313   | 94    | 140   | 315   |
| Moy. arithm.                              | 1,25 | 25    | 71,9  | 45,6 | 7,2  | 56,9 | 45,7 | 76,5  | 58,9  | 2,8   | 45,4  |
| Moy. pond.                                | 1,9  | 16,3  | 77,2  | 46,8 | 8,5  | 58,4 | 46,6 | 82,1  | 63    | 7,7   | 42,7  |
| écart-type                                | 0,8  | 18,6  | 14,2  | 9,1  | 3,2  | 8,7  | 8,3  | 15,7  | 55,7  | 5,5   | 8,5   |
| mini                                      | 0,2  | -5,3  | 34,4  | 20,6 | 2,6  | 33,9 | 31   | 41,6  | 0     | 0     | 8,2   |
| maxi                                      | 3,8  | 71    | 136,7 | 88   | 23,8 | 99,1 | 78,4 | 143,7 | 192,9 | 35,7  | 70    |
| coef. de var.<br>( $\sigma$ /moy. ar.)(%) | 68%  | 74%   | 20%   | 20%  | 44%  | 15%  | 18%  | 21%   | 95%   | 196%  | 19%   |
| coef. symétrie                            | 1,25 | 0,58  | 1,43  | 1,29 | 2,27 | 1,33 | 0,92 | 0,82  | 0,75  | 4,22  | -1,13 |
| coef. d'aplat.                            | 1,08 | -0,59 | 1,07  | 2,97 | 6,59 | 2,66 | 1,23 | 1,55  | -0,71 | 21,50 | 2,53  |

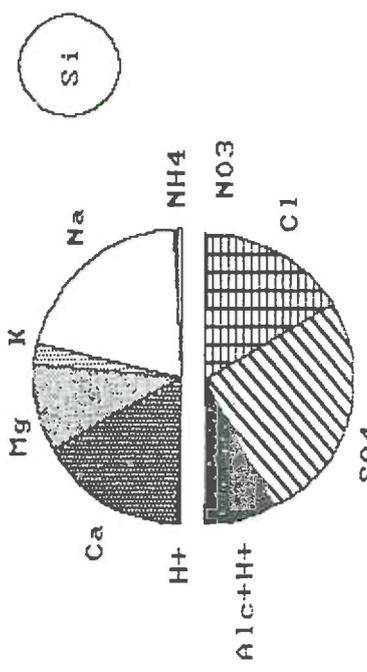
Tableau 31:Composition chimique de la rivière de La Latte:Description statistique de la population d'échantillons étudiée,récoltée entre 1981 et 88 concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)

Figure 34: Composition moyenne des eaux de rivières

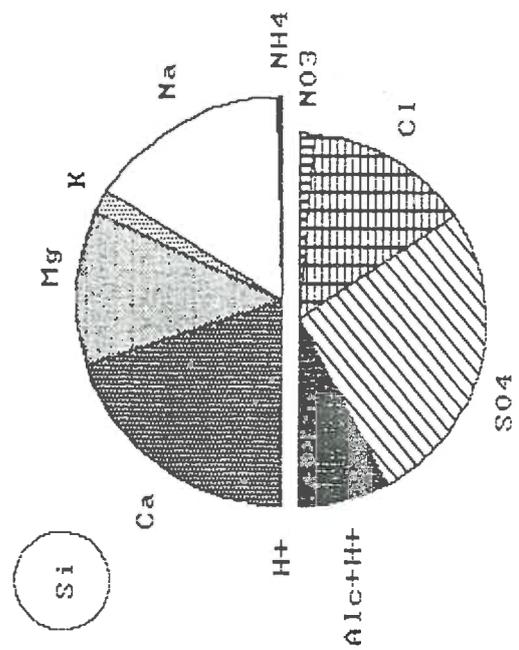
Pelouse (263 $\mu$ eq/l)



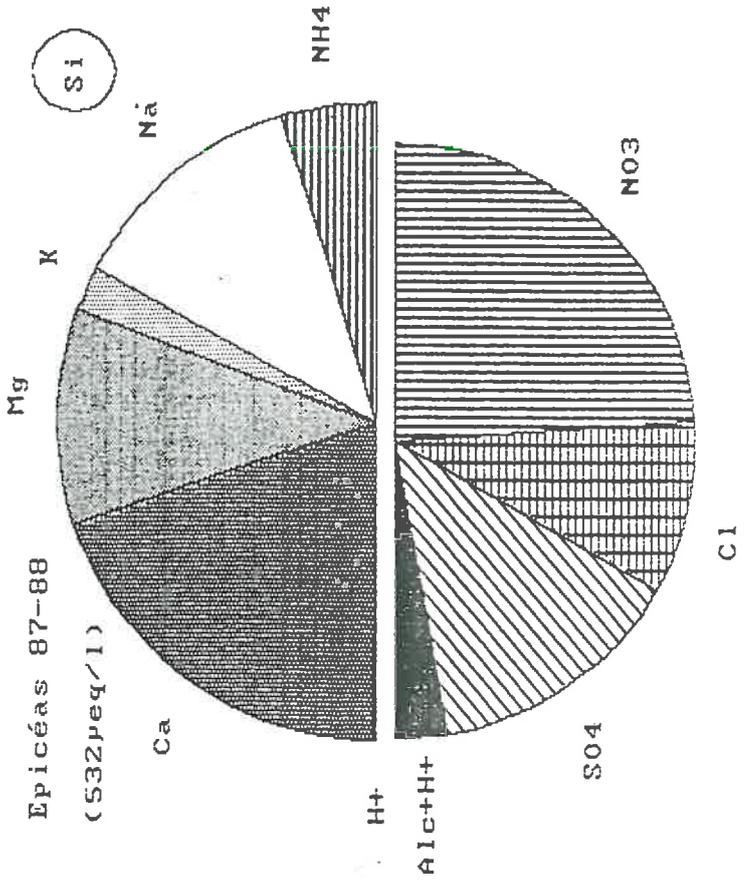
Hêtraie (252 $\mu$ eq/l)



Epiceas 81-86 (334 $\mu$ eq/l)



Epiceas 87-88 (532 $\mu$ eq/l)



lesquelles les grandes tendances suivantes:

-La confirmation des modalités des changements liés à la coupe dans la pessière: augmentation des concentrations en Ca, Mg, Na, K et NO<sub>3</sub>, qui ont commencé à se faire sentir en 86-87, soit un an plus tard que en hydrologie. Dans le même temps, tendance à la baisse des teneurs en SO<sub>4</sub> et en Silice.

-A part le fait précédent, un parallélisme relatif entre les courbes des trois bassins, qui répondent donc à peu près de la même façon aux variations climatiques, avec toutefois une amplitude variable.

-Pour la plupart des éléments, des pics de concentrations à la reprise des écoulements en automne: très marqués pour Mg et Na, très aigus pour K, plus irréguliers pour Cl et SO<sub>4</sub>, mais inversés pour Si. Donc, on peut dire que mis à part pour la Silice, les étiages d'été ont un effet retardé sur les concentrations: Cela signifierait que la nappe alimentant les basses eaux n'est pas significativement plus concentrée, mais que une sécheresse prolongée des sols favoriserait les lixiviations lors de la reprise du drainage. Après les étiages hivernaux accentués de 82-83 et 87-88 (plus de trente jours sans pluie), on n'observe pas de pics similaires. Ce point sera repris plus loin.

-Ce pic est reporté en hiver et au surtout au printemps en 1985-86, avec une ampleur toute particulière dans les forêt, surtout pour SO<sub>4</sub> et Ca. Faisant suite à une sécheresse automnale exceptionnelle et à un hiver très enneigé, ce phénomène apparait comme un accident important dans le fonctionnement de ces écosystèmes.

-Il semble se dessiner, pour le Calcium en particulier, une certaine allure sinusoïdale de période 3ans, avec des minimas aux printemps 82, 85 et 88. Coïncidence ou oscillation périodique à long terme, le recul est certes très insuffisant pour trancher.

-Les teneurs en Silice tendent à baisser depuis juillet 86, ce qui peut être relié à la succession de deux cycles plus humides.

Au pas de temps annuel (Tableaux 32 à 34), on constate encore une fois des variations de moins grande ampleur que dans le cas des pluies, avec des concentrations maximum en 85-86. Si l'on reporte les flux exportés par rapport à la lame d'eau écoulee sur un graphe (Figures n° 35 à 37 et LELONG et al, 1988), on s'aperçoit que la relation entre ces deux valeurs est souvent linéaire, autrement dit que "l'offre" d'éléments n'est pas limitante. Ceci est vrai pour la plupart des cations et le Chlore, mais par contre la silice dans tous les cas, et le Calcium dans la pelouse accusent un fléchissement des exportations pour les forts débits (=dilution), manifestant peut être que l'on atteint là un seuil. Le soufre à un comportement plus irrégulier, avec en particulier une

| Cycle                         | Lame d'eau<br>(mm) | H+  | Alc. | Ca   | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO4  | NO3   | NH4   | Si   |
|-------------------------------|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 1981-82                       | 1354               | -   | -    | 51,6 | 24,9 | 6,1  | 44,7 | 31,4 | 51,6 | (1,4) | -     | 43,2 |
| 1982-83                       | 1904               | -   | -    | 50,6 | 23,7 | 6,1  | 43,6 | 27,7 | 54,7 | -     | -     | 36,8 |
| 1983-84                       | 1160               | -   | -    | 61,5 | 26,2 | 8,2  | 48,8 | 37,2 | 53,8 | -     | (0,3) | 39,1 |
| 1984-85                       | 1694               | -   | -    | 61,9 | 24,3 | 7,7  | 44,7 | 30,6 | 42,2 | -     | (0,4) | 44,5 |
| 1985-86                       | 1268               | -   | -    | 64,1 | 27,9 | 7,9  | 52,1 | 34,9 | 77,6 | -     | (0,6) | 41,7 |
| 1986-87                       | 1474               | 1,9 | 23,0 | 55,9 | 25,1 | 10,6 | 54,6 | 39,8 | 72,4 | -     | 4,3   | 42,9 |
| 1987-88                       | 2003               | 1,6 | 26,5 | 50,1 | 25,0 | 9,8  | 47,6 | 31,8 | 62,3 | 8,9   | 1,8   | 30,1 |
| Moyenne pondérée              | 1551               | 1,7 | 25,0 | 55,8 | 25,1 | 8,1  | 47,7 | 32,9 | 58,7 | (6,0) | (1,5) | 39,2 |
| Coef. var.<br>( $\sigma/m$ %) | 21%                | 14% | 10%  | 11%  | 5%   | 21%  | 9%   | 12%  | 21%  | -     | -     | 13%  |
| Moyenne pondérée<br>1981-86   | 1476               | -   | -    | 57,4 | 25,2 | 7,1  | 46,3 | 31,8 | 55,1 | (1,4) | (0,4) | 40,9 |

Tableau 32: Bassin des Cloutasses (Pelouse)

| Cycle                         | Lame d'eau<br>(mm) | H+  | Alc. | Ca   | Mg   | K   | Na   | Cl   | SO4   | NO3   | NH4   | Si   |
|-------------------------------|--------------------|-----|------|------|------|-----|------|------|-------|-------|-------|------|
| 1981-82                       | 1174               | -   | -    | 37,4 | 23,8 | 4,4 | 46,3 | 36,5 | 52,6  | (2,9) | (0,2) | 46,2 |
| 1982-83                       | 1441               | -   | -    | 37,4 | 24,5 | 6,0 | 46,6 | 36,8 | 58,7  | -     | -     | 43,4 |
| 1983-84                       | 875                | -   | -    | 40,5 | 25,4 | 5,0 | 50,2 | 46,1 | 61,1  | -     | (0,3) | 37,1 |
| 1984-85                       | 1384               | -   | -    | 38,6 | 24,7 | 6,8 | 48,7 | 36,9 | 52,0  | -     | (1,7) | 50,0 |
| 1985-86                       | 970                | -   | -    | 54,5 | 29,7 | 4,8 | 54,3 | 45,9 | 101,9 | -     | (1,2) | 43,4 |
| 1986-87                       | 1255               | 1,6 | 15,4 | 44,1 | 24,9 | 6,3 | 59,3 | 40,4 | 73,3  | -     | 4,6   | 48,4 |
| 1987-88                       | 1652               | 1,5 | 19,8 | 39,3 | 25,9 | 6,7 | 56,1 | 39,9 | 68,4  | 2,0   | 2,2   | 36,5 |
| Moyenne pondérée              | 1250               | 1,5 | 17,9 | 41,1 | 25,4 | 5,9 | 51,7 | 39,8 | 65,8  | (1,3) | (1,8) | 43,6 |
| Coef. var.<br>( $\sigma/m$ %) | 22%                | 7%  | 18%  | 15%  | 8%   | 17% | 10%  | 10%  | 26%   | -     | -     | 12%  |
| Moyenne pondérée<br>1981-86   | 1169               | -   | -    | 41,0 | 25,4 | 5,5 | 48,9 | 39,7 | 63,4  | (2,9) | (0,9) | 44,6 |

Tableau 33: Bassin de La Sapine (Hêtraie)

| Cycle                         | Lame d'eau<br>(mm) | H+  | Alc. | Ca    | Mg   | K    | Na   | Cl   | SO4   | NO3   | NH4   | Si   |
|-------------------------------|--------------------|-----|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| 1981-82                       | 1180               | -   | -    | 61,7  | 38,6 | 5,6  | 51,0 | 42,4 | 79,6  | (5,2) | (0,7) | 45,4 |
| 1982-83                       | 1579               | -   | -    | 63,2  | 38,9 | 7,4  | 49,0 | 43,8 | 77,1  | -     | -     | 42,5 |
| 1983-84                       | 922                | -   | -    | 73,1  | 45,5 | 7,5  | 56,6 | 51,1 | 72,4  | -     | (1,2) | 46,5 |
| 1984-85                       | 1509               | -   | -    | 65,8  | 44,7 | 9,2  | 53,6 | 42,0 | 68,5  | -     | (1,5) | 45,9 |
| 1985-86                       | 1041               | -   | -    | 80,1  | 48,2 | 7,1  | 63,9 | 49,3 | 124,5 | -     | (0,3) | 44,2 |
| 1986-87                       | 1307               | 1,5 | 23,4 | 73,7  | 42,1 | 9,6  | 61,6 | 49,4 | 89,1  | 21,3  | 5,5   | 43,7 |
| 1987-88                       | 2016               | 2,1 | 11,7 | 108,2 | 61,6 | 11,0 | 68,6 | 48,7 | 70,9  | 124,3 | 24,8  | 34,2 |
| Moyenne pondérée              | 1365               | 1,9 | 16,3 | 77,1  | 46,6 | 8,5  | 58,2 | 46,5 | 81,1  | (6,3) | (7,7) | 42,4 |
| Coef. var.<br>( $\sigma/m$ %) | 27%                | 22% | 47%  | 21%   | 17%  | 22%  | 12%  | 8%   | 23%   | -     | -     | 10%  |
| Moyenne pondérée<br>1981-86   | 1246,2             | -   | -    | 67,8  | 42,8 | 7,5  | 54,1 | 45,1 | 82,7  | (5,2) | (1,2) | 44,7 |

Tableau 34: Bassin de La Latte (Pessière)

Compositions moyennes pondérées annuelles des  
Eaux de RIVIERES  
moyennes sur 5 et 7 ans et variabilité interannuelle  
concentrations en  $\mu\text{eq/l}$  ( $\mu\text{moles/l}$  pour Si)  
les valeurs entre parenthèses reposent sur un nombre réduit  
d'observations).

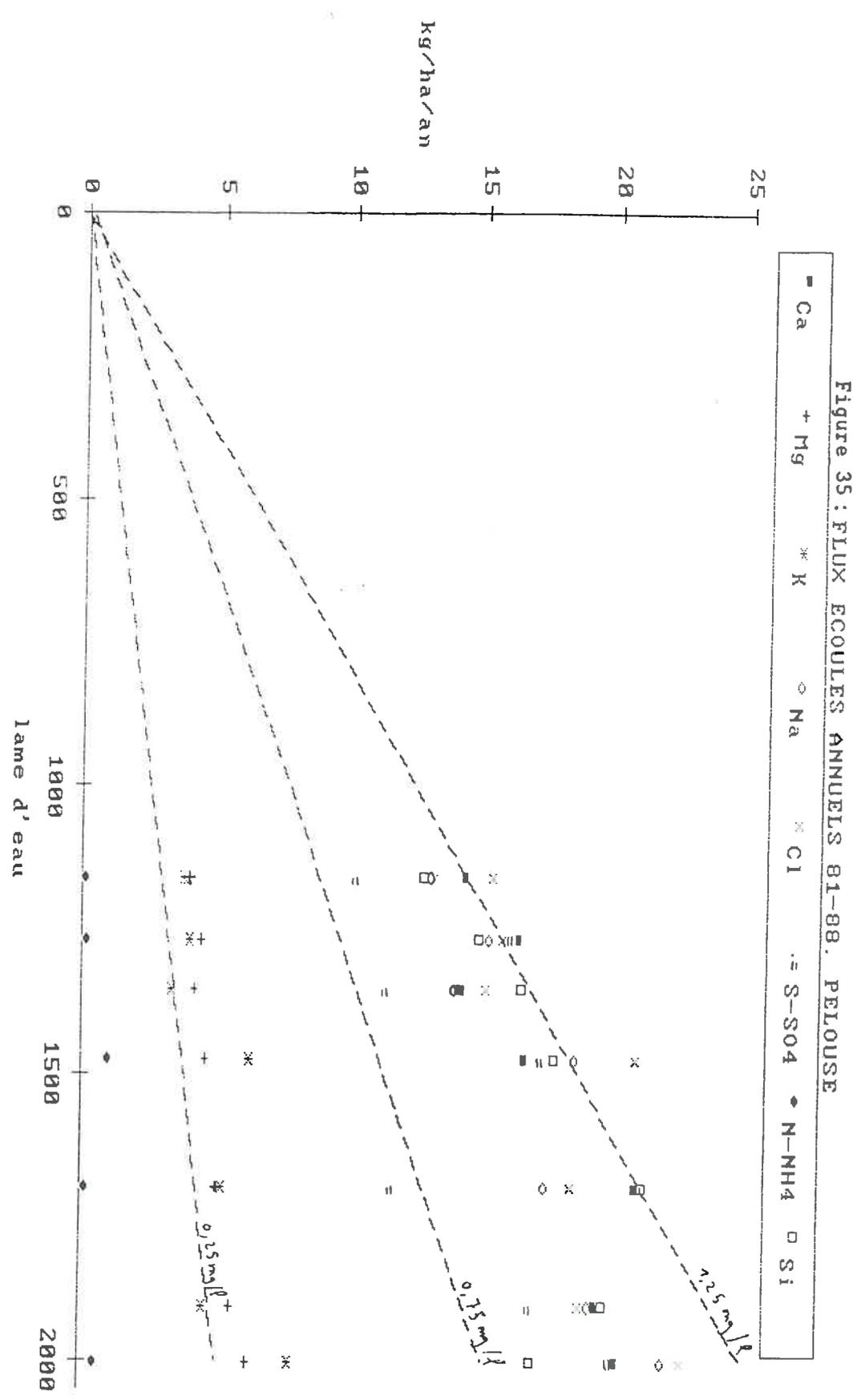


Figure 36: FLUX ECOULES ANNIUELS 81-88. PESSIERE

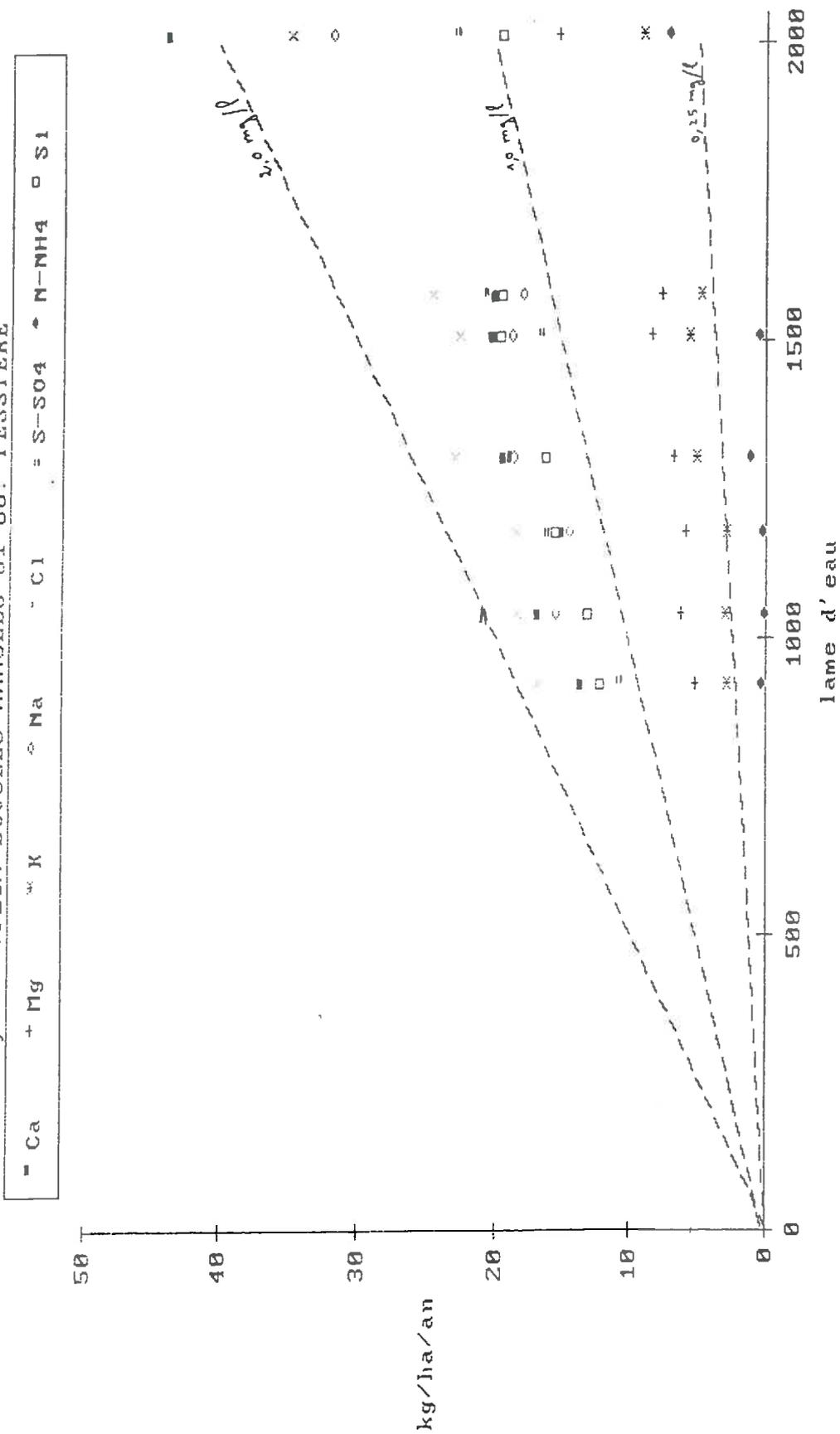
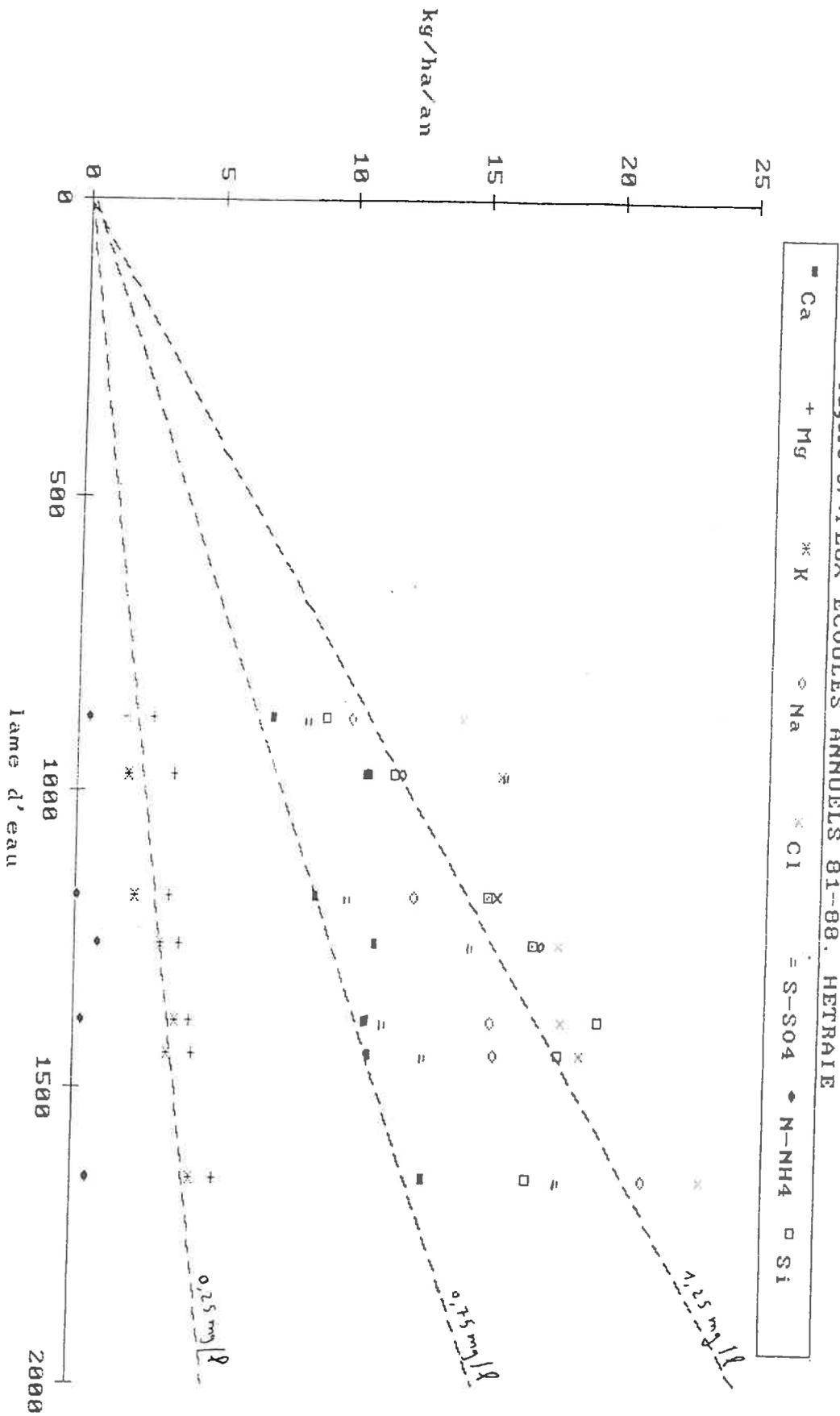


Figure 37: FLUX ECOULES ANNUELS 81-88. HETTRAIE



pointe en 85-86, d'ailleurs repérable dans les courbes des autres éléments, à relier aux pics de concentrations printanières notés plus haut.

Il conviendra de revenir sur ces différents faits en raisonnant cette fois en termes de bilans entrées-sorties pour voir s'il sont ou non liés aux variations dans les entrées.

#### III.2.4. Relations entre éléments

Comme nous l'avons déjà signalé, les eaux de rivières, particulièrement en crue, résultent de mélanges en proportions variables des différents types d'eau, dont les trajets varient beaucoup (v. chap I.4). Par conséquent une étude poussée sur les liens entre les divers éléments, jusqu'à en tirer des informations sur les processus internes aux écosystèmes, nécessite une réflexion approfondie sur les modalités de ces mélanges et une sélection des échantillons préalable aux traitements statistiques. Ce n'est pas le choix qui a été adopté ici, et nous nous contenterons donc de quelques remarques inspirées par les matrices de corrélations (tableaux n°35 à 38) et les ACP (figures n°39 à 41) calculés sur l'ensemble des données disponibles. Toutefois, les compositions moyennes de l'écoulement souterrain calculée grâce à l'algorithme de calcul des flux (v. § III.3.1) ont été utilisées pour placer les eaux sur les diagrammes d'équilibre géochimiques classiques (figure n°38).

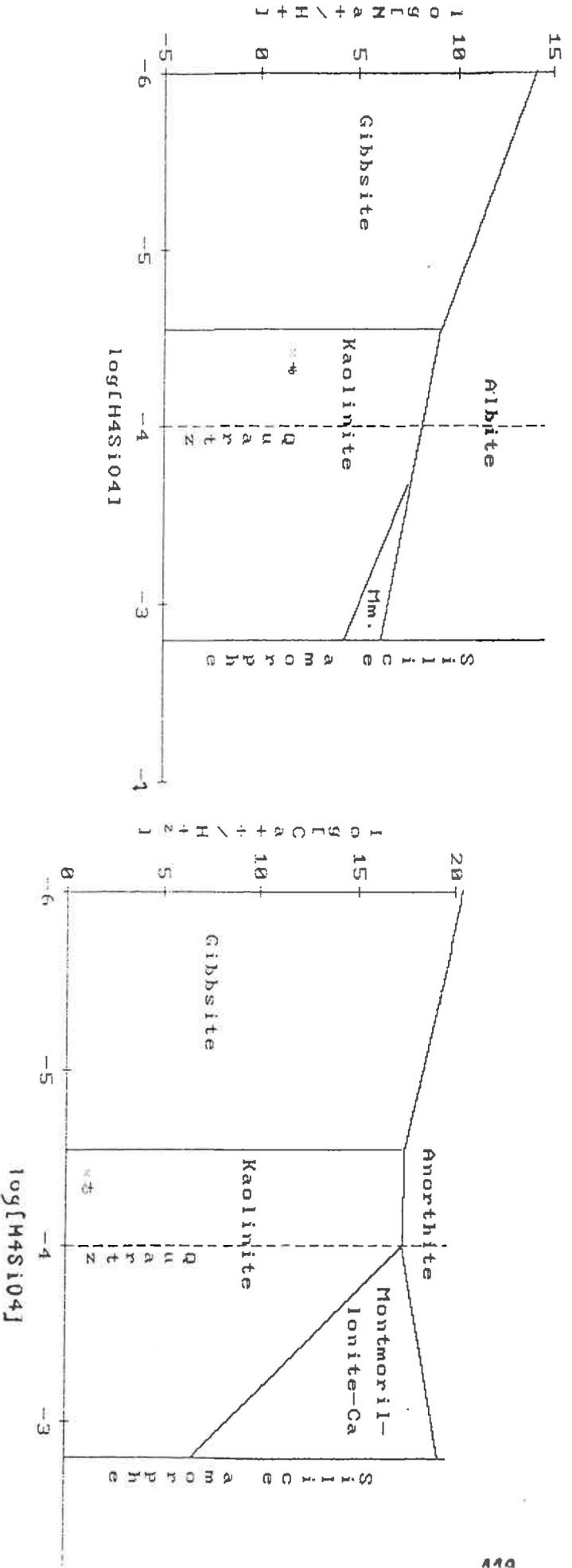
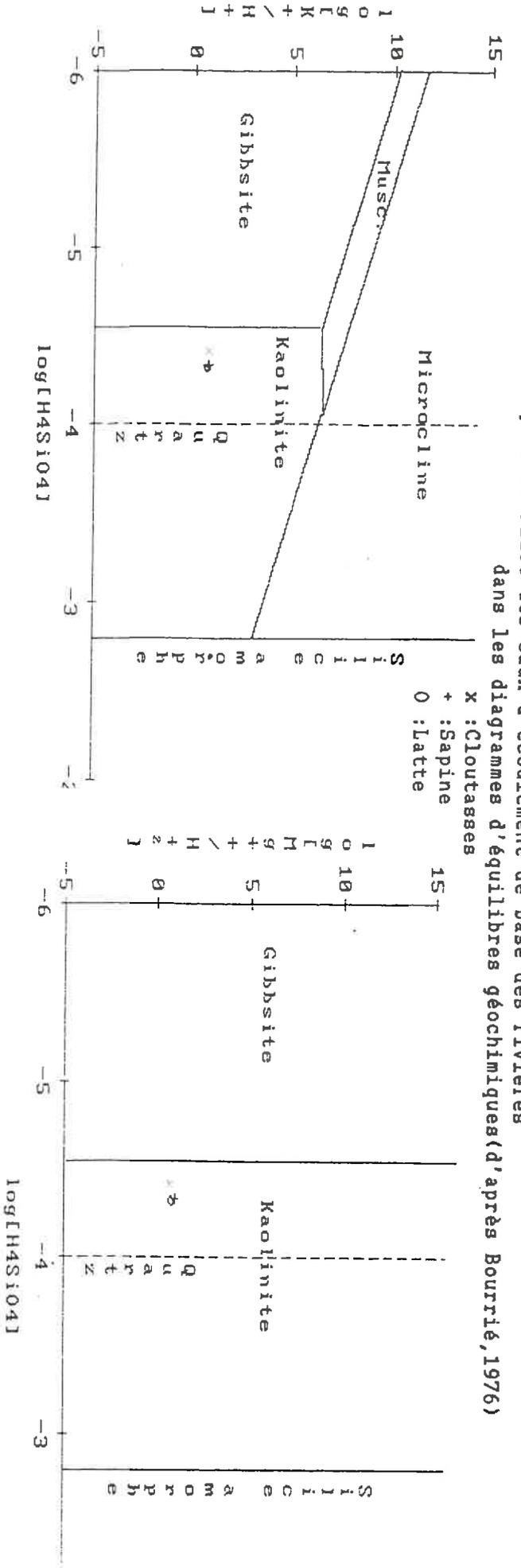
Comme le souligne Bourrié (1976), ces diagrammes n'ont qu'une valeur indicative, étant donné que l'on ne connaît pas la composition exacte des minéraux primaires et secondaires réellement présents.

On constate donc que les eaux sont très proches les unes des autres, et situées dans le domaine de stabilité de la kaolinite, ce qui était prévisible (Bourrié, 1976). On remarque toutefois qu'elles sont très proches du domaine de stabilité de la gibbsite, minéral qui semble présent dans les horizons profonds et l'arène (VANNIER, 1987). Cet auteur lui attribuait une origine ancienne, mais il est vraisemblable qu'il s'en forme encore actuellement, et même qu'elle contrôle l'aluminium dans ce type de sol (BOURRIÉ, 1989).

Outre les relations avec les débits discutées plus haut, les corrélations croisées montrent une très forte liaison entre Ca et Mg, un comportement assez indépendant des espèces azotées (sauf dans la peissière après 86), des relations positives entre la Silice et les cations, sauf K. Avec ce dernier, les coefficients sont nuls ou négatif, sans doute en raison de leurs comportements opposés pendant les crues (v. § 2.2). L'alcalinité est associée à la Silice et à Ca, Mg, et un peu moins à Na, sauf dans la peissière perturbée où les coefficients de corrélation entre l'alcalinité et les cations sont négatifs.

Les ACP donnent des résultats remarquablement homogènes entre les trois bassins, surtout entre Cloutasses et Sapine. Pour ces deux bassins, les graphes représentant les variables dans les plans I-II sont presque superposables,

Figure 38: Place des eaux d'écoulement de base des rivières dans les diagrammes d'équilibres géochimiques (d'après Bourrié, 1976)



|      | H+         | Alc.        | Ca          | Mg          | K           | Na          | Cl          | SO4         | NO3         | NH4         | Si          | CHG         |
|------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Q    | <u>.66</u> | <u>-.51</u> | <u>-.29</u> | <u>-.36</u> | <u>.21</u>  | <u>-.42</u> | <u>.02</u>  | <u>.09</u>  | <u>-.11</u> | <u>-.04</u> | <u>-.59</u> | <u>-.51</u> |
|      | 92         | 108         | 353         | 364         | 374         | 364         | 376         | 345         | 71          | 152         | 355         | 40          |
| H+   |            | <u>-.55</u> | <u>-.48</u> | <u>-.41</u> | <u>.26</u>  | <u>-.28</u> | <u>.04</u>  | <u>-.13</u> | <u>-.22</u> | <u>-.14</u> | <u>-.41</u> | <u>-.49</u> |
|      |            | 90          | 86          | 86          | 86          | 86          | 89          | 84          | 47          | 88          | 89          | 39          |
| Alc. |            |             | <u>.40</u>  | <u>.40</u>  | <u>-.16</u> | <u>.21</u>  | <u>-.14</u> | <u>-.22</u> | <u>.03</u>  | <u>.03</u>  | <u>.40</u>  | <u>.37</u>  |
|      |            |             | 102         | 102         | 102         | 102         | 105         | 97          | 57          | 86          | 105         | 37          |
| Ca   |            |             |             | <u>.77</u>  | <u>.42</u>  | <u>.39</u>  | <u>.41</u>  | <u>.31</u>  | <u>.06</u>  | <u>-.05</u> | <u>.33</u>  | <u>.69</u>  |
|      |            |             |             | 347         | 353         | 347         | 351         | 329         | 65          | 146         | 335         | 40          |
| Mg   |            |             |             |             | <u>.36</u>  | <u>.49</u>  | <u>.44</u>  | <u>.27</u>  | <u>.19</u>  | <u>.03</u>  | <u>.39</u>  | <u>.59</u>  |
|      |            |             |             |             | 364         | 364         | 362         | 345         | 68          | 146         | 349         | 40          |
| K    |            |             |             |             |             | <u>.29</u>  | <u>.47</u>  | <u>.32</u>  | <u>.01</u>  | <u>.11</u>  | <u>-.01</u> | <u>.16</u>  |
|      |            |             |             |             |             | 364         | 372         | 345         | 68          | 146         | 349         | 40          |
| Na   |            |             |             |             |             |             | <u>.49</u>  | <u>.28</u>  | <u>.17</u>  | <u>.34</u>  | <u>.43</u>  | <u>.69</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             | 362         | 345         | 68          | 146         | 349         | 40          |
| Cl   |            |             |             |             |             |             |             | <u>.52</u>  | <u>-.14</u> | <u>.19</u>  | <u>.05</u>  | <u>.68</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             | 343         | 68          | 150         | 352         | 40          |
| SO4  |            |             |             |             |             |             |             |             | <u>.10</u>  | <u>.21</u>  | <u>-.08</u> | <u>.77</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             | 60          | 144         | 330         | 40          |
| NO3  |            |             |             |             |             |             |             |             |             | <u>.33</u>  | <u>-.17</u> | <u>.28</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |             | 69          | 40          | 40          |
| NH4  |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <u>-.04</u> | <u>.38</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 144         | 40          |
| Si   |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <u>.52</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 39          |
| CHG  |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |

Tableau 35: CLOUTASSES (pelouse)

Matrice des corrélations (Coef. de Pearson)

Eaux de RIVIERES

Les coef. soulignés sont significatifs à  $\alpha=0.01$

les chiffres inférieurs indiquent le nombre de couples

|      | H+         | Alc.        | Ca          | Mg          | K           | Na          | Cl          | SO4         | NO3        | NH4         | Si          | CHG         |
|------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Q    | <u>.32</u> | <u>-.30</u> | <u>-.09</u> | <u>-.22</u> | <u>.34</u>  | <u>-.30</u> | 0           | <u>.11</u>  | <u>.17</u> | <u>-.12</u> | <u>-.45</u> | <u>.23</u>  |
|      | 70         | 85          | 326         | 317         | 326         | 317         | 328         | 305         | 61         | 128         | 304         | 35          |
| H+   |            | <u>-.64</u> | <u>-.48</u> | <u>-.39</u> | <u>-.02</u> | <u>-.13</u> | <u>-.10</u> | <u>-.06</u> | <u>.06</u> | <u>-.27</u> | <u>-.35</u> | <u>-.07</u> |
|      |            | 68          | 63          | 63          | 63          | 63          | 64          | 60          | 35         | 68          | 65          | 26          |
| Alc. |            |             | <u>.36</u>  | <u>.43</u>  | <u>-.10</u> | <u>-.07</u> | <u>-.10</u> | <u>-.29</u> | <u>.11</u> | <u>.16</u>  | <u>.30</u>  | <u>-.05</u> |
|      |            |             | 78          | 78          | 78          | 78          | 79          | 75          | 46         | 67          | 80          | 27          |
| Ca   |            |             |             | <u>.70</u>  | <u>.28</u>  | <u>.37</u>  | <u>.37</u>  | <u>.44</u>  | <u>.26</u> | <u>.02</u>  | <u>.22</u>  | <u>.40</u>  |
|      |            |             |             | 316         | 325         | 316         | 324         | 304         | 57         | 120         | 297         | 35          |
| Mg   |            |             |             |             | <u>.28</u>  | <u>.42</u>  | <u>.39</u>  | <u>.22</u>  | <u>.30</u> | <u>-.05</u> | <u>.35</u>  | <u>.31</u>  |
|      |            |             |             |             | 316         | 317         | 315         | 305         | 57         | 121         | 297         | 35          |
| K    |            |             |             |             |             | <u>.24</u>  | <u>.40</u>  | <u>.20</u>  | <u>.18</u> | <u>-.04</u> | <u>-.09</u> | <u>.65</u>  |
|      |            |             |             |             |             | 316         | 324         | 305         | 57         | 121         | 296         | 35          |
| Na   |            |             |             |             |             |             | <u>.49</u>  | <u>.37</u>  | <u>.16</u> | <u>.24</u>  | <u>.28</u>  | <u>.48</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             | 315         | 305         | 57         | 121         | 297         | 35          |
| Cl   |            |             |             |             |             |             |             | <u>.38</u>  | <u>.41</u> | <u>.17</u>  | 00          | <u>.91</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             | 303         | 56         | 122         | 298         | 35          |
| SO4  |            |             |             |             |             |             |             |             | <u>.35</u> | <u>.05</u>  | <u>-.09</u> | <u>.82</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             | 53         | 118         | 287         | 35          |
| NO3  |            |             |             |             |             |             |             |             |            | <u>.08</u>  | <u>.22</u>  | <u>.60</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |            | 43          | 60          | 35          |
| NH4  |            |             |             |             |             |             |             |             |            |             | <u>.10</u>  | <u>.27</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |            |             | 116         | 35          |
| Si   |            |             |             |             |             |             |             |             |            |             |             | <u>.07</u>  |
|      |            |             |             |             |             |             |             |             |            |             |             | 35          |
| CHG  |            |             |             |             |             |             |             |             |            |             |             |             |

Tableau 36: SAPINE (Hêtres)

|      | H+               | Alc.              | Ca                | Mg               | K                 | Na                | Cl               | SO4              | NO3               | NH4              | Si                | CHG               |
|------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| O    | <u>.70</u><br>70 | <u>-.53</u><br>85 | .06<br>80         | -.05<br>80       | <u>-.71</u><br>79 | <u>-.39</u><br>80 | -.09<br>80       | -.05<br>80       | .10<br>71         | .11<br>81        | -.10<br>81        | .05<br>65         |
| H+   |                  | <u>-.71</u><br>77 | .30<br>77         | .19<br>77        | <u>.44</u><br>76  | -.18<br>77        | -.08<br>76       | -.20<br>77       | <u>.48</u><br>70  | -.17<br>79       | <u>-.29</u><br>78 | <u>.37</u><br>64  |
| Alc. |                  |                   | <u>-.33</u><br>74 | -.22<br>74       | -.27<br>73        | .01<br>74         | .03<br>73        | .19<br>74        | <u>-.53</u><br>67 | .16<br>76        | .18<br>75         | <u>-.46</u><br>61 |
| Ca   |                  |                   |                   | <u>.85</u><br>80 | .10<br>79         | <u>.45</u><br>80  | .01<br>78        | -.22<br>80       | <u>.75</u><br>69  | .04<br>78        | -.20<br>77        | <u>.88</u><br>65  |
| Mg   |                  |                   |                   |                  | .06<br>79         | <u>.45</u><br>80  | -.09<br>78       | -.28<br>80       | <u>.73</u><br>69  | .12<br>78        | -.27<br>77        | <u>.82</u><br>65  |
| K    |                  |                   |                   |                  |                   | -.23<br>79        | .02<br>77        | 0<br>79          | .00<br>68         | <u>.33</u><br>77 | .05<br>76         | .06<br>65         |
| Na   |                  |                   |                   |                  |                   |                   | <u>.41</u><br>78 | .03<br>80        | <u>.47</u><br>69  | -.04<br>78       | .14<br>77         | <u>.66</u><br>65  |
| Cl   |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  | <u>.37</u><br>78 | -.06<br>67        | .09<br>77        | .22<br>77         | .25<br>65         |
| SO4  |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  |                  | <u>-.48</u><br>69 | -.01<br>78       | .25<br>77         | -.17<br>65        |
| NO3  |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  |                  |                   | -.13<br>70       | <u>-.41</u><br>70 | <u>.88</u><br>65  |
| NH4  |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  |                  |                   |                  | .23<br>79         | -.03<br>65        |
| Si   |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  |                  |                   |                  |                   | -.28<br>64        |
| CHG  |                  |                   |                   |                  |                   |                   |                  |                  |                   |                  |                   |                   |

Tableau 37: LATTE 1986-88 (pessière endommagée)

Matrice des corrélations (Coef. de Pearson)

Eaux de RIVIERES

Les coef. soulignés sont significatifs à  $\alpha=0.01$

les chiffres inférieurs indiquent le nombre de couples

|     | Ca                 | Mg                 | K                 | Na                 | Cl                | SO4               | NO3        | NH4        | Si                 |
|-----|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|--------------------|
| O   | <u>-.35</u><br>249 | <u>-.41</u><br>240 | <u>.39</u><br>248 | <u>-.43</u><br>238 | -.05<br>244       | .05<br>233        | .14<br>23  | .04<br>59  | <u>-.44</u><br>234 |
| Ca  |                    | <u>.82</u><br>240  | .16<br>248        | <u>.69</u><br>238  | <u>.40</u><br>244 | <u>.25</u><br>233 | -.22<br>23 | -.04<br>59 | <u>.34</u><br>234  |
| Mg  |                    |                    | <u>.21</u><br>239 | <u>.71</u><br>238  | <u>.40</u><br>235 | .13<br>233        | .04<br>23  | -.05<br>59 | <u>.35</u><br>233  |
| K   |                    |                    |                   | .10<br>238         | <u>.46</u><br>243 | .10<br>232        | .22<br>23  | -.03<br>59 | <u>-.26</u><br>233 |
| Na  |                    |                    |                   |                    | <u>.35</u><br>233 | <u>.17</u><br>231 | -.09<br>23 | -.15<br>59 | <u>.48</u><br>231  |
| Cl  |                    |                    |                   |                    |                   | .21<br>229        | .38<br>21  | .24<br>57  | 0<br>230           |
| SO4 |                    |                    |                   |                    |                   |                   | .40<br>19  | .04<br>57  | -.09<br>227        |
| NO3 |                    |                    |                   |                    |                   |                   |            | -.59<br>7  | -.26<br>23         |
| NH4 |                    |                    |                   |                    |                   |                   |            |            | .14<br>59          |
| Si  |                    |                    |                   |                    |                   |                   |            |            |                    |
| CHG |                    |                    |                   |                    |                   |                   |            |            |                    |

Tableau 38: LATTE 1981-86 (Epiceas 'sains')

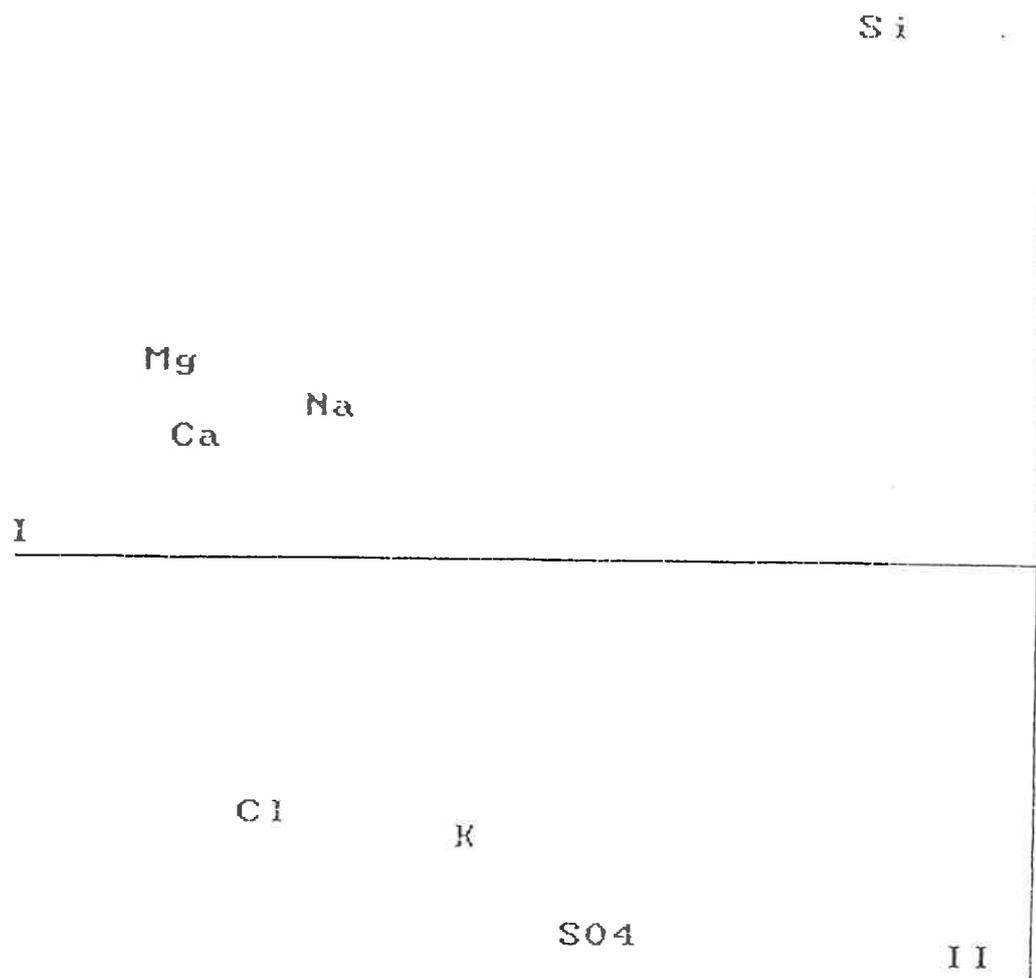
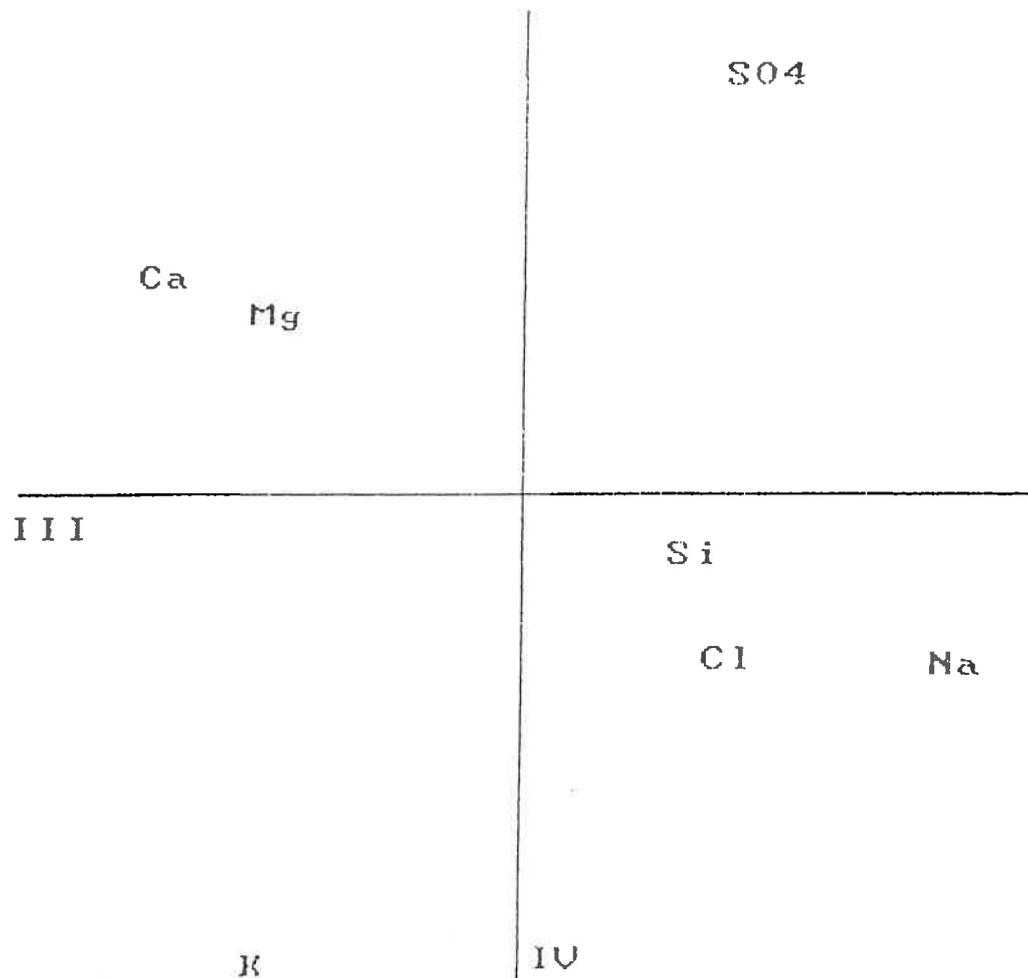


Figure 39: ACP PELOUSE (7 Var, 300 pts)



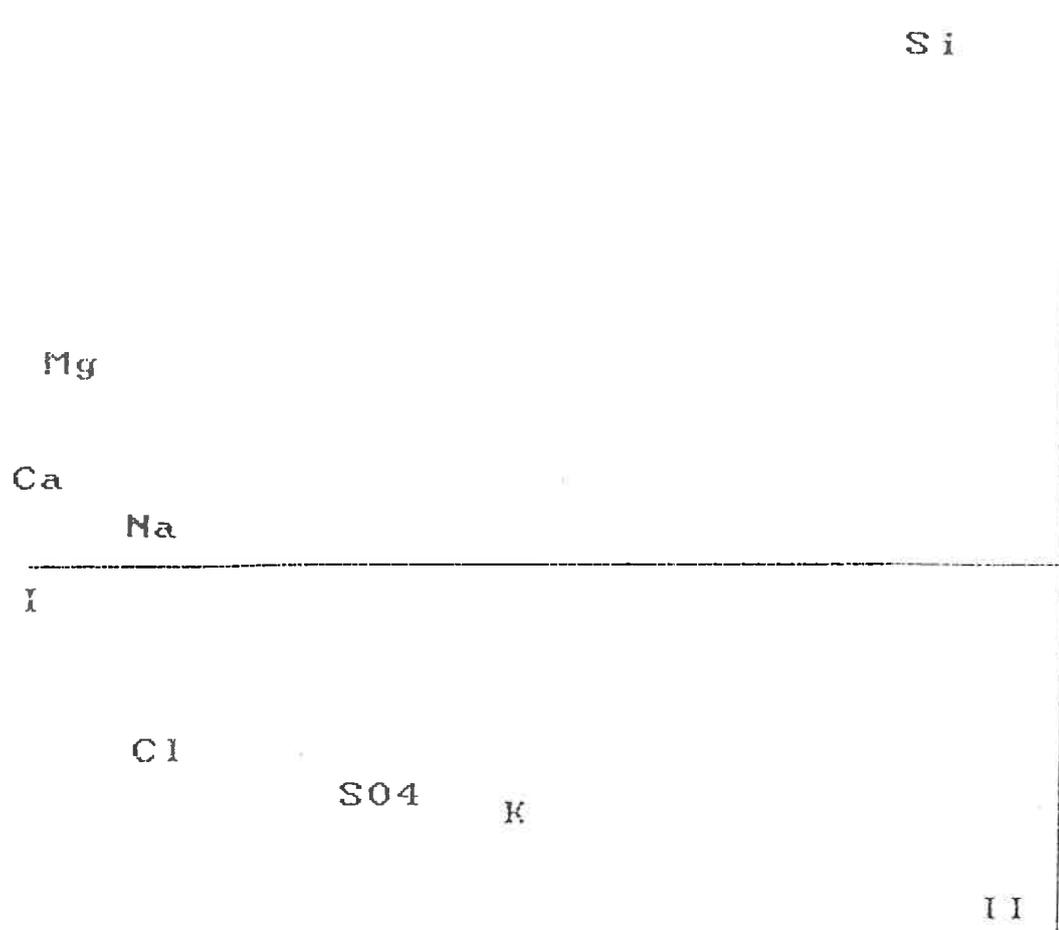
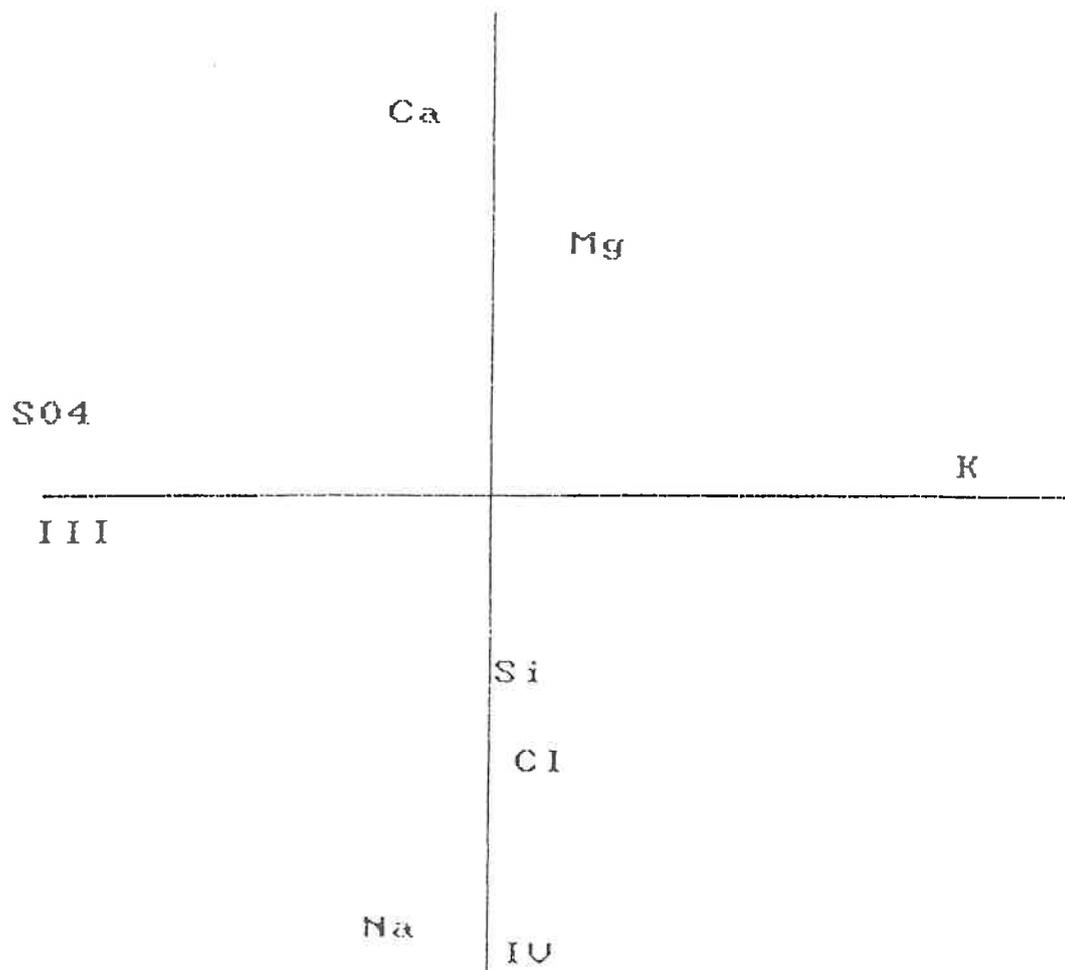


Figure 40: ACP HETRAIE (7 Var, 285 pts)



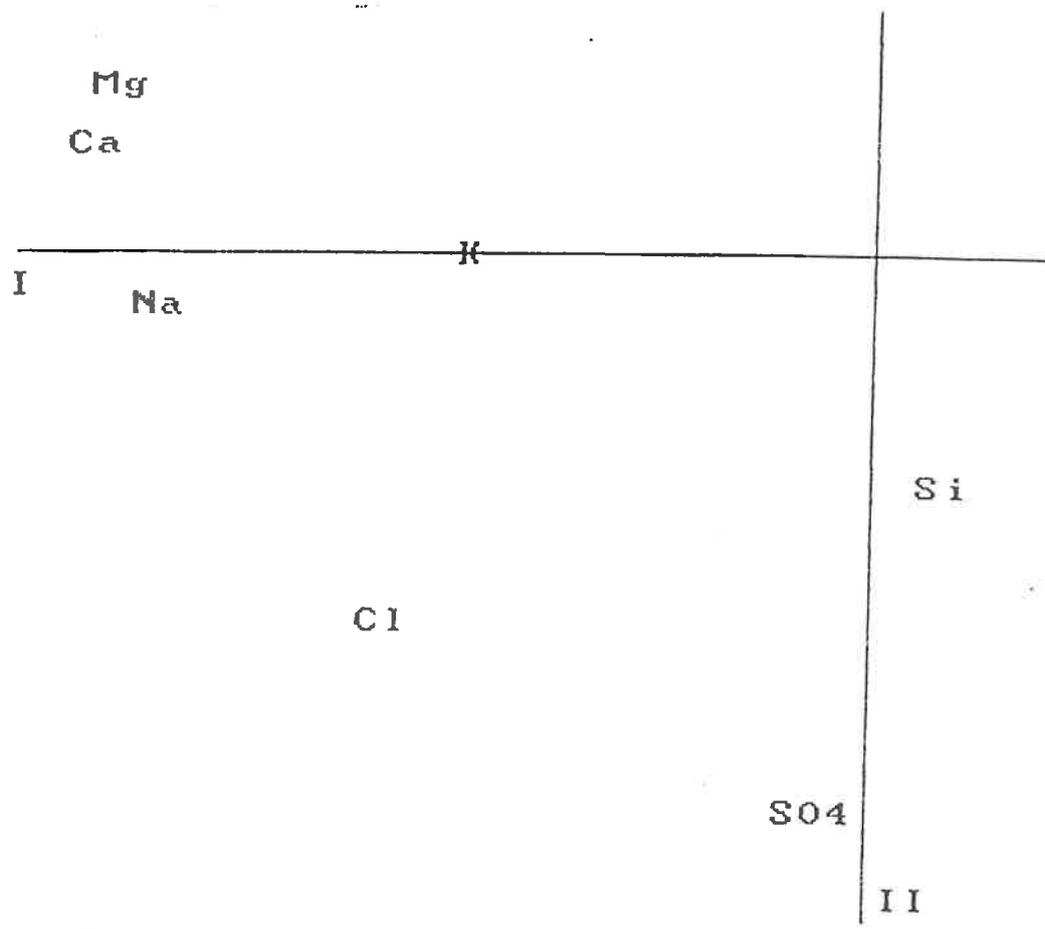
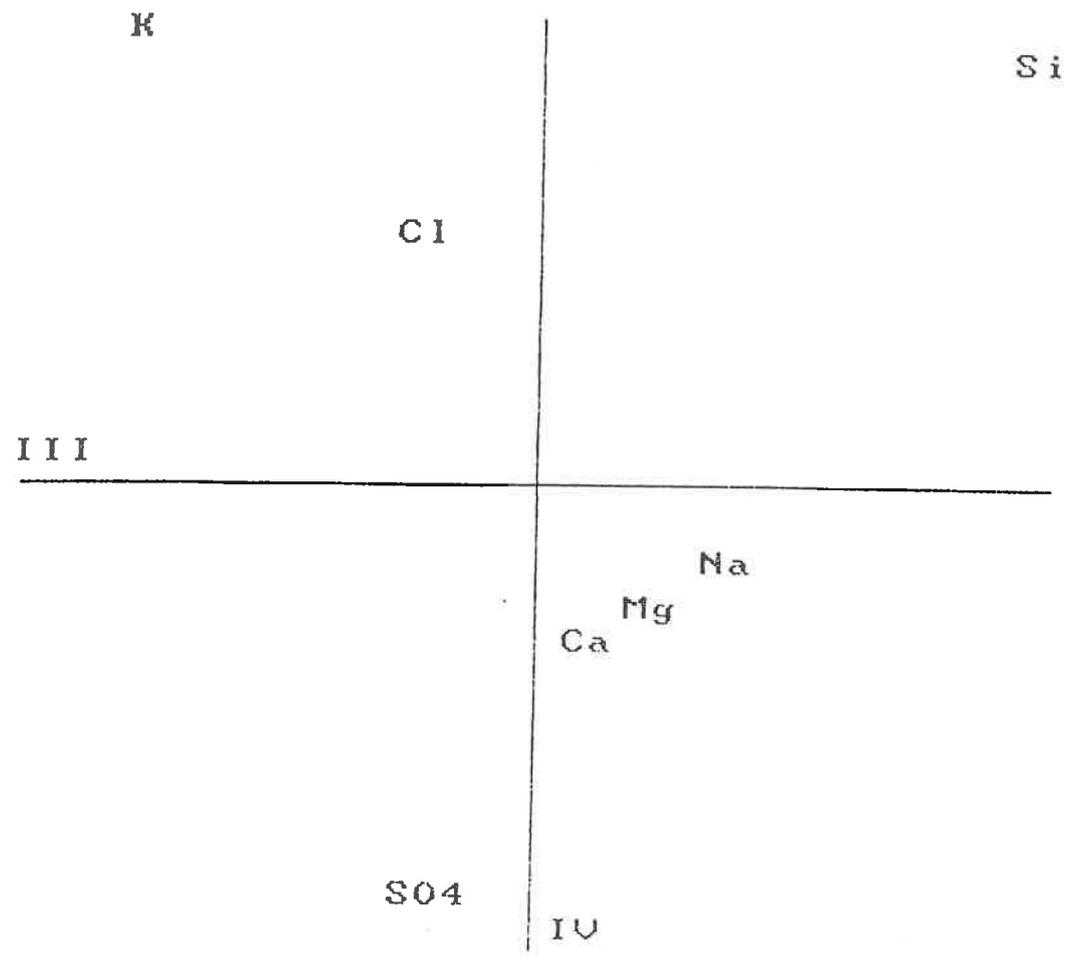


Figure 41 : ACP PESSIERE(7 Var, 295 pts)



l'axe I exprimant la charge en Ca, Mg, Na et Cl, l'axe II opposant Si, qui caractérise les eaux souterraines, à K et SO<sub>4</sub>, plus présents dans les eaux superficielles. Les plans III-IV sont aussi très comparables pour peu qu'on intervertisse l'ordre des axes: l'axe III de la pelouse et l'axe IV de la hêtraie opposent nettement K à SO<sub>4</sub>, les autres variables n'ayant aucun poids. Cette opposition qui apparaît aussi dans l'axe IV de la pessière, n'a pas d'explication nette; on peut seulement dire que les échantillons riches en K et pauvres en S se rencontrent surtout parmi les eaux d'automne, et les échantillons riches en S et pauvres en K surtout en hiver et au printemps. L'axe VI de la hêtraie et l'axe III de la pelouse oppose Mg et Ca, dont la très forte liaison dans ces eaux semble indiquer une origine commune qui pourrait être les eaux du sol, à Na et Cl, couple inséparable des eaux de pluie.

Le premier axe de l'ACP de la rivière de La Latte est identique à ceux des deux autres ACP, mais l'axe II n'est significatif que pour les sulfates (et secondairement Cl). La Silice contribue cependant fortement aux deux axes suivants, d'abord en opposition à K, puis associé à K et opposé à SO<sub>4</sub>. On retrouve donc à quelques nuances près les mêmes tendances que dans les autres rivières, ces nuances étant peut-être dues à la prise en compte de la dernière année dans cette ACP. En effet, la comparaison des matrices de corrélation de La Latte avant et après 86 (tableaux 37 et 38) indique une certaine modification des relations entre solutés, avec une dégradation des liaisons de la Silice avec les cations et l'apparition de fortes corrélations positives entre ces cations et NO<sub>3</sub>.

Des ACP incluant les variables H<sup>+</sup>, alcalinité, NO<sub>3</sub> et NH<sub>4</sub> ont aussi été calculées, portant donc essentiellement sur la période 87-88. Sans revenir sur le cas particulier de la pessière, on peut dire qu'elles confirment les tendances précédentes, l'alcalinité suivant le comportement de Ca et Mg, les pH bas étant associés aux eaux peu chargées (pointes de crues, le plus souvent), les espèces azotées associées dans un comportement assez indépendant des autres éléments.

En conclusion sur ce point, on s'aperçoit que, bien qu'à peine plus chargées que les eaux de pluies, les eaux de rivière s'en distinguent nettement d'un point de vue qualitatif. L'acidité, au demeurant très faible, n'est plus associée significativement aux anions d'acides forts, on ne retrouve plus les associations entre éléments de même origine. L'expression quantitative de ces changements et les variations de stocks qu'ils sous-entendent passent par l'évaluation des bilans entrées-sorties des écosystèmes, que nous allons à présent examiner.

### III.3. LES BILANS ENTRÉES-SORTIES

#### III.3.1. Evaluation des flux exportés

La stratégie d'évaluation des flux de solutés exportés par les rivières est certainement l'un des aspects les plus originaux et les plus importants du travail de C. DUPRAZ. Nous en rappellerons ici les principes essentiels.

##### *observations préliminaires*

les flux exportés ont pour expression mathématique:

$$\int_t q(t).c(t)dt$$

où  $q(t)$  et  $c(t)$  représentent respectivement les débits et concentrations instantanés de la rivière. Pour calculer ces flux, il importe donc de connaître à chaque instant le débit et la concentration. Cela est relativement facile pour le débit, car on peut mesurer en continu la hauteur d'eau à l'exutoire, qui lui est fonctionnellement liée. C'est beaucoup plus difficile pour les concentrations, sur lesquelles on ne dispose en général que d'une information discrète, liée aux prélèvements effectués. On en est donc réduit à des reconstitutions qui nécessitent la connaissance la meilleure possible des variations de la grandeur à rendre continue. Deux grands types de démarches sont alors envisageables, suivant que l'on adopte une approche stochastique ou déterministe; dans le premier cas, les prélèvements sont effectués au hasard, en général selon un pas de temps fixe, et l'on fait une reconstitution au moyen d'un estimateur statistique, en général moyenne ou moyenne pondérée par les débits. Dans ce cas, la justesse de l'estimation et surtout sa reproductibilité dépend essentiellement de la densité de l'échantillonnage. Dans le deuxième cas, on cherche à relier les concentrations à une grandeur mesurée en continu, le débit en général. Dans les cas favorables, après un période exploratoire nécessaire à caler la relation, on peut se contenter d'un suivi allégé. Dans ce cas la qualité du résultat dépend surtout de la validité du modèle et de sa permanence.

En cherchant un modèle de ce type, Dupraz s'est vite aperçu que, en effet, les concentrations étaient fortement liées aux débits, puisque l'essentiel de leurs variations avaient lieu pendant les crues, mais que malheureusement les relations concentration-débit changeaient radicalement d'une crue à l'autre, et même au sein d'une même crue avec en particulier une forte hystérésis entre la montée et la descente de crue. C'est en partant de cette constatation et de la nécessité d'optimiser le rapport précision/coût analytique que l'algorithme de calcul a été conçu.

### principe

le principe de la reconstitution des concentrations peut-être résumé en trois aphorismes:

Puisque des relations débits concentrations existent, autant chercher à les utiliser.

Puisqu'elles varient pour chaque crue, recalculons-les à chaque fois.

Puisque qu'elles manifestent une forte tendance à l'hystérèse, cherchons une forme de modèle qui en rende compte.

Le choix s'est donc porté sur un modèle de mélange utilisant la décomposition hydrologique des hydrogrammes (cf. §III.1):

$$C_{totale} = (C_b \times Q_b + C_r \times Q_r) / (Q_b + Q_r)$$

où  $Q_b$  et  $C_b$  représentent le débit de base (écoulement souterrain) et sa concentration,  $Q_r$  et  $C_r$  le débit ruisselé (écoulement rapide) et sa concentration.

$C_b$  et  $C_r$  sont modélisés séparément par des relations linéaires du type:

$$\begin{aligned} & C_b(t) = \alpha Q_b(t) + \beta \\ \text{ou} & C_b(t) = \alpha t + \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & C_r(t) = \alpha Q_{tot}(t) + \beta \\ \text{ou} & C_r(t) = \alpha Q_r(t) + \beta \\ \text{ou} & C_r(t) = \alpha t + \beta \end{aligned}$$

Hors crue, on a bien sûr:  $C_r = Q_r = 0$ ,  $C_b = C_{totale}$ ,  $Q_b = Q_{total}$

Le choix du type de relation dépend du nombre de points disponibles pendant l'intervalle où s'applique le modèle. Si ce nombre est d'au moins trois, le choix se fonde sur la valeur du coefficient de corrélation. S'il est de deux, on prend le modèle en fonction de  $t$  (pour  $C_r$ ), ou de  $Q_b$  (pour  $C_b$ ), choix justifié par l'étude des crues très échantillonnées. S'il est de un ou zéro, plusieurs options sont possibles:

1. Une concentration constante et égale à la valeur échantillonnée (s'il y en a une) ou à une moyenne saisonnière ou annuelle.

2. L'utilisation d'un modèle saisonnier ou annuel  $f(t)$  ou  $f(Q)$  ajusté sur l'ensemble des échantillons disponibles.

3. S'il y a un point, on peut éventuellement forcer le modèle saisonnier à passer par ce point.

A l'usage, il est apparu que lorsqu'on dispose de peu d'échantillons sur la période (cycle peu arrosé, enneigement, préleveur en panne, etc.), la solution 1 est préférable, car les modèles "bouche-trou" ont une fâcheuse tendance à diverger. Sinon, c'est le modèle forcé qui donne les résultats les plus fiables.

Il est ensuite possible de reconstituer les concen-

trations à chaque point-cerise de l'hydrogramme linéarisé, après quoi on intègre le produit des deux courbes  $c(t)$  et  $q(t)$  sur chaque intervalle élémentaire ainsi déterminé.

Cette méthode de calcul a nécessité la mise au point, d'une part, d'un préleveur automatique asservi aux variations de débits (qui permet de prélever des échantillons au pic de la crue, quelque soit son amplitude), et d'autre part d'un logiciel de calcul des flux, à partir de fichiers de débits à pas de temps variable et de concentration. Actuellement, la deuxième génération de préleveurs est en cours d'installation, et le logiciel, tournant en GWBASIC sur compatible PC, pourrait être testé sur d'autres suivis de bassins versants, pour autant qu'on y dispose d'un bon échantillonnage des crues, et que le mode de variation des concentrations le justifie, ce qui doit être vérifié au préalable.

Les avantages de cette méthode sont multiples: les reconstitutions en continu des concentrations permettent d'avoir une bonne idée de la dynamique des processus et donnent la possibilité de calculer des flux non biaisés à des pas de temps très courts; l'algorithme choisi cumule les avantages des méthodes déterministes et stochastiques pour donner un résultat précis avec une densité d'échantillonnage faible (50 échantillons par an en moyenne).

Deux inconvénients peuvent cependant compliquer sa mise en oeuvre: Le protocole d'échantillonnage est un peu astreignant et nécessite soit des préleveurs très fiables (ce qui, jusqu'à présent s'est révélé très difficile à obtenir), soit une présence permanente à proximité des sites; D'autre part, le mode de calcul un peu complexe nécessite une bonne connaissance de l'ensemble de la chaîne de traitement et une certaine perspicacité pour dépister des dysfonctionnements souvent déroutants, qui viennent pour la plupart d'erreurs dans les fichiers de données. Il ne s'agit donc pas, loin s'en faut, d'informatique "presse-bouton".

#### *précision*

Les programmes de calcul de flux produisent également un calcul d'erreur, à la condition que l'on introduise les erreurs standard dues aux analyses et à la mesure des débits. En arrondissant à la demi-dizaine supérieure les valeurs maximales obtenues sur les sept ans de mesure, on peut annoncer des erreurs de 10% sur les flux de calcium, sodium, chlorure, et silice, 15% sur les flux de magnésium, potassium et sulfates, 20 à 30% sur les flux d'azote, de protons et d'alcalinité (sur les deux dernières années).

### III.3.2 Bilans entrées-sorties annuels

#### III.3.2.1 Sept années de bilans

Les figures n°42 à 49 et le tableau n° 39 exposent la totalité des résultats disponibles au pas de temps annuel. Il s'agit là des bilans entrées-sorties les plus simples, ne prenant en compte ni les entrées occultes en forêt, dont nous envisagerons plus loin le rôle, ni les corrections d'hétérogénéité des bassins effectuées par Dupraz pour tenter d'isoler l'effet du couvert végétal, ni les immobilisations biologiques. Ils présentent l'avantage de se baser sur les grandeurs connues avec le plus de précision, avec le minimum d'hypothèses de calcul, et peuvent ainsi être comparés plus valablement entre eux et avec les travaux effectués ailleurs. On peut de prime abord distinguer les faits suivants:

- Les trois bassins versants perdent, en quantités limitées, de la silice, du sodium, du magnésium, du potassium. Pour le calcium, les pertes sont systématiques dans la pelouse et la pessière, mais pas dans la hêtraie où le bilan est par deux fois fortement positif. Le rapport calculé en moles/eq de la silice exportée sur la somme des cations Ca, Mg, K, Na exportés (pertes nettes) nous apprend que la silice est plus exportée que les cations "basiques" dans la hêtraie ( $Si/\Sigma bases = 2,9$ ), autant que les cations dans la pelouse ( $Si/\Sigma bases = 1,1$ ), et moins dans la pessière ( $Si/\Sigma bases = 0,7$  avant 1986). A Aubure, ce rapport est beaucoup plus faible ( $\approx 0,35$ , PROBST et DAMBRINE, 1988).
- Les trois bassins accumulent du soufre et de l'azote inorganique, cette accumulation étant la moins nette sous résineux.
- Les trois bassins présentent un bilan sensiblement équilibré pour le chlore.
- La pelouse et la pessière ont des bilans en cations et Silice plus négatifs que la hêtraie, la pessière a des bilans en soufre et chlore plus négatifs, ou moins positifs, que les deux autres bassins.
- La pessière dégradée se démarque fortement par une augmentation considérable des pertes en cations, accompagnés d'une libération de nitrates. Les bilans des autres éléments semblent peu modifiés.
- Ces bilans sont assez variables d'une année à l'autre, sauf pour la silice, cette variabilité étant essentiellement le fait des entrées, mais ils varient dans le même sens pour les trois bassins, même si ces variations semblent plus amorties dans la hêtraie, surtout pour le Calcium.

S'il est déjà délicat de comparer les bilans de trois bassins proches étudiés par la même équipe, il est nécessaire de regarder avec prudence les comparaisons avec d'autres sites. Aussi nous contenterons nous d'une comparaison très globale avec deux études souvent citées ici et une moyenne de nombreux travaux en milieu tempéré ou boréal, sur roches siliceuses, calculée par Avila et Rodà

|         | Ca |      |      | Mg    |     |      | K     |     |     | Na   |      |      | Cl    |      |      | S-SO4 |      |      | MO3  |   |       | NH4    |     |       | SI     |      |       |       |
|---------|----|------|------|-------|-----|------|-------|-----|-----|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|---|-------|--------|-----|-------|--------|------|-------|-------|
|         | E  | S    | E-S  | E     | S   | E-S  | E     | S   | E-S | E    | S    | E-S  | E     | S    | E-S  | E     | S    | E-S  | E    | S | E-S   | E      | S   | E-S   | E      | S    | E-S   |       |
| 1981-82 | P  | 7,5  | 14,0 | -6,5  | 1,8 | 4,1  | -2,3  | 1,9 | 3,2 | -1,3 | 10,6 | 13,9 | -3,3  | 20,2 | 15,1 | 5,1   | 13,9 | 11,2 | 2,7  | - | (0,3) | -      | 4,8 | (0)   | (4,8)  | 0,4  | 16,4  | -16,0 |
|         | H  | 7,7  | 8,8  | -1,1  | 1,9 | 3,4  | -1,5  | 1,9 | 2,0 | -0,1 | 11,6 | 12,5 | -0,9  | 22,4 | 15,2 | 7,2   | 13,9 | 9,9  | 4,0  | - | (0,5) | -      | 4,9 | (0)   | (4,9)  | 0,4  | 15,2  | -14,8 |
|         | E  | 7,5  | 14,6 | -7,1  | 1,8 | 5,5  | -3,7  | 1,9 | 2,6 | -0,7 | 10,6 | 13,8 | -3,2  | 20,2 | 17,8 | 2,4   | 13,9 | 15,1 | -1,1 | - | (0,9) | -      | 4,8 | (0,1) | (4,7)  | 0,4  | 15,0  | -14,6 |
| 1982-83 | P  | 19,5 | 19,3 | 0,2   | 2,5 | 5,5  | -3,0  | 3,0 | 4,5 | -1,5 | 15,7 | 19,1 | -3,4  | 21,8 | 18,7 | 3,1   | 20,2 | 16,7 | 3,5  | - | -     | (11,0) | -   | 0,1   | (1,0)  | 19,6 | -19,5 |       |
|         | H  | 16,5 | 10,8 | 5,7   | 2,2 | 4,3  | -2,1  | 2,6 | 3,4 | -0,8 | 13,3 | 15,5 | -2,2  | 18,5 | 18,8 | -0,3  | 17,1 | 13,6 | 3,5  | - | -     | (9,3)  | -   | 0,1   | (7,5)  | 17,5 | -17,4 |       |
|         | E  | 18,9 | 20,0 | -1,1  | 2,5 | 7,5  | -5,0  | 3,0 | 4,6 | -1,6 | 15,3 | 17,8 | -2,5  | 21,3 | 24,5 | -3,2  | 19,8 | 19,5 | 0,3  | - | -     | (10,7) | -   | 0,1   | (18,8) | 18,7 | -     |       |
| 1983-84 | P  | 5,8  | 14,3 | -8,5  | 2,0 | 3,7  | -1,7  | 1,8 | 3,7 | -1,9 | 8,5  | 13,0 | -4,5  | 16,7 | 15,3 | 1,4   | 20,2 | 10,0 | 10,2 | - | -     | -      | 3,1 | (0,1) | (3,0)  | 0,3  | 12,7  | -12,4 |
|         | H  | 5,6  | 7,1  | -1,5  | 2,0 | 2,7  | -0,7  | 1,7 | 1,7 | 0,0  | 8,1  | 10,1 | -2,0  | 16,4 | 14,3 | 2,1   | 19,6 | 8,6  | 11,1 | - | -     | -      | 3,2 | (0,3) | (2,9)  | 0,3  | 9,1   | -8,8  |
|         | E  | 5,9  | 13,5 | -7,6  | 2,0 | 5,1  | -3,1  | 1,8 | 2,7 | -0,9 | 8,6  | 12,0 | -3,4  | 16,8 | 16,7 | 0,1   | 20,2 | 10,7 | 9,5  | - | -     | -      | 3,1 | (0,2) | (2,9)  | 0,3  | 12,0  | -11,7 |
| 1984-85 | P  | 11,8 | 21,0 | -9,2  | 1,8 | 5,0  | -3,2  | 2,1 | 5,1 | -3,0 | 10,0 | 17,4 | -7,4  | 16,9 | 18,4 | -1,5  | 21,4 | 11,5 | 10,0 | - | -     | -      | 4,8 | (0,1) | (4,7)  | 1,9  | 21,1  | -19,2 |
|         | H  | 11,1 | 10,7 | 0,4   | 1,8 | 4,2  | -2,4  | 2,1 | 3,7 | -1,6 | 9,6  | 15,5 | -5,9  | 16,2 | 18,1 | -1,9  | 21,4 | 11,5 | 9,9  | - | -     | -      | 4,9 | (0,3) | (4,6)  | 1,9  | 19,4  | -17,5 |
|         | E  | 11,8 | 19,9 | -8,1  | 1,9 | 8,2  | -6,3  | 2,1 | 5,4 | -3,3 | 10,0 | 18,6 | -8,6  | 16,9 | 22,5 | -5,6  | 21,5 | 16,6 | 5,0  | - | -     | -      | 4,8 | (0,3) | (4,5)  | 2,0  | 19,4  | -17,4 |
| 1985-86 | P  | 16,5 | 16,3 | 0,2   | 2,4 | 4,3  | -1,9  | 3,2 | 3,9 | -0,7 | 12,3 | 15,2 | -2,9  | 20,0 | 15,7 | 4,3   | 16,6 | 15,8 | 0,8  | - | -     | -      | 2,2 | (0,1) | (2,1)  | 0,5  | 14,8  | -14,3 |
|         | H  | 16,4 | 10,6 | 5,8   | 2,4 | 3,5  | -1,1  | 3,5 | 1,8 | 1,7  | 12,2 | 12,1 | 0,1   | 19,5 | 15,8 | 3,7   | 16,9 | 15,8 | 1,1  | - | -     | -      | 2,3 | (0)   | (2,3)  | 0,5  | 11,8  | -11,3 |
|         | E  | 17,0 | 18,7 | -0,3  | 2,5 | 6,1  | -3,6  | 3,4 | 2,9 | 0,5  | 12,4 | 15,3 | -2,9  | 20,2 | 18,2 | 2,0   | 16,9 | 20,8 | -3,8 | - | -     | -      | 2,4 | (0)   | (2,4)  | 0,5  | 12,9  | -12,4 |
| 1986-87 | P  | 10,2 | 16,5 | -6,3  | 2,8 | 4,5  | -1,7  | 3,8 | 6,1 | -2,3 | 12,7 | 18,5 | -5,8  | 17,5 | 20,8 | -3,3  | 25,2 | 17,1 | 8,1  | - | -     | -      | 7,3 | 0,9   | 6,4    | 0,5  | 17,7  | -17,2 |
|         | H  | 10,0 | 11,1 | -1,1  | 2,7 | 3,8  | -1,1  | 3,8 | 3,1 | 0,7  | 12,7 | 17,1 | -4,4  | 17,5 | 18,0 | -0,5  | 24,0 | 14,7 | 9,3  | - | -     | -      | 7,0 | 0,8   | 6,2    | 0,4  | 17,0  | -16,6 |
|         | E  | 10,1 | 19,6 | -9,5  | 2,8 | 6,8  | -4,0  | 3,7 | 4,9 | -1,2 | 12,7 | 18,9 | -6,2  | 17,5 | 23,4 | -5,9  | 24,8 | 19,0 | 5,7  | - | -     | -      | 7,1 | 1,0   | 6,1    | 0,5  | 16,2  | -15,7 |
| 1987-88 | P  | 17,6 | 20,1 | -2,5  | 3,6 | 6,1  | -2,5  | 6,4 | 7,7 | -1,3 | 16,5 | 21,9 | -5,4  | 26,3 | 22,6 | 3,7   | 27,6 | 20,0 | 7,6  | - | -     | -      | 6,3 | 0,5   | 5,8    | 0,2  | 16,9  | -16,7 |
|         | H  | 15,9 | 13,0 | 2,9   | 3,2 | 5,2  | -2,0  | 5,7 | 4,3 | 1,4  | 16,1 | 21,3 | -5,2  | 25,7 | 23,4 | 2,3   | 25,1 | 18,1 | 7,0  | - | -     | -      | 5,6 | 0,5   | 5,1    | 0,2  | 16,9  | -16,7 |
|         | E  | 17,5 | 43,7 | -26,2 | 3,6 | 15,1 | -11,5 | 6,3 | 8,7 | -2,4 | 16,1 | 31,8 | -15,7 | 25,7 | 34,8 | -9,1  | 27,2 | 22,9 | 4,3  | - | -     | -      | 6,2 | 7,0   | -0,8   | 0,2  | 19,3  | -19,1 |
| Moynne  | P  | 12,2 | 17,0 | -4,8  | 2,1 | 4,5  | -2,4  | 2,4 | 4,1 | -1,7 | 11,4 | 15,7 | -4,3  | 19,1 | 16,6 | 2,5   | 18,5 | 13,0 | 5,4  | - | -     | -      | 4,2 | (0,1) | (4,1)  | 0,7  | 16,9  | -16,3 |
|         | H  | 11,5 | 9,6  | 1,9   | 2,0 | 3,6  | -1,6  | 2,3 | 2,5 | -0,2 | 11,0 | 13,1 | -2,2  | 18,6 | 16,4 | 2,2   | 17,8 | 11,9 | 5,9  | - | -     | -      | 4,3 | (0,2) | (4,1)  | 0,6  | 14,6  | -14,0 |
|         | E  | 12,2 | 16,9 | -4,7  | 2,1 | 6,5  | -4,4  | 2,4 | 3,6 | -1,2 | 11,4 | 15,5 | -4,1  | 19,1 | 19,9 | -0,8  | 18,5 | 16,5 | 2,0  | - | -     | -      | 4,2 | (0,2) | (4)    | 0,7  | 15,6  | -15,0 |
| Moynne  | P  | 12,7 | 17,4 | -4,6  | 2,4 | 4,7  | -2,3  | 3,2 | 4,9 | -1,7 | 12,3 | 17,0 | -4,7  | 19,9 | 18,1 | 1,8   | 20,7 | 14,6 | 6,1  | - | -     | -      | 5,6 | 0,3   | 5,3    | 0,6  | 17,0  | -16,5 |
|         | H  | 11,9 | 10,3 | 1,6   | 2,3 | 3,9  | -1,6  | 3,0 | 2,9 | 0,2  | 12,0 | 14,9 | -2,9  | 19,5 | 17,7 | 1,8   | 19,7 | 13,2 | 6,6  | - | -     | -      | 5,3 | 0,4   | 4,9    | 0,6  | 15,3  | -14,7 |
|         | E  | 12,7 | 21,1 | -8,5  | 2,4 | 7,8  | -5,3  | 3,2 | 4,5 | -1,4 | 12,2 | 18,3 | -6,1  | 19,8 | 22,6 | -2,7  | 20,6 | 17,8 | 2,8  | - | -     | -      | 5,6 | 1,4   | 4,2    | 0,6  | 16,2  | -15,7 |

Tableau 39: Flux entrées-sorties et bilans annuels pour les trois bassins-versants du Mont-Lozère

E: entrées par les pluies hors couvert S: sorties par les rivières

P: pelouse (Cloutasses)

H: hêtres (Sapine)

E: épicéas (Latte)

Les chiffres entre parenthèses reposent sur peu de données

Valeurs en Kg/ha/an

| Auteur                                   | Localisation      | Période | Ca    | Mg   | K    | Na    | Cl    | S-SO4 | N-NO3 | N-NH4 | SI    |
|--|-------------------|---------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Avila (87)                               | Montseny(Esp.)    | 84-85   | -0,2  | -5,7 | -0,2 | -17,8 | -1,7  | -4,3  | 2,7   | 2,9   | -     |
| Probat et al. (89)                       | Aubure(Vosges,F.) | 86-87   | -34,4 | -7,4 | -6,3 | -12,5 | 0     | -13,7 | 4,8   | 4,4   | -37,6 |
| Bassins-versants boreaux et tempérés (1) | moyenne           | --      | -6,5  | -1,2 | -5,7 | 1,8   | -0,09 | 1,3   | 2     | 19,6  |       |
|  | n                 |         | 9,4   | 3,2  | 2,1  | 5,5   | 5     | 3,9   | 2,2   | 1,6   | 6,3   |
|  | n                 |         | 31    | 31   | 31   | 31    | 14    | 18    | 27    | 26    | 7     |

Tableau 40: Bilans entrées-sorties de divers bassins-versants

(1): d'après Avila et Rodà, 88, sauf Si: d'après données de PACES, 85, KATZ et al, 85, BOUCHARD, 83, YUREVITCH et BATCHELDER, 88, LIKENS et al, 79. Valeurs en kg/ha/an

Figure 42: Bilans moyens annuels 81-86

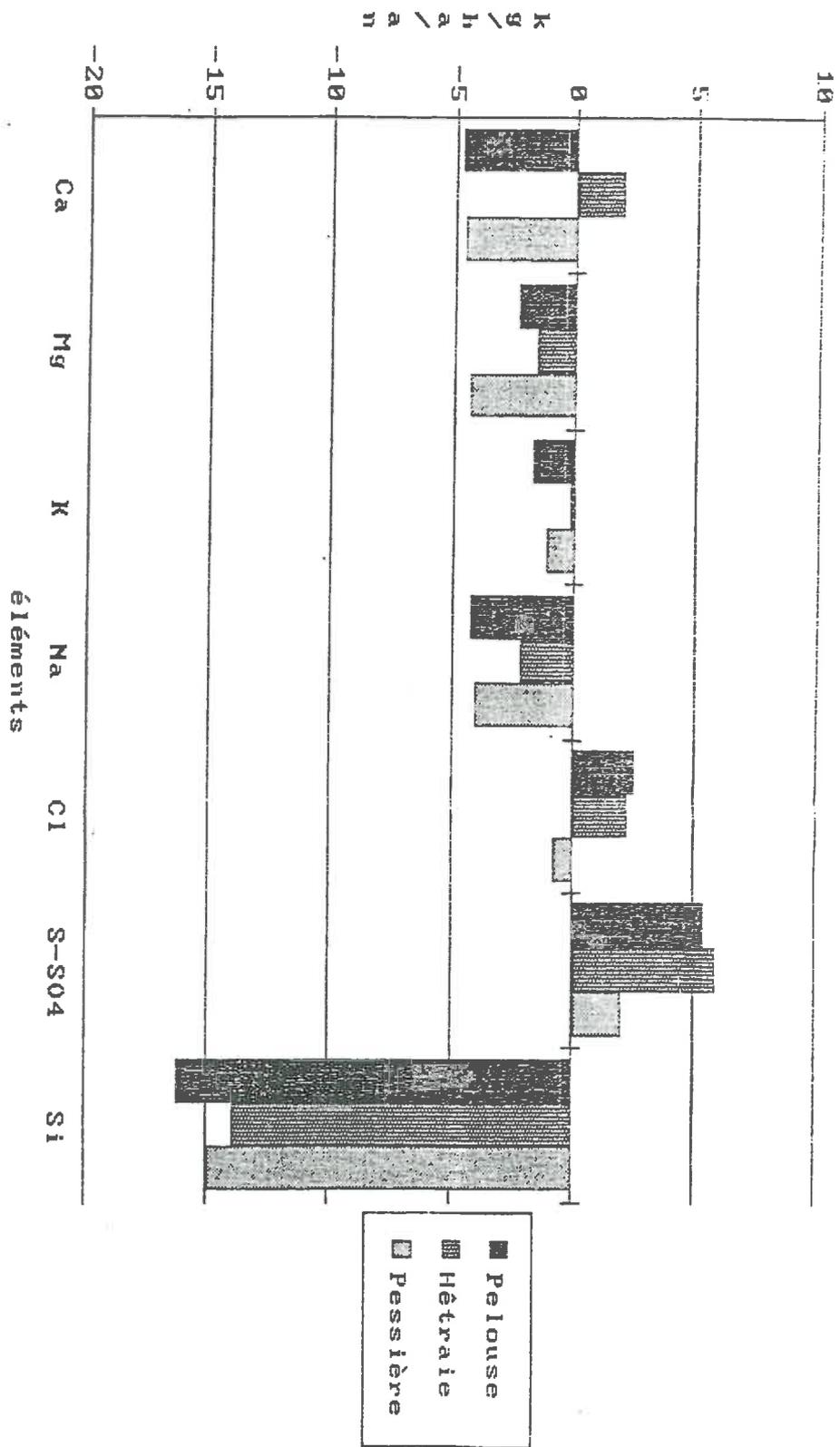


Figure 43 Bilans 1981-82

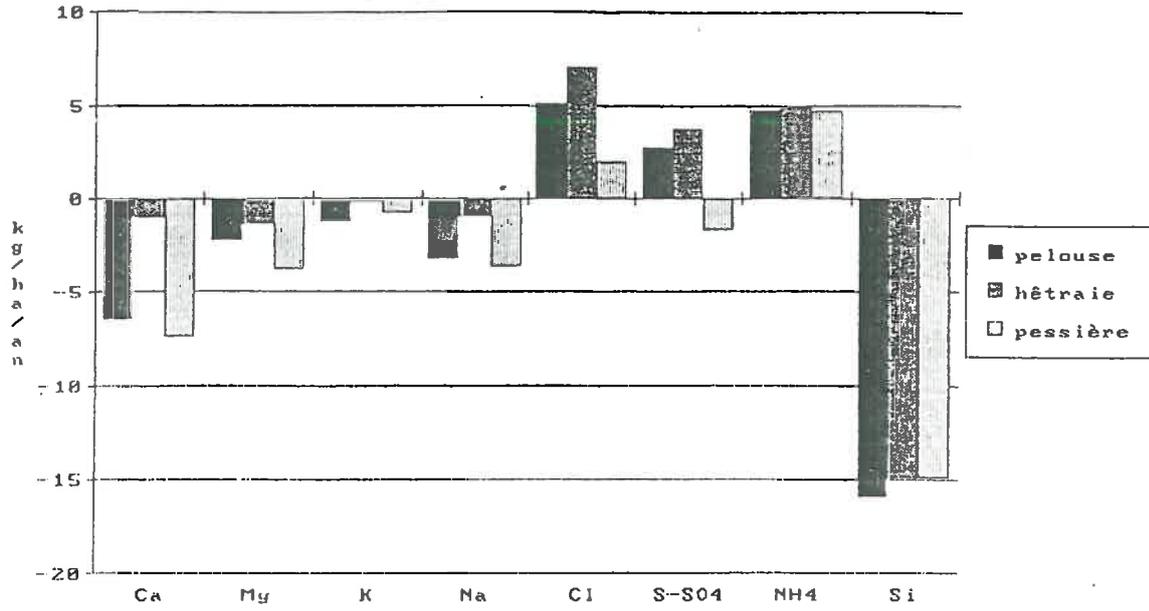


Figure 44 Bilans 1982-83

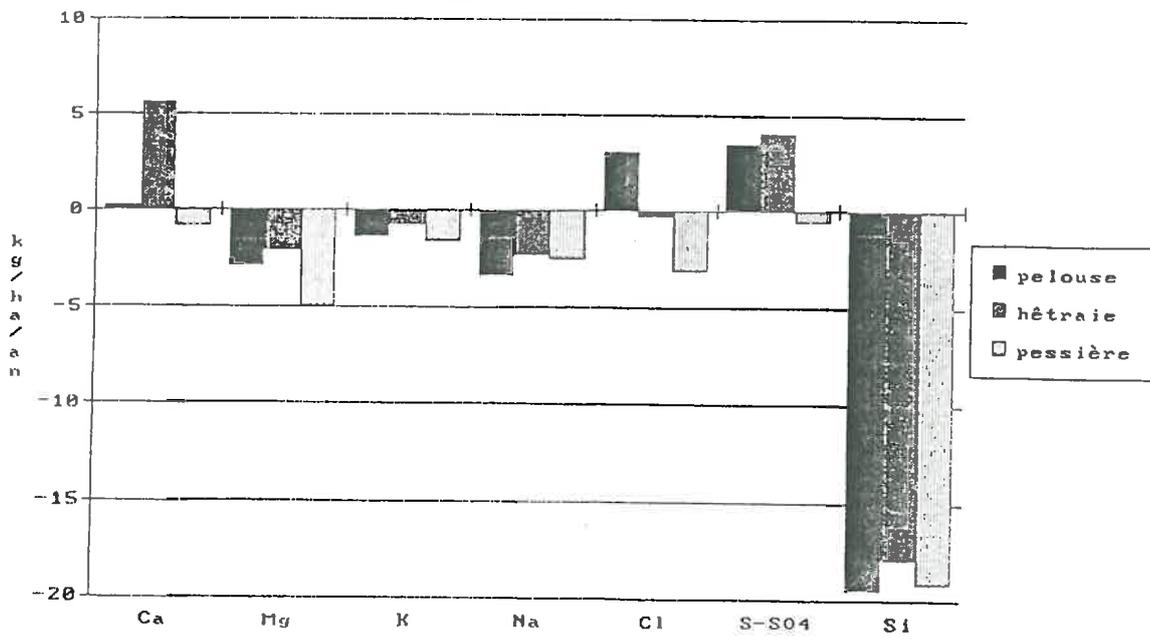


Figure 45 Bilans 1983-84

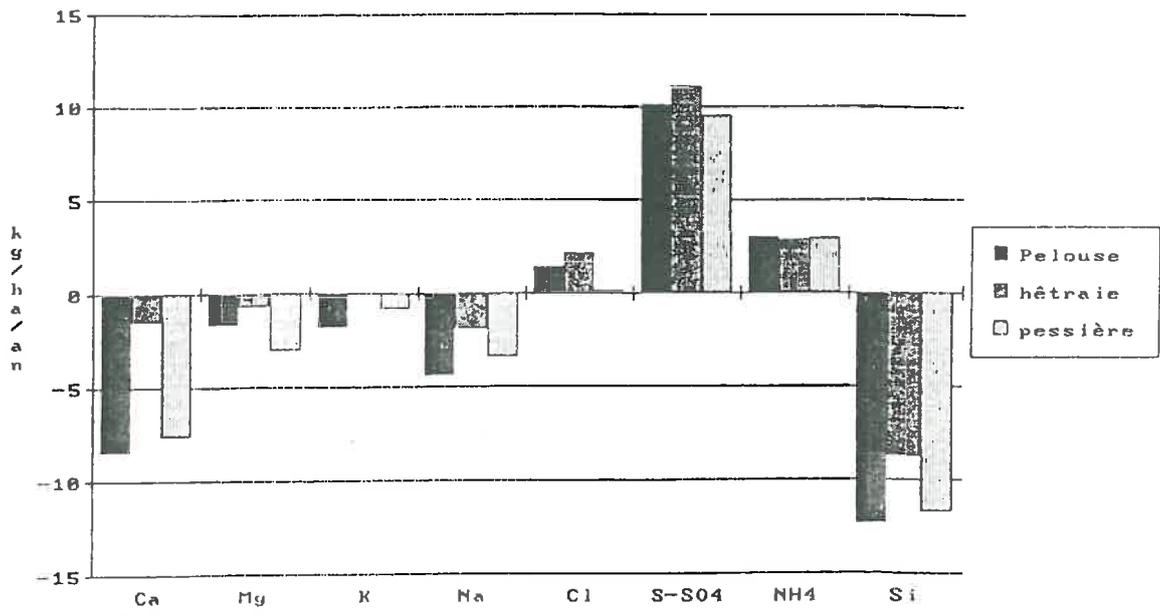


Figure 46 Bilans 1984-85

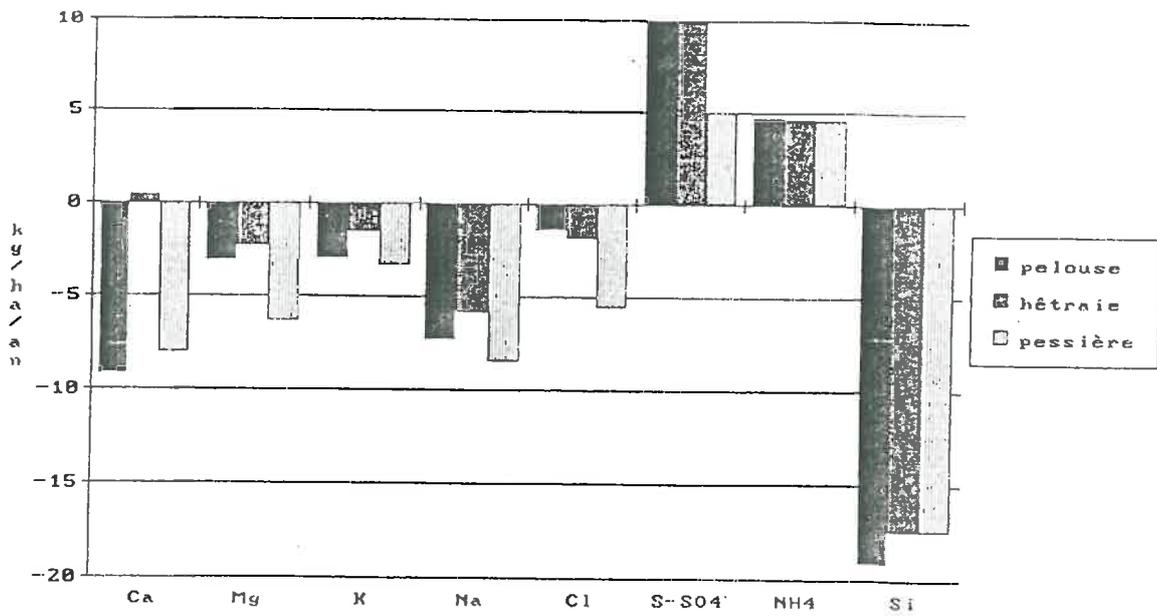


Figure 47 Bilans 1986-87

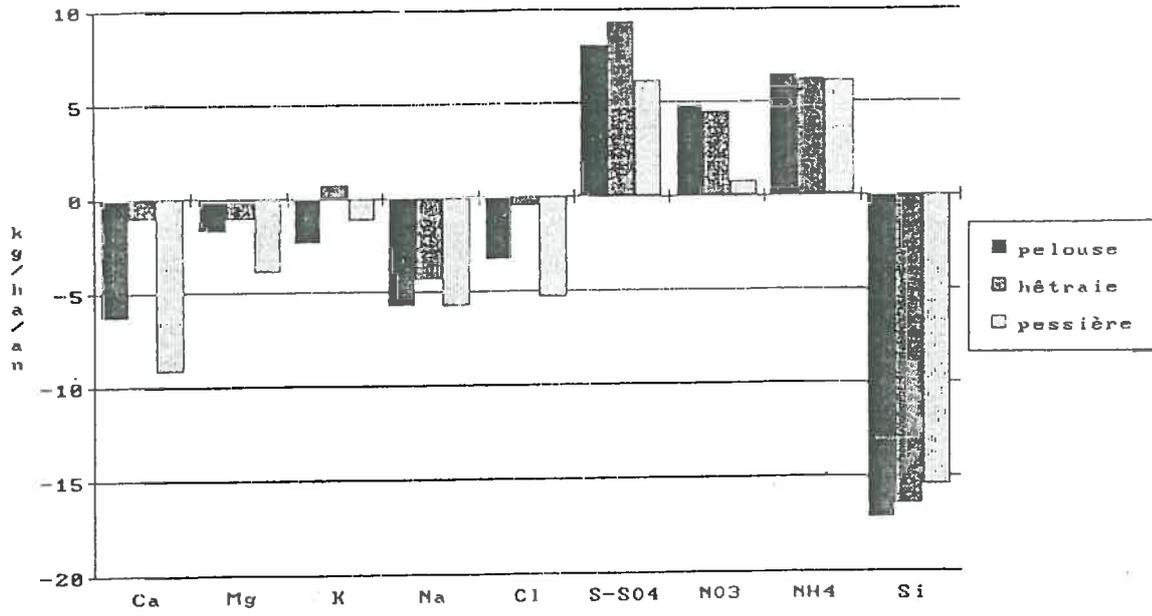


Figure 48 Bilans 1985-86

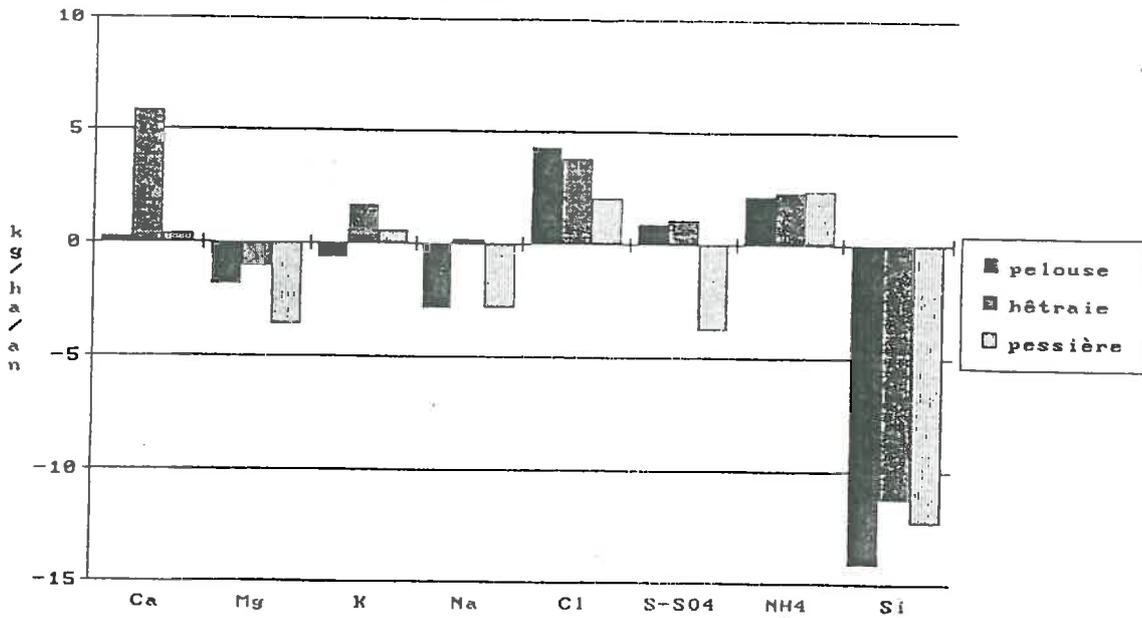
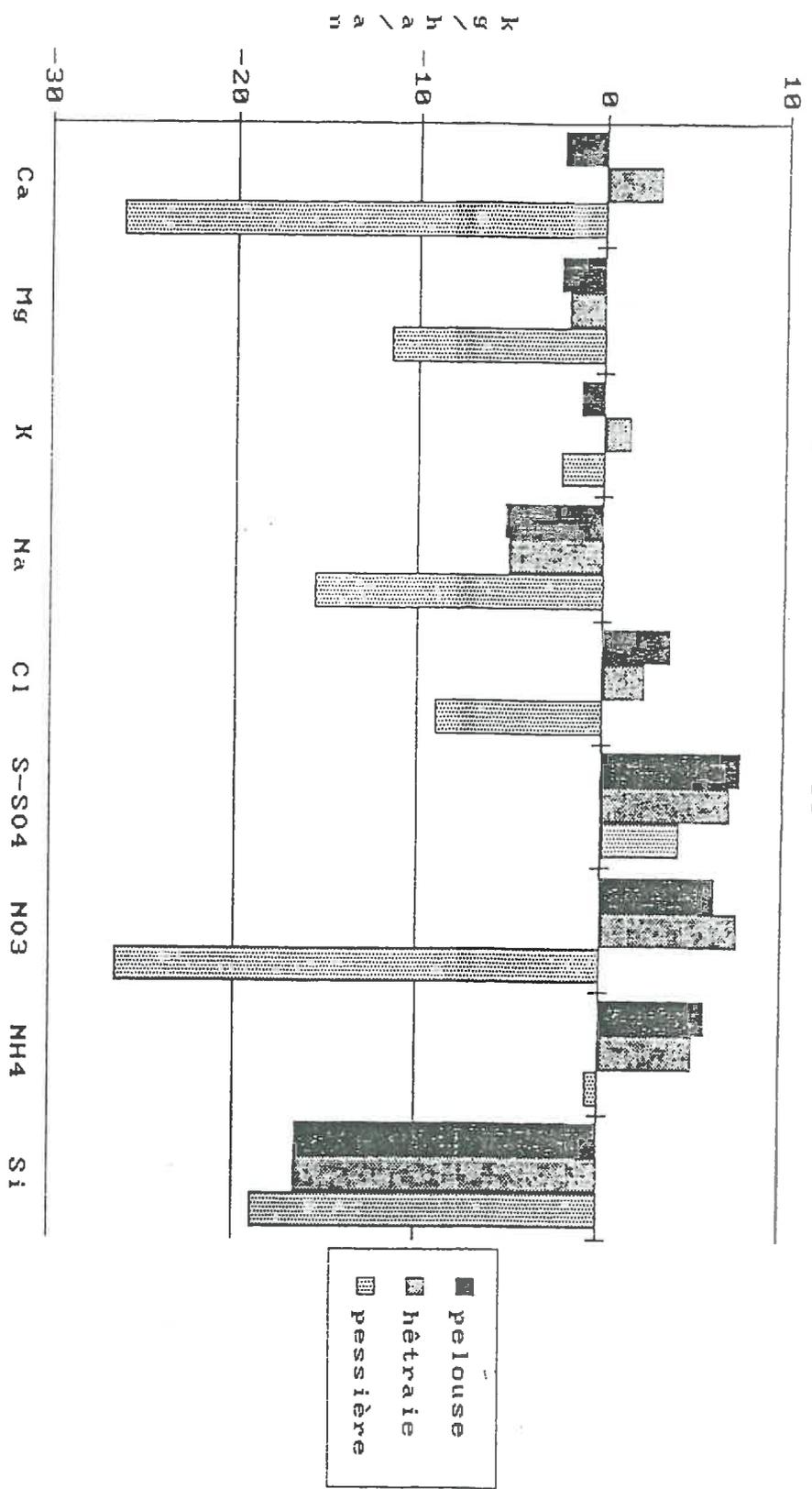


Figure 49 Bilans 1987--88



(1988) (sauf pour Si, Tableau n°40). Les mêmes grandes tendances se retrouvent généralement: pertes en silice et en cations, gain en azote minéral, bilans relativement équilibrés pour le chlore. Les bassins du Mont-Lozère se situent à des niveaux d'exportations assez bas, les fortes entrées (cf. chap II) n'étant pas compensées par des sorties plus élevées qu'ailleurs. Ainsi le taux de dénudation cationique (somme des exportations nettes de Ca, Mg, K, Na) est d'environ 0,2 keq/ha/an dans la hêtraie, 0,5 keq/ha/an dans la pelouse et 0,8 keq/ha/an dans la pessière (avant 86), et il est en moyenne de 0,82 keq/ha/an dans les 31 études compilées par Avila et Rodà. Le bilan positif du calcium à La Sapine a été rarement observé ailleurs, (p. ex. LEWIS et GRANT, 1979), et les bilans de soufre sont parfois positifs (BULDGEN et REMACLE, 1984), souvent négatifs, les bilans négatifs ayant été attribués tantôt à une sous-estimation des entrées (cf. DUPRAZ, 1984), tantôt à une acidification plus poussée (KHANNA et al., 1987, LELONG et al., 1988), ce sur quoi nous reviendrons dans la conclusion.

#### III.3.2.2. Prise en compte des dépôts occultes

Les estimations de dépôts occultes pour les cycles 86-87 et 87-88 dans les deux forêts, à partir des pluviométriques (v. chap. II) permettent de calculer des bilans tenant compte de l'ensemble des entrées atmosphériques, en considérant que la végétation arborée sur laquelle s'effectue les dépôts occultes occupe 80% de la surface du bassin à la Sapine, 85% à la Latte et 2 fois 5% aux Cloutasses), (Figures 50 et 51). L'observation des résultats (principalement pour le cycle 86-87, où les effets de la dégradation sanitaire du peuplement résineux ne sont pas encore trop sensibles appelle plusieurs commentaires:

- Les bilans du chlore des deux forêts deviennent très déséquilibrés, accusant une accumulation de plus de 10kg/ha.

- Les bilans de cations (en particulier de Na et de K) tendent à devenir positifs, en opposition avec la pelouse et les données de la littérature.

- Les bilans du soufre dénotent également une forte accumulation, que l'on pourrait situer autour de 10kg/ha/an dans la pelouse, 15kg/ha/an dans la hêtraie et 20kg/ha/an dans la pessière. A ce rythme, le temps nécessaire à la constitution du stock actuel de soufre dans les sols (Vannier, 87) serait de l'ordre de 100 ans pour la pelouse et la hêtraie, 70 ans pour la pessière. Sans compter les dépôts secs, on obtient respectivement 200, 250 et 400 ans.

On obtient donc des bilans assez peu vraisemblables pour le chlore, le sodium, le potassium, mais encore plausibles pour le soufre, le calcium et le magnésium. Passons en revue les causes d'erreurs possibles:

- Une sous-estimation des sorties dans les bassins forestiers; elle pourrait provenir d'une surestima-

Figure 50 BILANS 1986-87 (avec dépôts secs)

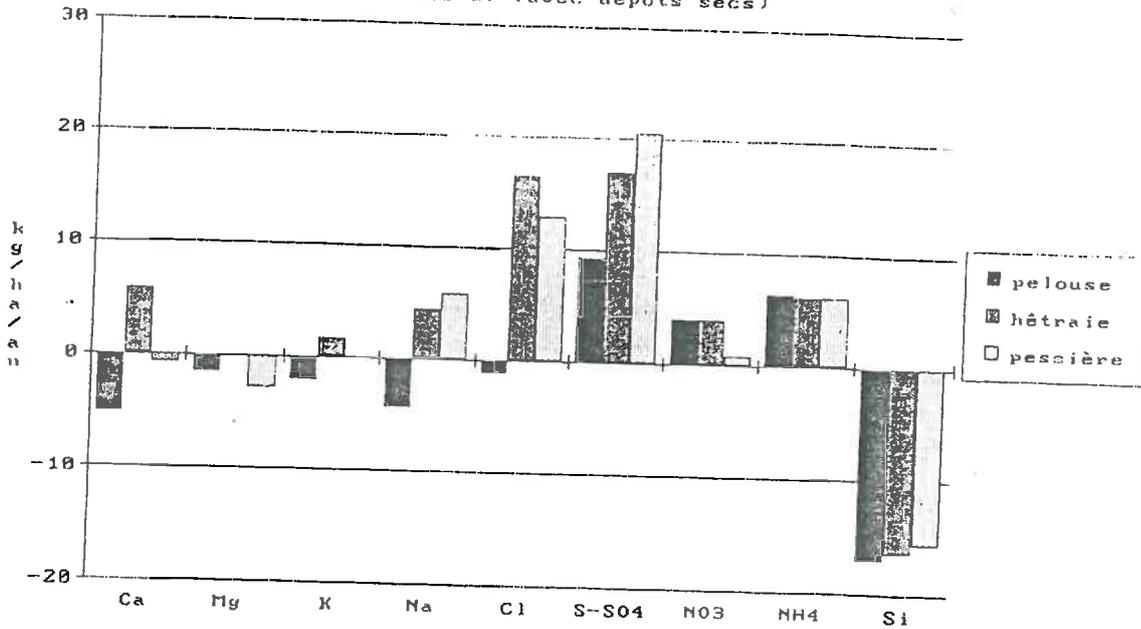
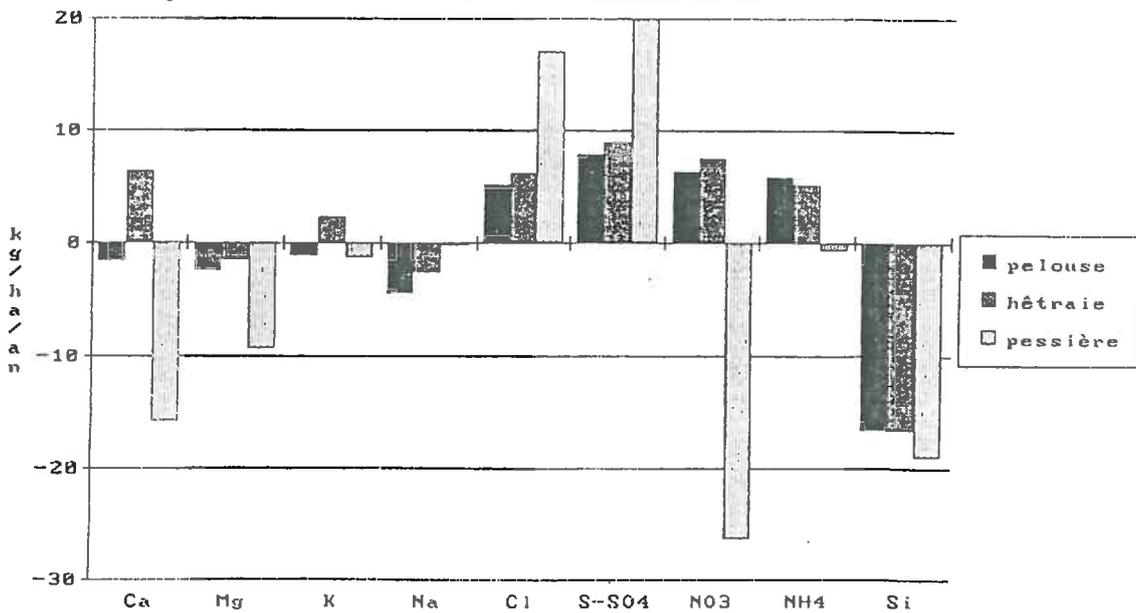


Figure 51 BILANS 1987-88 (avec dépôts secs)



tion de la superficie des bassins (possible à la Latte, cf. DUPRAZ), de sous-écoulements ou de pertes dans les fractures du granite (possible sur les trois bassins, cf. GUÉRIN, 1987, MIELLET et SCHMITT, 1988), de mauvaises courbes de tarage (Les premières investigations de Cosandey à ce sujet vont plutôt dans le sens d'une surestimation, comm. or.), d'erreurs dans le calcul du flux écoulé (peu probable, cf. § III.3.1).

-Une surestimation de la lame d'eau sous couvert (=sous-estimation de l'interception), possible pour le cycle 86-87, mais à exclure pour le cycle 87-88, les valeurs obtenues pour l'interception apparaissant comme un maximum (v. chap. II).

-Une surestimation de la part due aux dépôts occultes dans la composition des pluviollessivats. On l'a vu, les coefficients utilisés sont un peu arbitraires, et ils influent fortement sur le résultat final. On peut penser que pour les cations, ces coefficients sont peut être surestimés. De même pour le soufre, qui n'est pas complètement absent des tissus végétaux. Il n'en reste pas moins que pour le chlore, par exemple, on ne peut guère concevoir qu'un pourcentage important de la concentration des pluviollessivats provient du turn-over biologique. Ce n'est donc pas la seule explication.

-Une surestimation des concentrations des pluviollessivats. là aussi, l'explication est plausible, d'une part à cause des pollutions éventuelles (il est difficile de maintenir propres les dispositifs de prélèvements en forêt), d'autre part on a vu que la variabilité très forte n'est pas maîtrisée par un nombre suffisant de points de prélèvement.

On le voit donc, la plupart de ces sources d'erreur mériterait une soigneuse vérification, et l'on est encore loin d'un résultat sûr. En attendant, on peut retenir que l'estimation proposée est une valeur par excès, surtout pour Cl, Na, K et Ca. En tout état de cause, cela ne remet pas en cause les conclusions exposées plus haut, à une exception près, qui est importante: l'accumulation de soufre n'est pas moins importante à La Latte, au contraire, et les exportations plus fortes par la rivière traduisent peut-être une certaine saturation des capacités de rétention des sols. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point.

### III.3.3. Les bilans mensuels

#### III.3.3.1 tendances générales

Les figures n° 52 à 54 présentent les moyennes mensuelles des flux entrant et sortant des trois bassins-versants sur les sept ans. Pour interpréter valablement les bilans à pas de temps court, il est indispensable de garder à l'esprit les fluctuations des lames d'eaux incidentes et

Figure 52: Flux moyens mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88

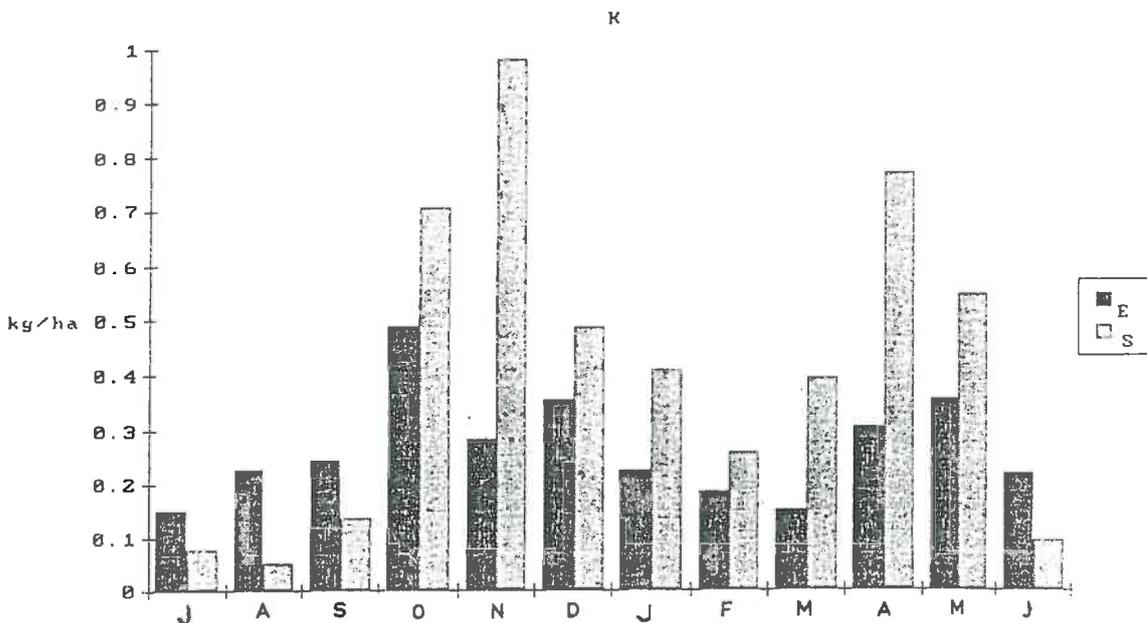
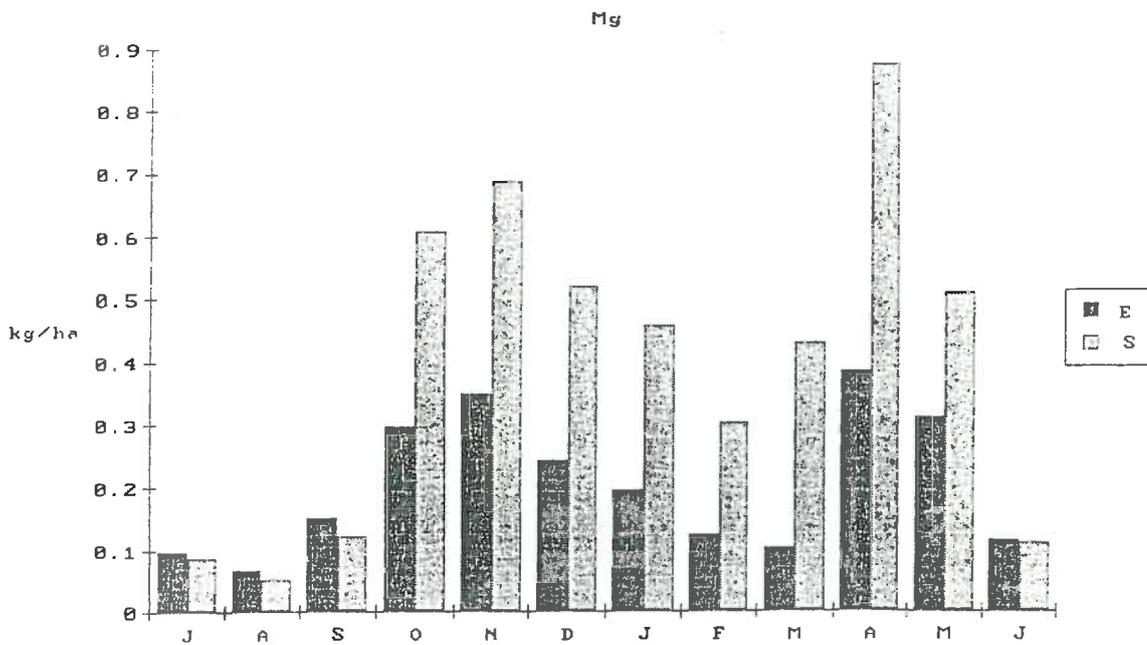
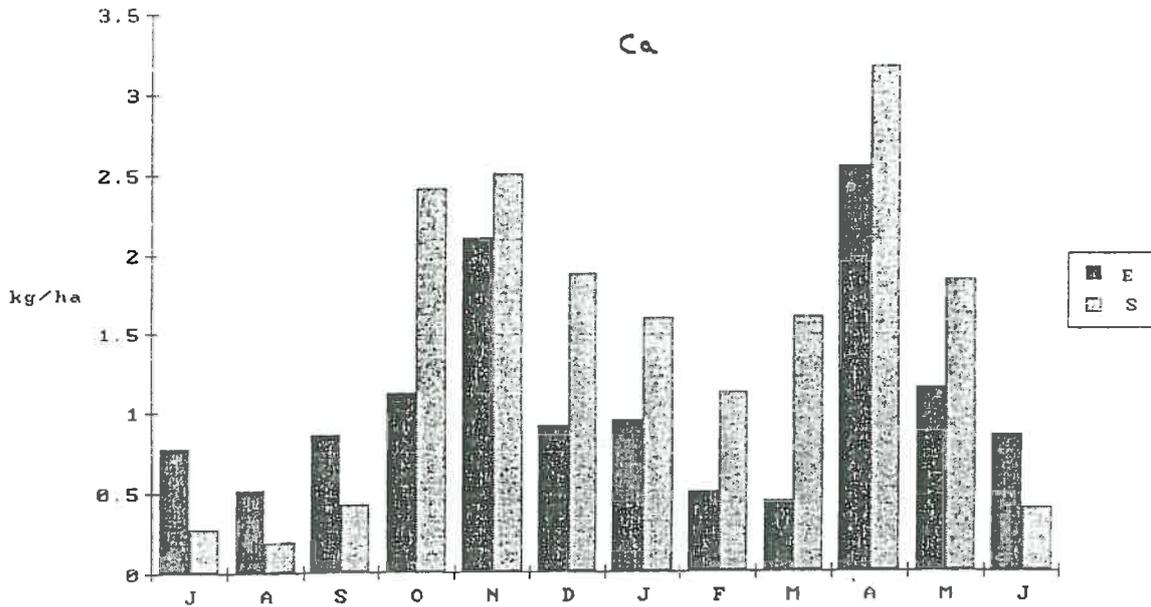


Figure 52: Flux moyens mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88

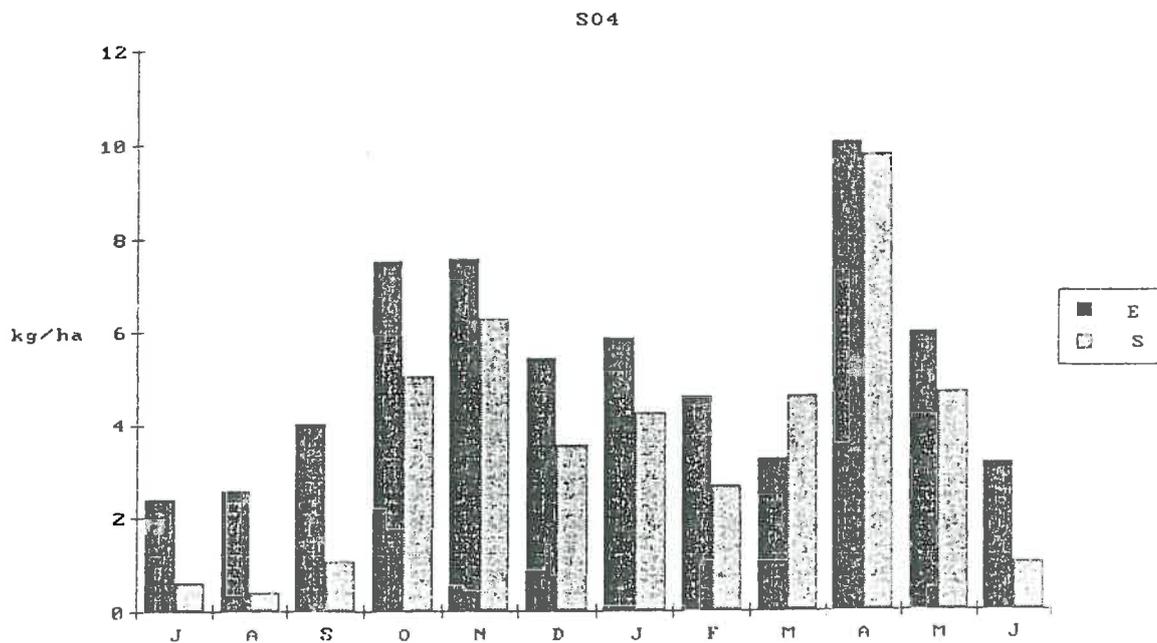
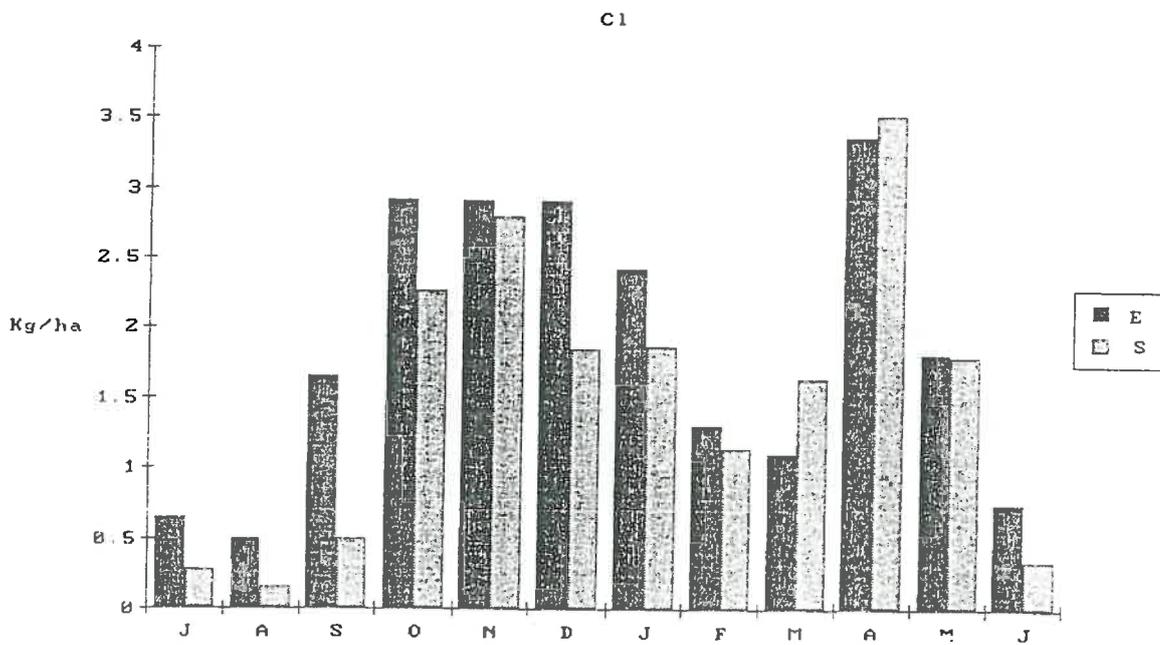
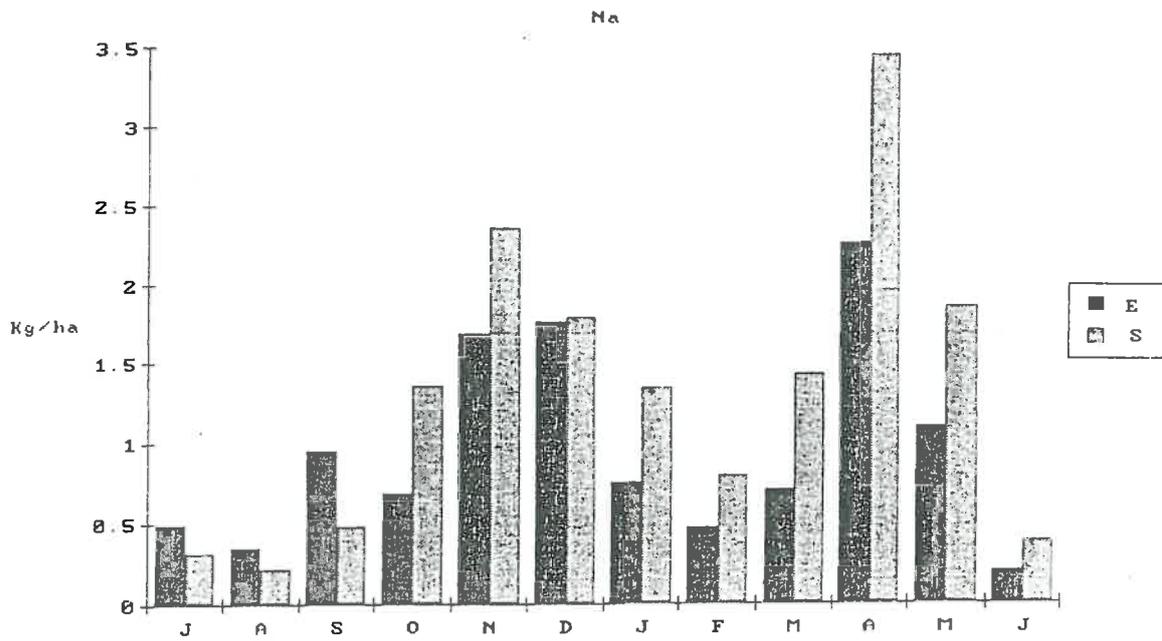


Figure 52: Flux moyens mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88

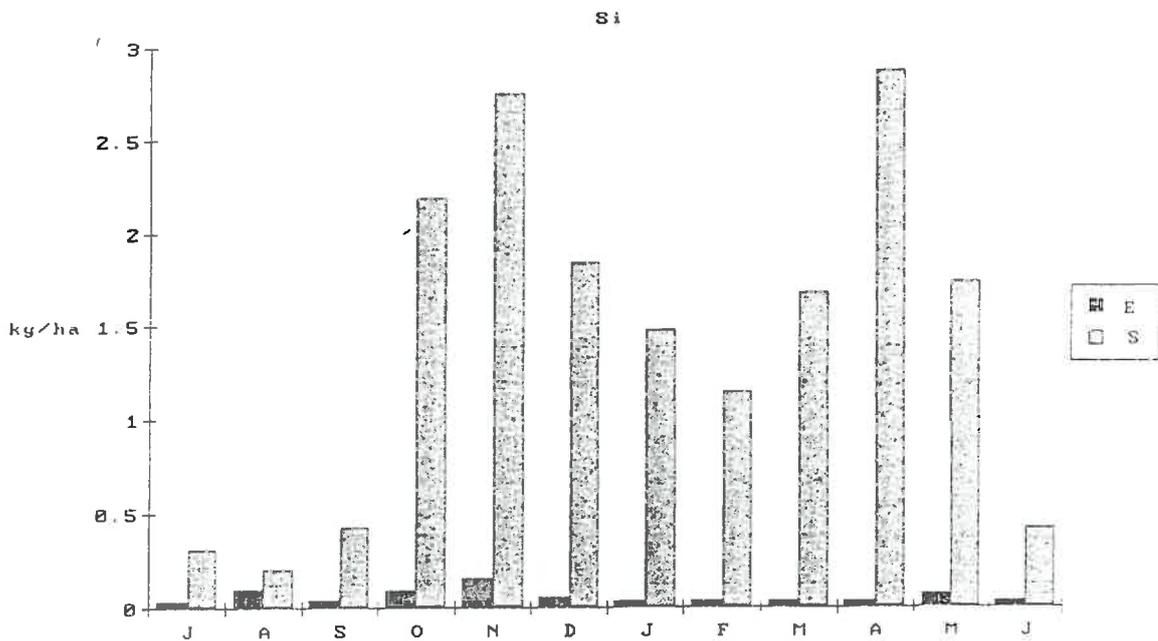
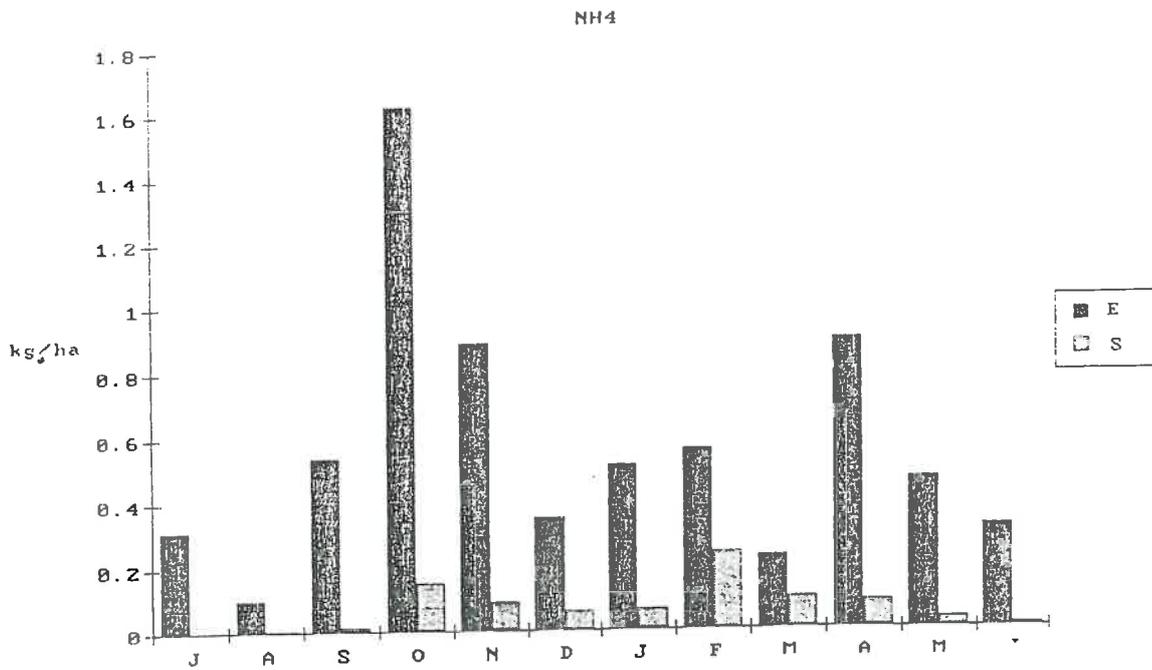
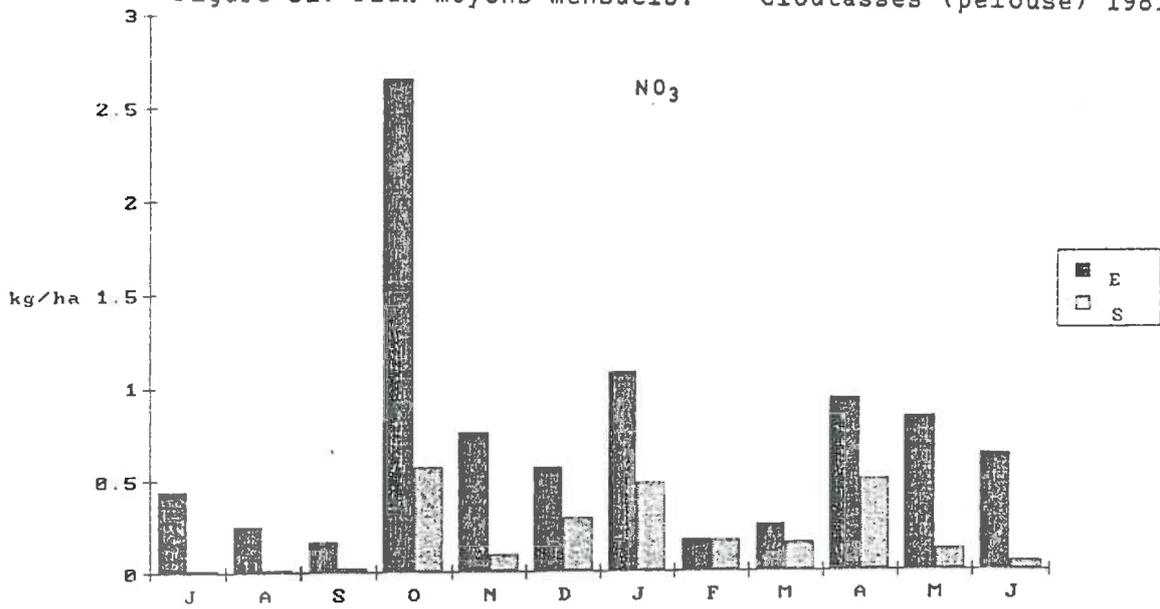


Figure 53: Flux moyens mensuels. Sapine (hêtretraie) 1981-88

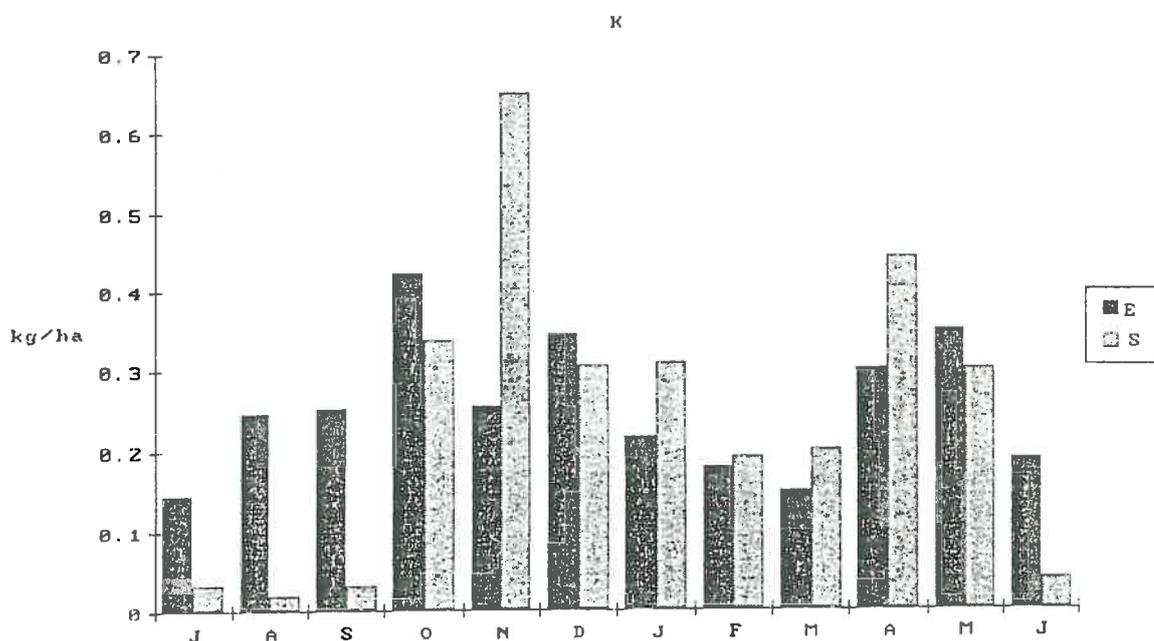
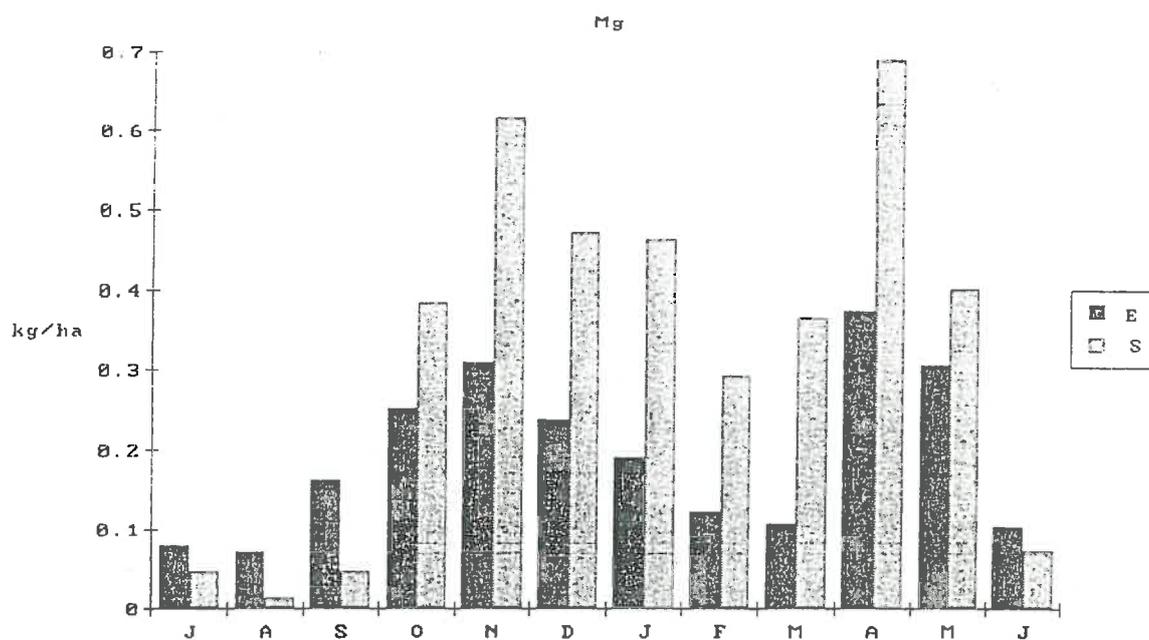
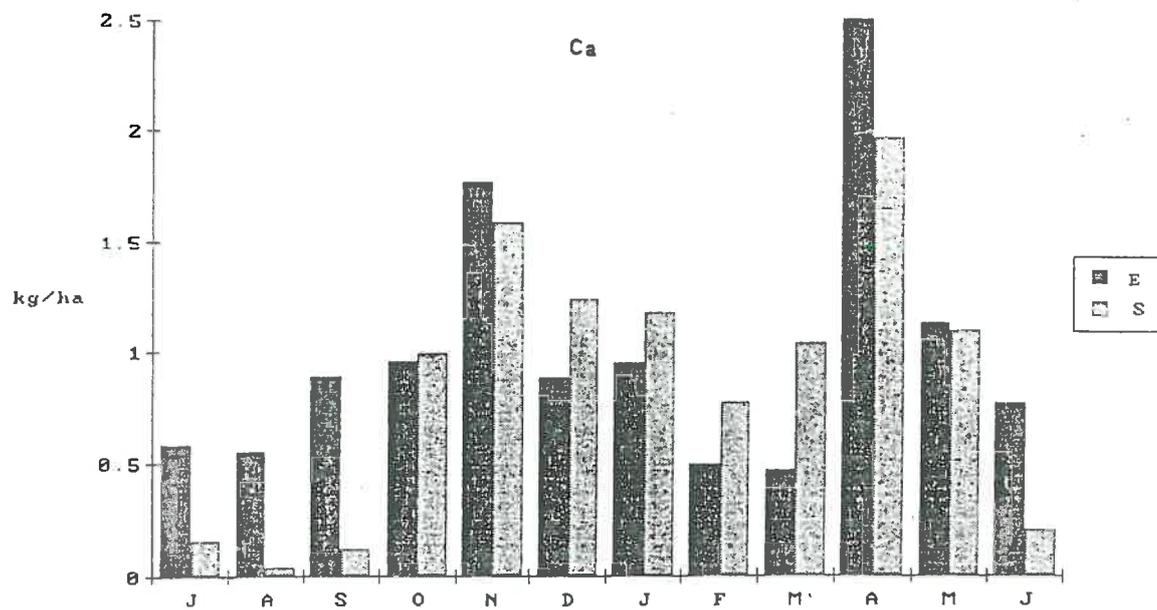


Figure 53: Flux moyens mensuels. Sapine (hêtraie) 1981-88

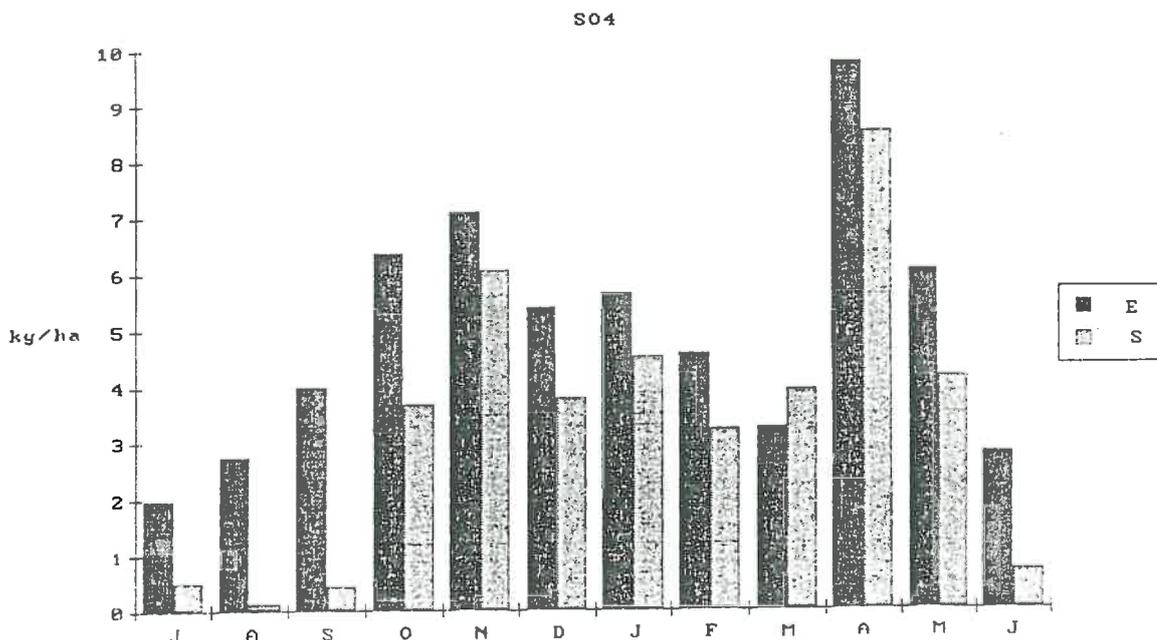
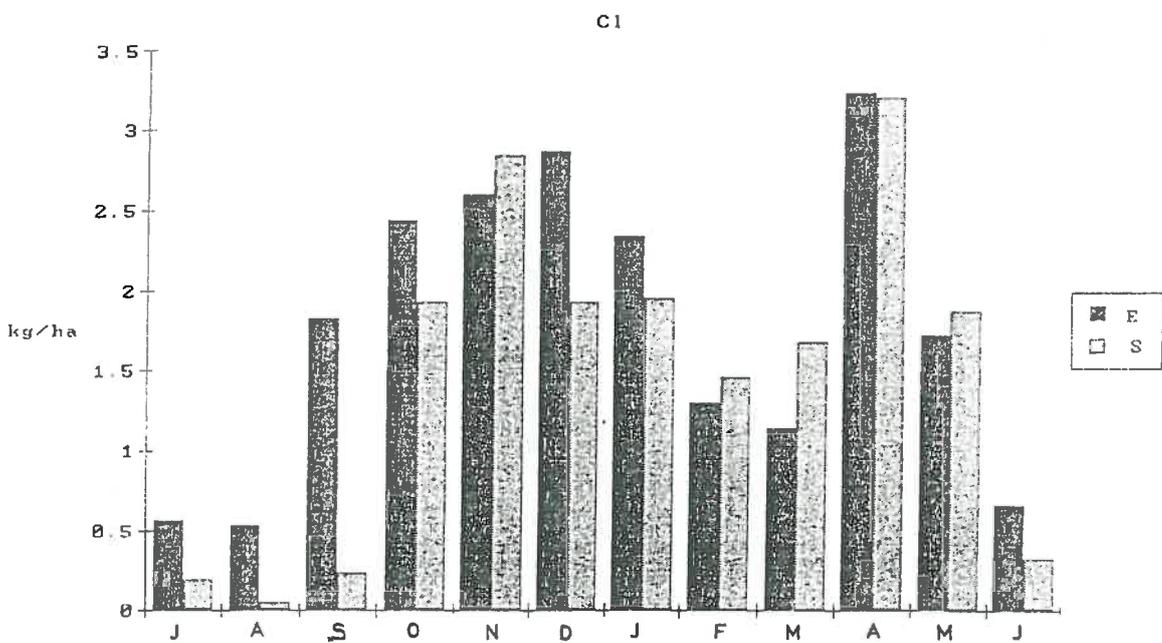
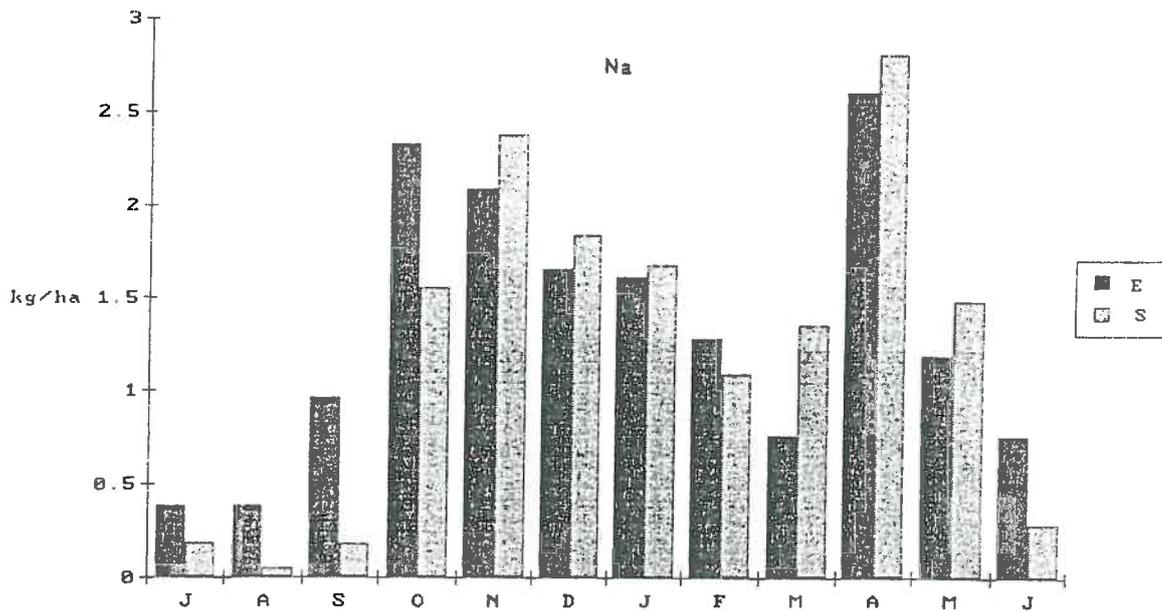


Figure 53: Flux moyens mensuels. Sapine (hêtraie) 1981-88

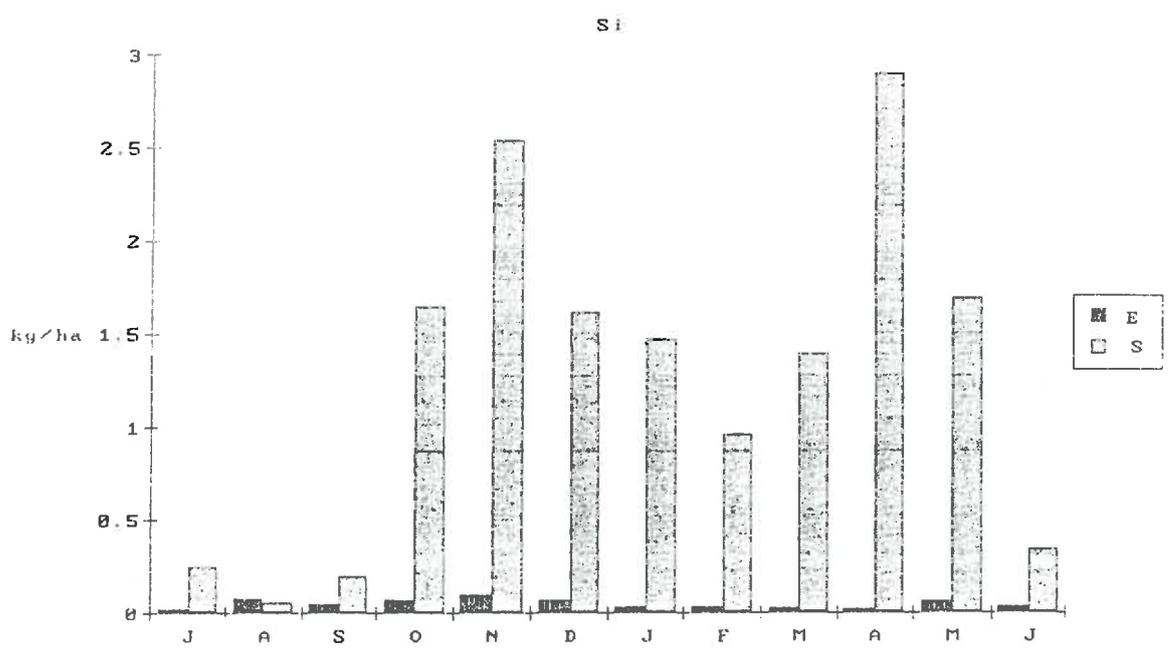
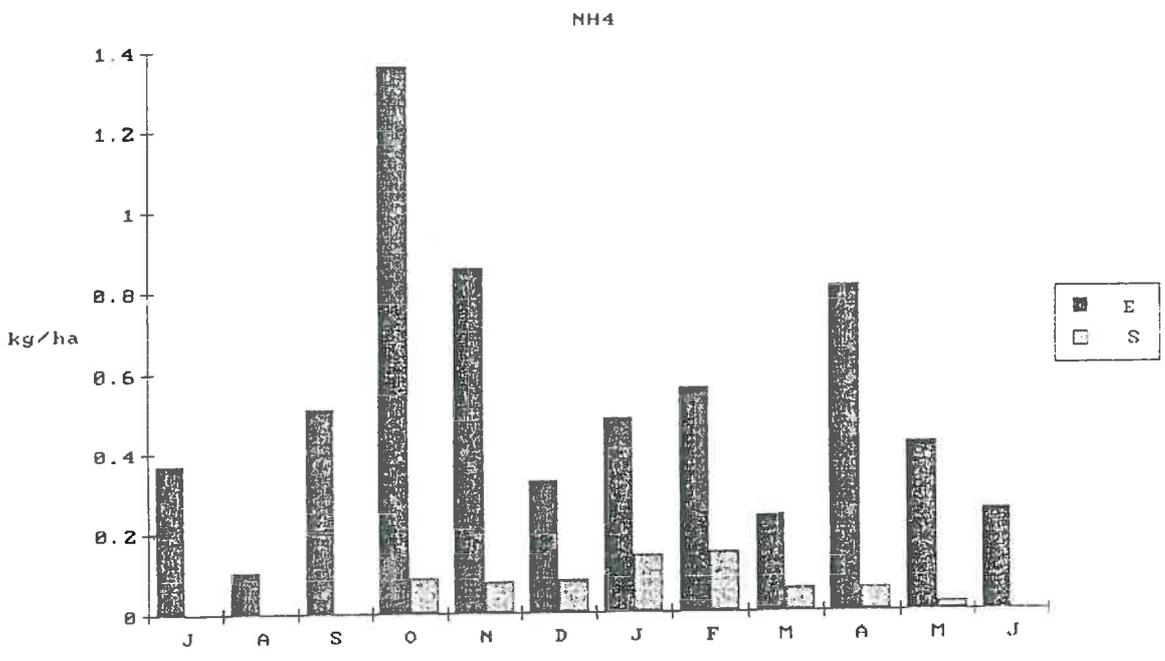
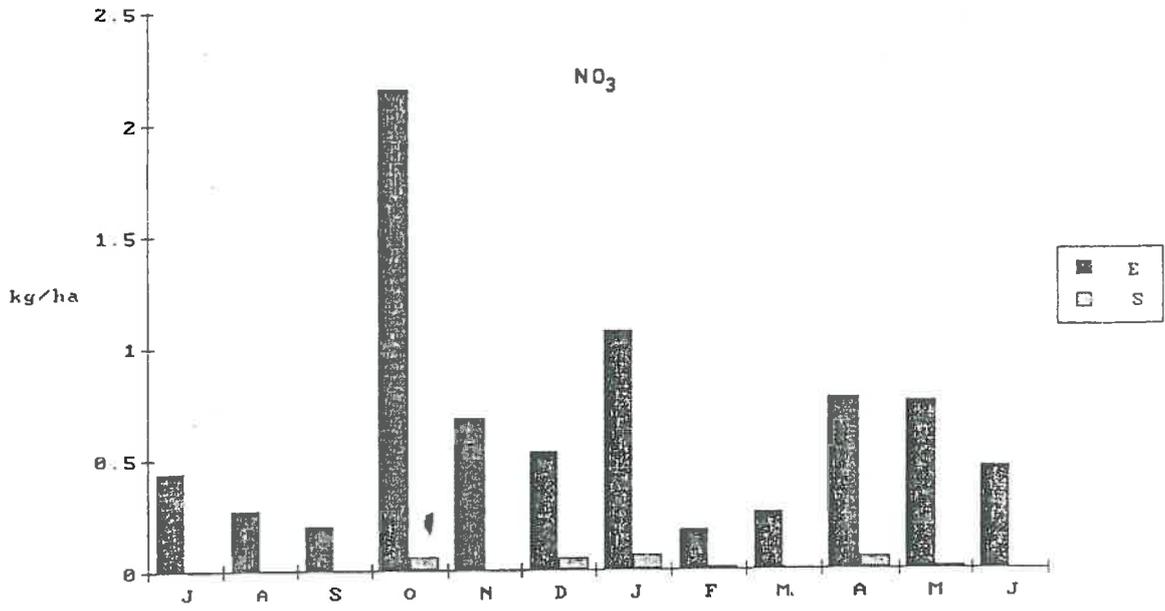
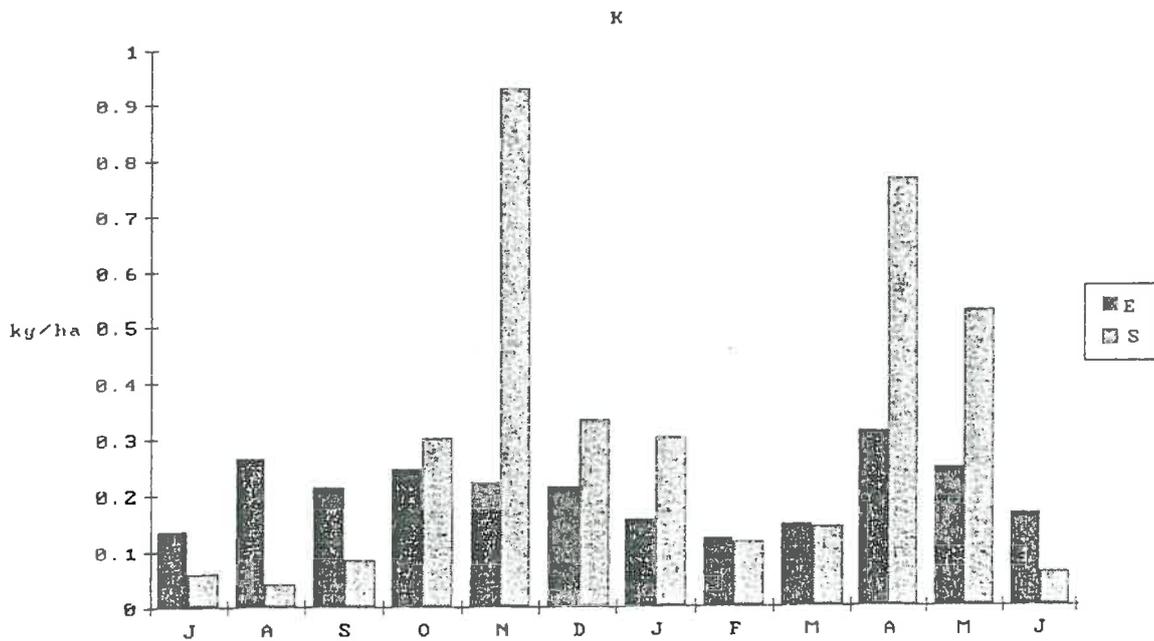
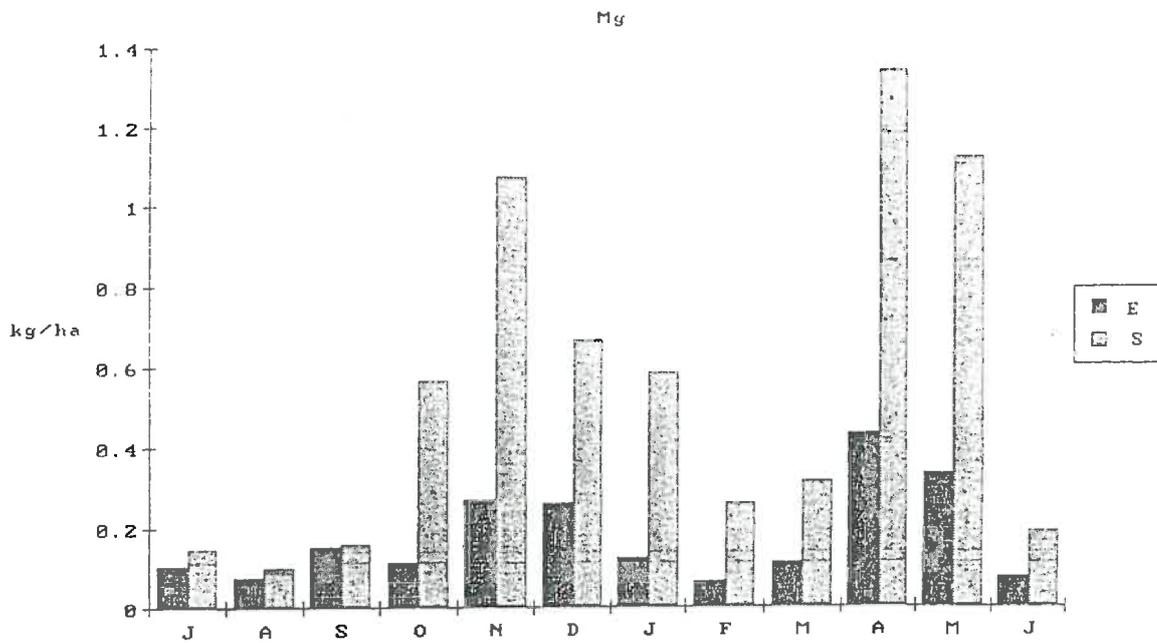
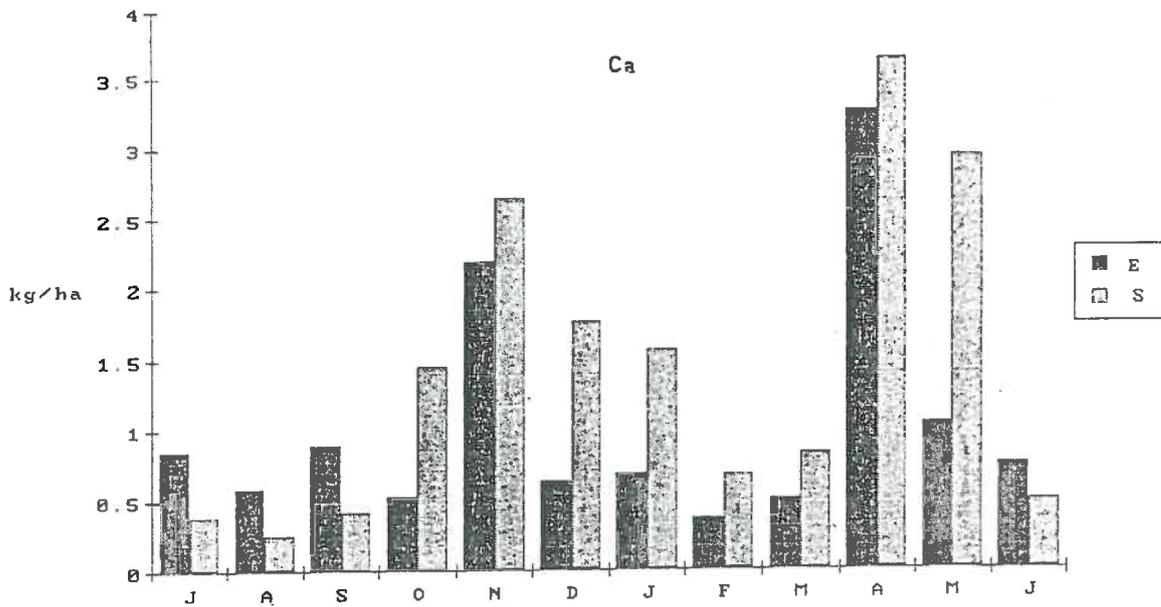
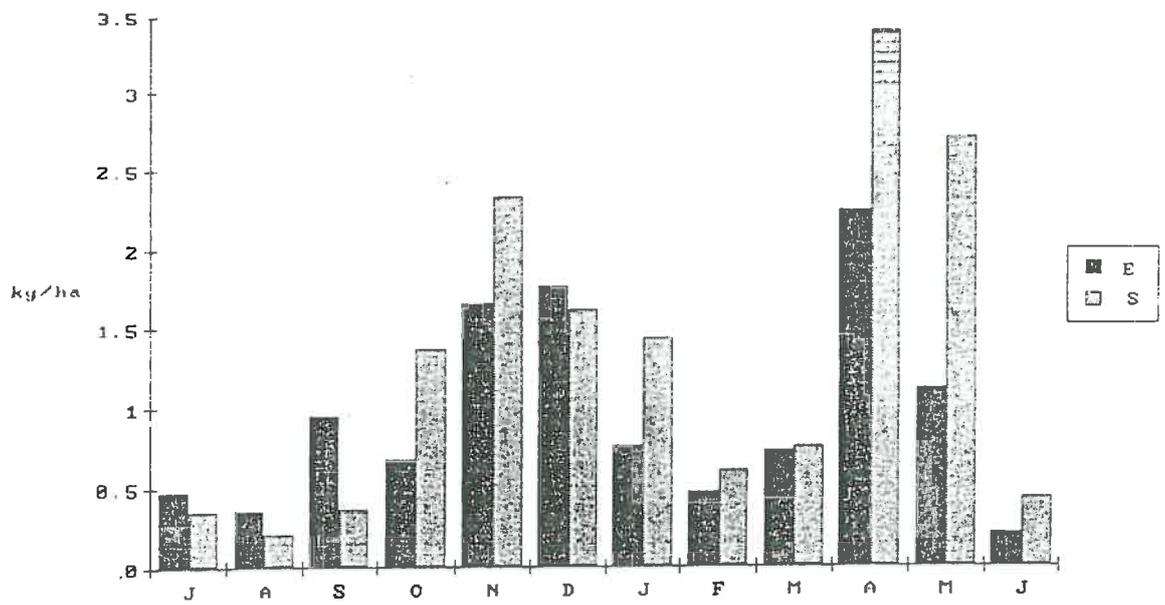
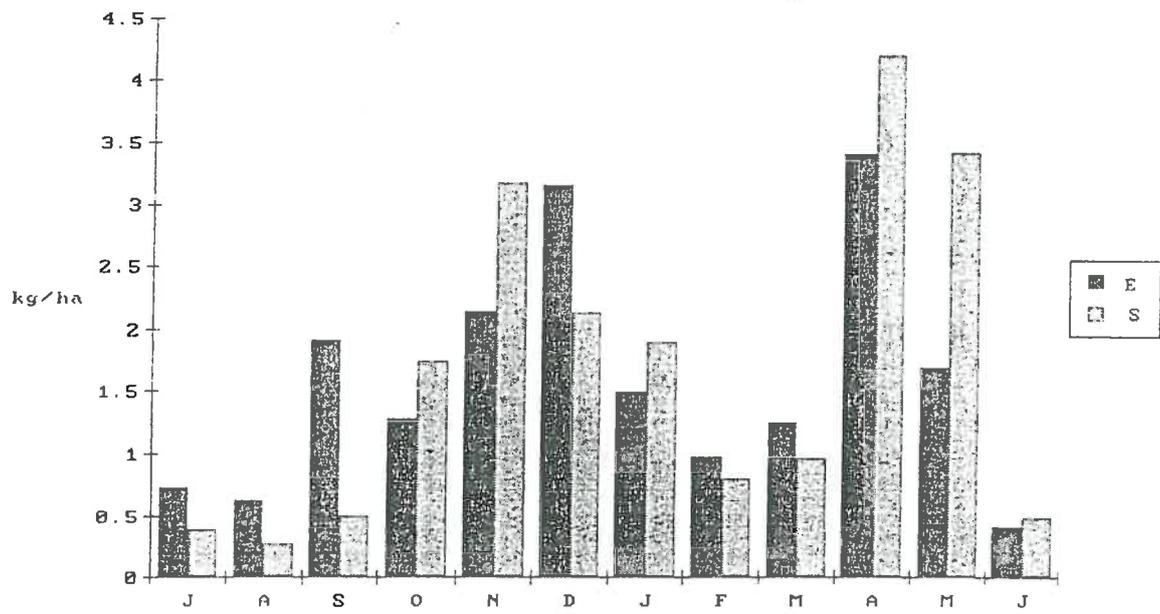


Figure 54: Flux moyens mensuels. Latte (épiceas) 1981-86





Cl



S04

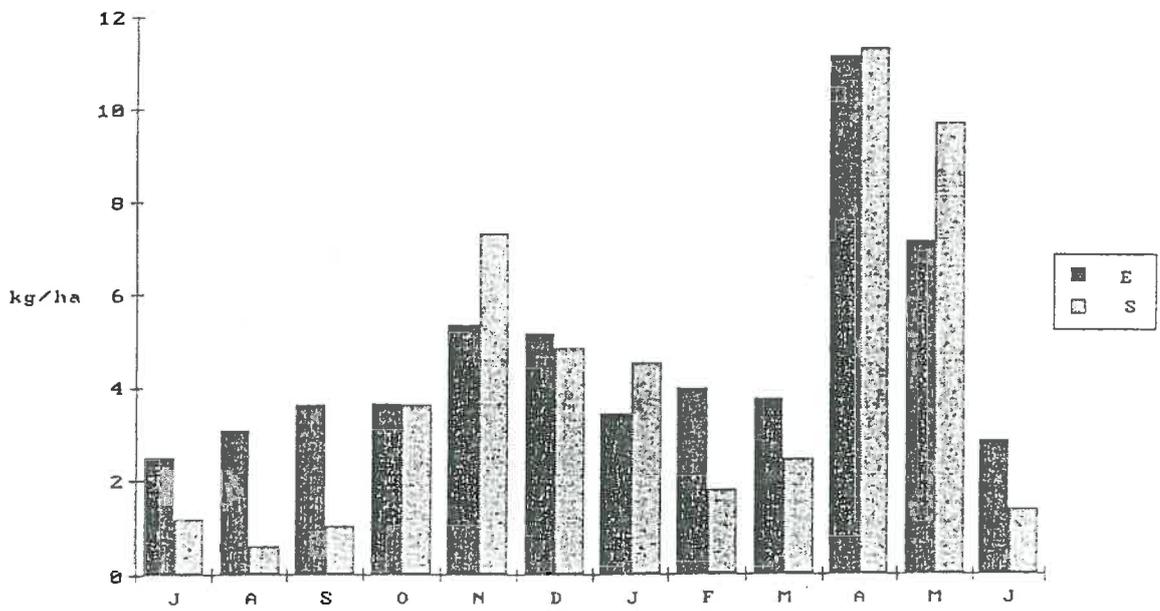
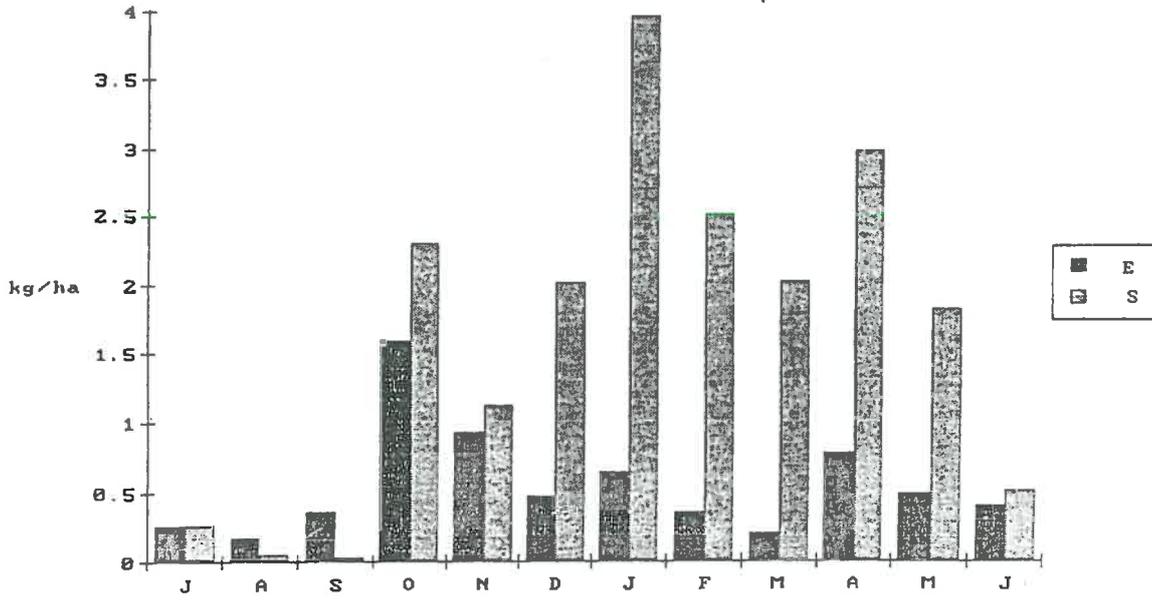
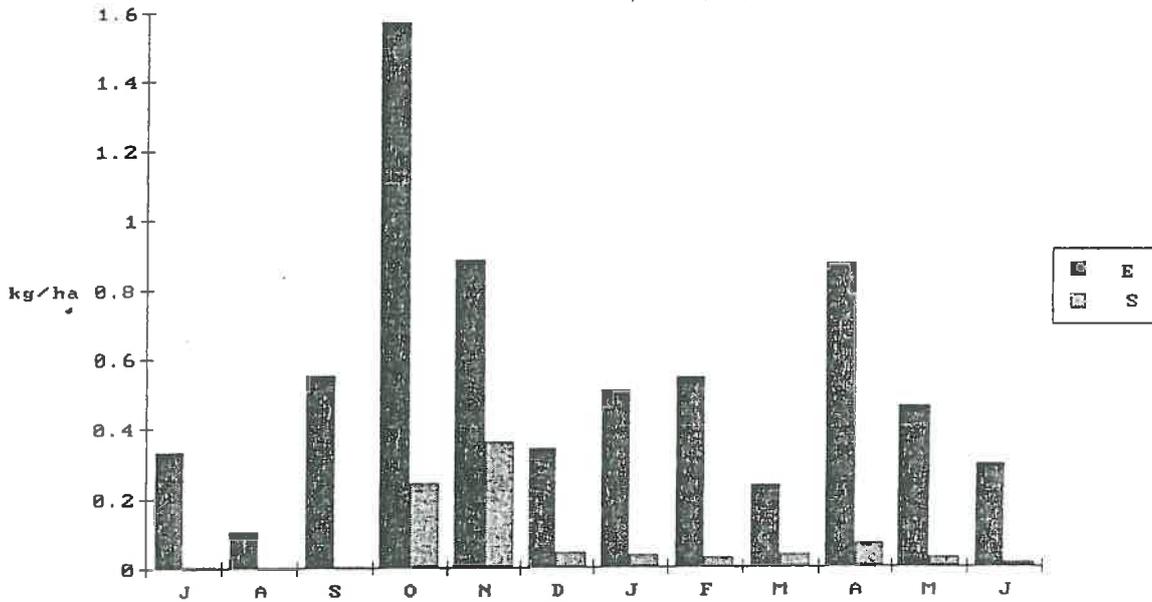


Figure 54: Flux moyens mensuels. Latte (épiceas) 1981-86

NO3 (1986-88)



NH4 (1986-88)



Si

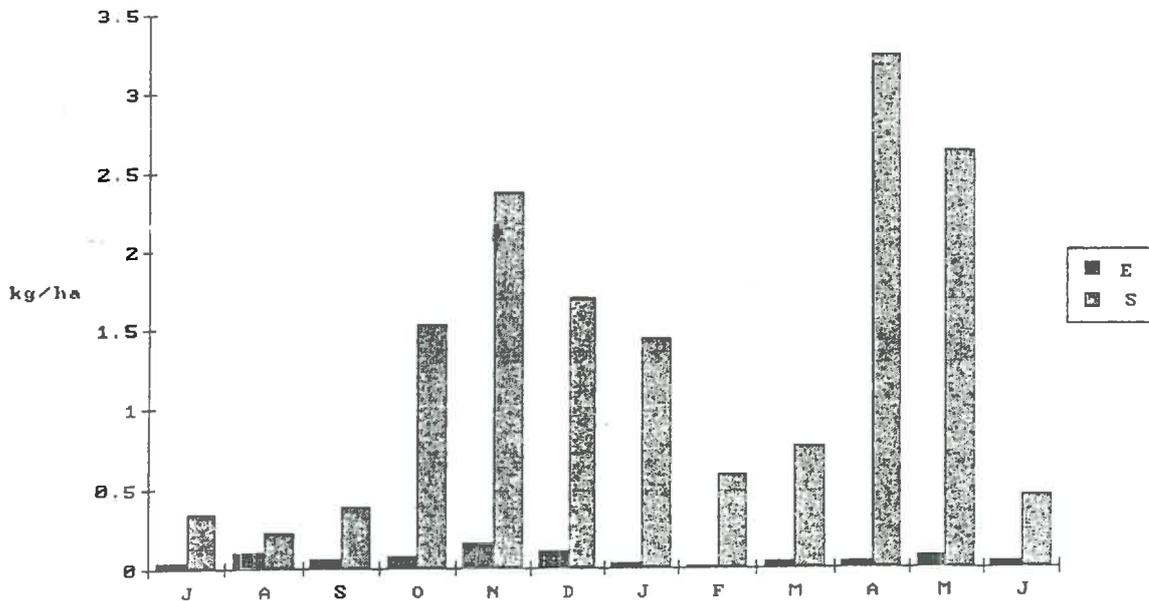


Figure 54: Flux moyens mensuels. Latte (épiceas) 1981-86

écoulées et les stockages ou destockages qu'elles provoquent (cf § III.1). Ainsi il faut rappeler qu'en année moyenne (fig. 28 à 50 pp92-95), le déficit d'écoulement est maximum en fin d'été, diminue progressivement pour devenir légèrement négatif en mars-avril (fonte des neiges) et reaugmente brusquement à partir de juin. Un élément inerte par rapport à l'écosystème montrera des bilans proches de ce cycle: c'est grossièrement le cas du chlore dans la pelouse. Mais la plupart des solutés montrent des bilans très différents, bien que très influencés par les cycles hydrologiques.

-Les cations sont en général exportés du bassin pendant la majeure partie de l'année, n'étant retenus que pendant les trois ou quatre mois où la plus grande partie de la pluie contribue à l'ETR (juin à septembre). Les pics d'exportations se situent en général au printemps, sauf pour le potassium qui subit une forte exportation en automne (chute des feuilles). Les maximas de rétention suivent les maximas de déficit d'écoulement pour le Sodium et le Magnésium (sept-oct), mais en sont indépendants pour les éléments subissant un fort prélèvement biologique, Ca et K.

-Le cas du calcium dans la hêtraie fait figure d'exception, puisqu'il est curieusement l'objet d'une certaine rétention en période de hautes eaux, novembre et avril.

-La silice est à mettre à part, sa quasi-absence dans les apports et sa concentration peu variable dans les rivières faisant que son exportation a lieu toute l'année à un rythme calqué sur le régime des cours d'eau.

-Dans les deux forêts, le chlore est exporté non seulement au printemps comme dans la pelouse, mais aussi en novembre, à la période des hautes eaux, sans qu'il y ait d'explication nette à cela.

-Le Soufre a le même comportement dans la hêtraie et dans la pelouse, à savoir des bilans positifs toute l'année sauf au mois de mars. Dans La pessière, on observe comme pour le chlore un relarguage en hautes eaux (novembre, avril et mai), ainsi que, bizarrement, au coeur de l'hiver (janvier), ce dernier phénomène ayant surtout eu lieu lors des deux premiers cycles.

-Bien que les bilans de NO<sub>3</sub> et de NH<sub>4</sub> ne soient disponibles que depuis deux ans, on peut en tirer les premières observations: fortement retenu toute l'année dans les trois bassins, NH<sub>4</sub> présentent des flux sortants à maximum d'hiver aux Cloutasses et à La Sapine, d'automne à La Latte. Les nitrates ne sont présents dans les eaux du ruisseau de La Sapine qu'en hautes eaux et en début d'hiver, et ces maximas d'hiver, d'octobre et d'avril se retrouvent sur les deux autres bassins. L'exportation massive de nitrates de la coupe de La Latte ne s'interrompt qu'en fin d'été.

Si l'on compare ces tendances avec les résultats de la littérature, on s'aperçoit que les cycles observés ici se rapprochent davantage de bassins plus méditerranéens (Avila, 87) que de bassins plus tempérés (Likens et al.), mais ces cycles présentent sur de nombreux points leur spécificité.

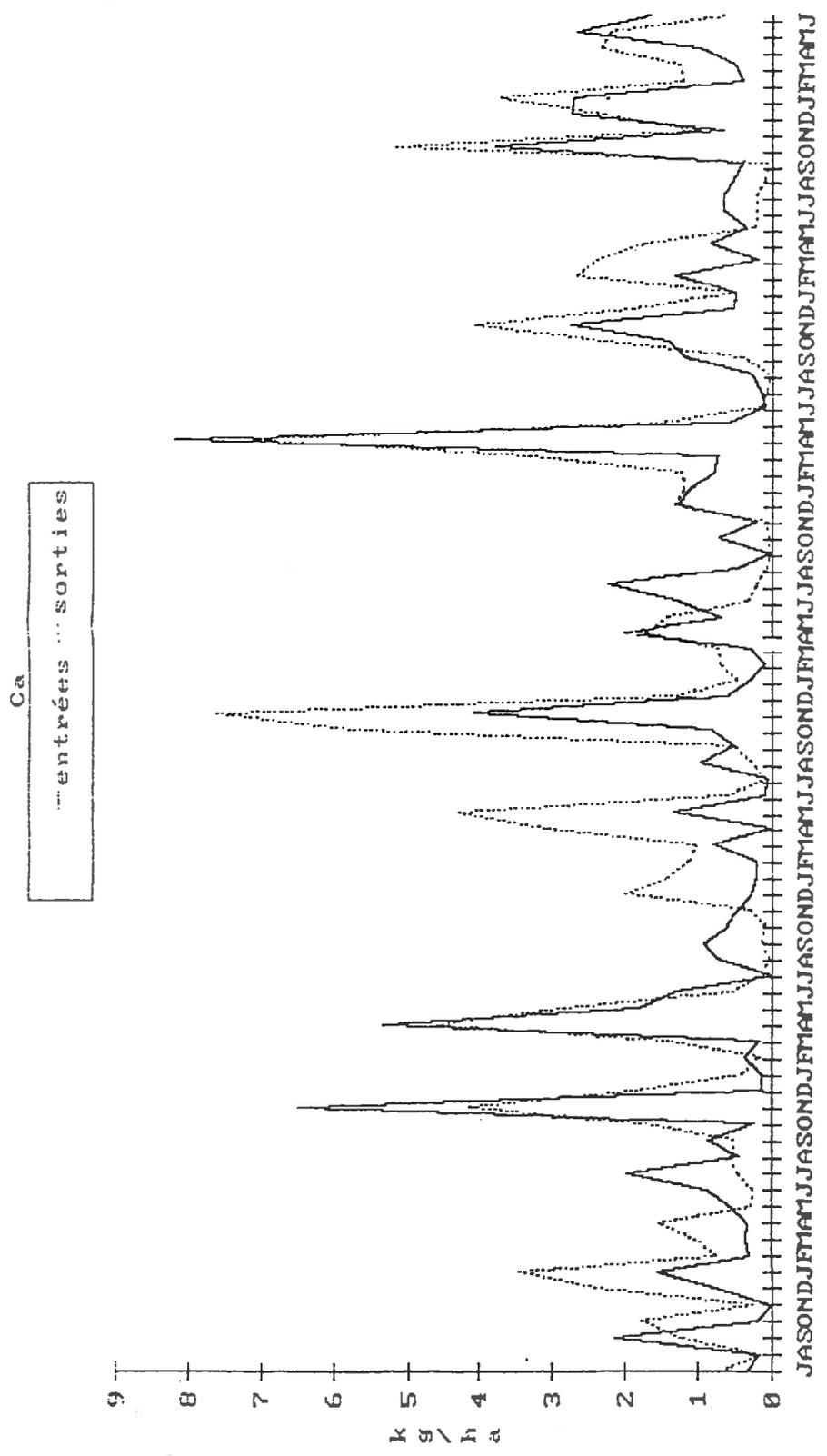
### III.3.3.2 Variations en fonction des aléas climatiques

On l'a vu, la chronique météorologique du Mont-Lozère est une suite de sécheresses plus ou moins marquées, d'épisodes pluvieux majeurs, d'hivers très neigeux, etc. Il est intéressant de mettre en parallèle ces événements et le comportement hydrochimique des écosystèmes (figures n°55 à 57). On s'aperçoit ainsi que les exportations les plus importantes de cations ont lieu à l'occasion de crues majeures suivant des tarissements très marqués. C'est particulièrement le cas en automne 84 et au printemps 86. Pour ce dernier, se cumulent vraisemblablement l'effet d'une forte sécheresse en automne 85 et l'évacuation du manteau neigeux particulièrement important cette année là. Il est à remarquer qu'à La Latte (et à un moindre degré à La Sapine), on observe une exportation sporadique de sulfate tout à fait en phase avec ces phénomènes. En généralisant, on peut dire qu'un cycle sec comportant quelques épisodes pluvieux intenses entrecoupés de longues sécheresses semble favoriser les exportations de cations et gêner la rétention de soufre, beaucoup plus qu'un cycle très humide à pluies régulièrement espacées. On peut proposer à cela trois explications:

-1- Non prise en compte de la déposition occulte durant la phase sèche, entraînant une surestimation des exportations nettes. Il est vraisemblable que la part des entrées due aux dépôts secs est plus importante en année sèche, comme semble l'illustrer notre calcul sur les deux cycles 86-87 et 87-88. Cela expliquerait que ce phénomène soit plus net dans les résineux que dans les deux autres bassins. Toutefois, la tentative de relier la composition des pluviométriques à la durée de la période sèche précédente, suivant l'idée de Lovett et Lindberg (1984), a donné des résultats peu probants. En effet il est probable que au delà de quelques jours sans pluie, la quantité de dépôts secs dépend plus de l'origine des masses d'air arrivant sur le site que de la durée de la période sèche. D'autre part, si c'était là la seule explication, on peut penser que les toutes premières crues donneraient une forte exportation, puis le phénomène s'estomperait, ce qui n'est pas le cas ici.

-2- Affaiblissement de la végétation par la sécheresse, d'où prélèvements biologiques moins forts. Cela suppose que la quantité d'éléments disponibles pour l'exportation et l'assimilation biologique serait grosso modo le même chaque année et que si la part de l'une diminue, la part de l'autre augmente. Certes

Figure 55 : Flux mensuels Cloutasse (pelouse) 1981-88



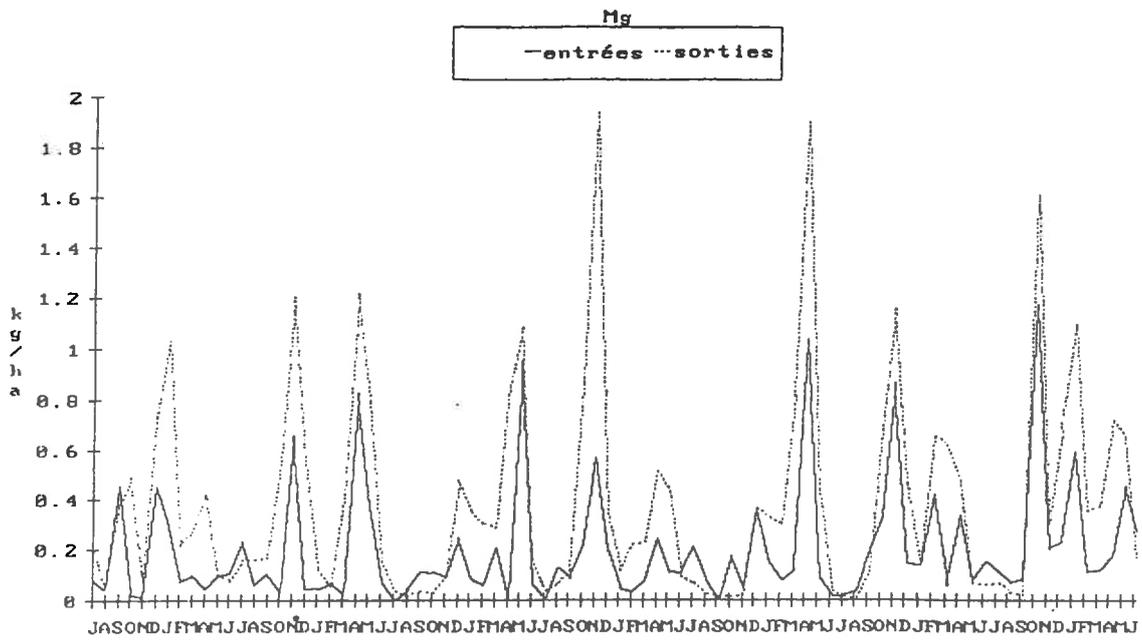
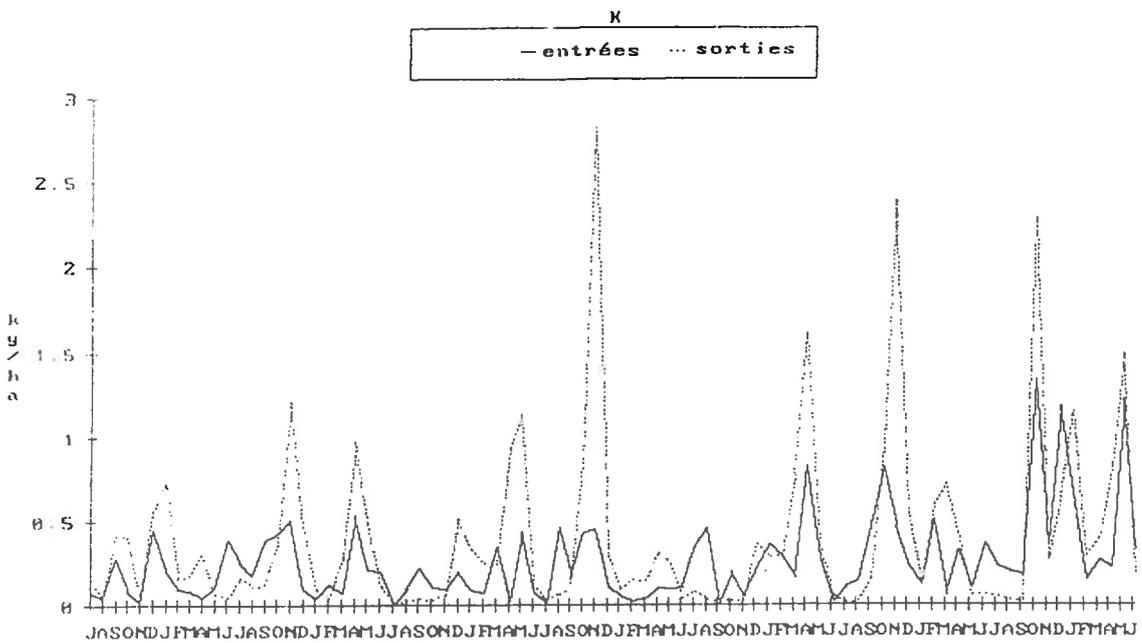


Figure 55: Flux mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88



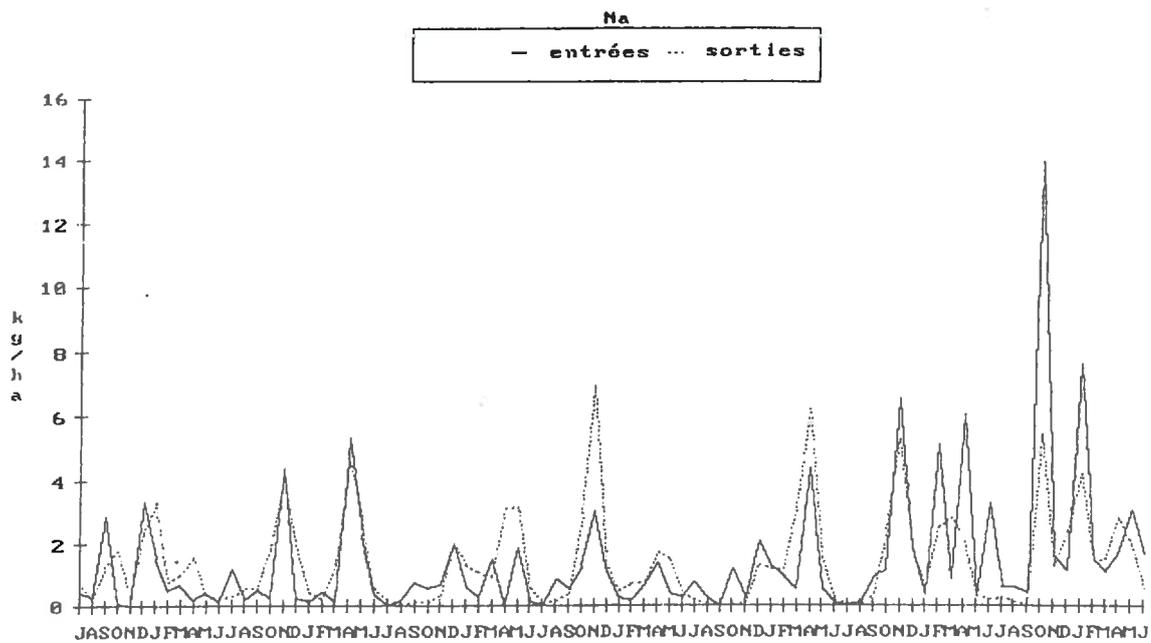
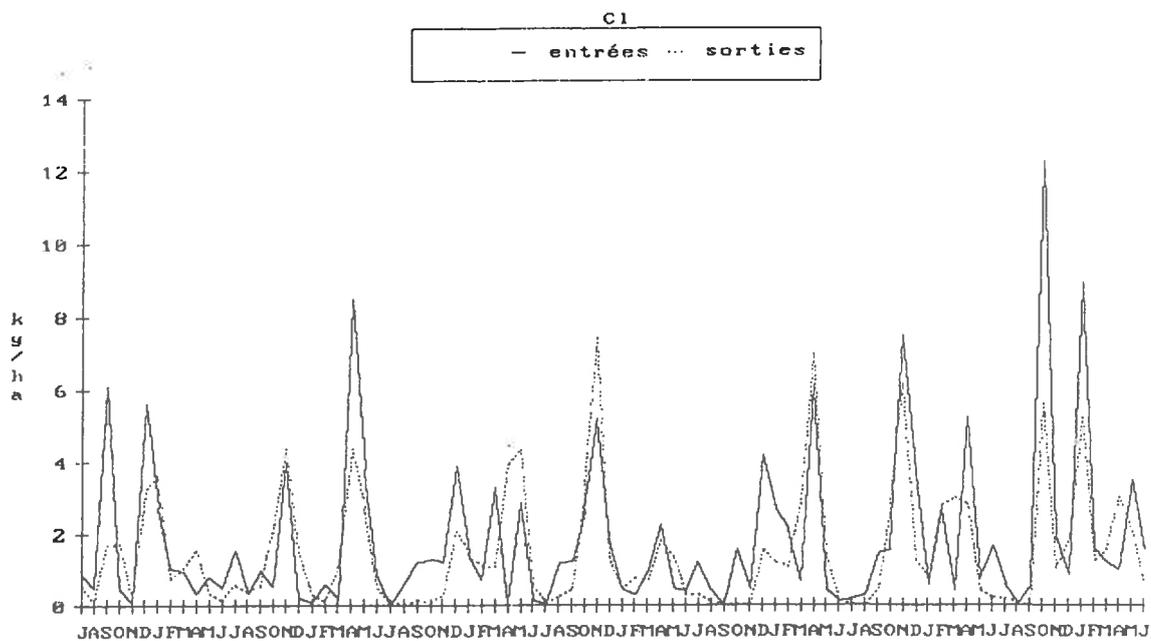


Figure 55: Flux mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88



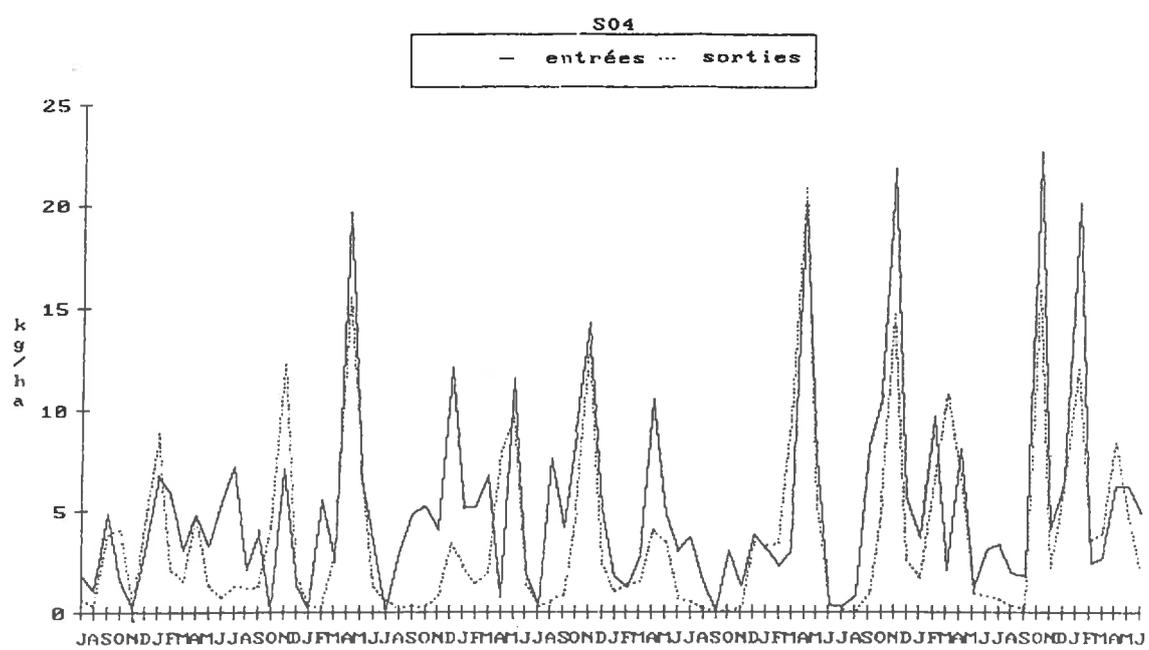


Figure 55: Flux mensuels. Cloutasses (pelouse) 1981-88

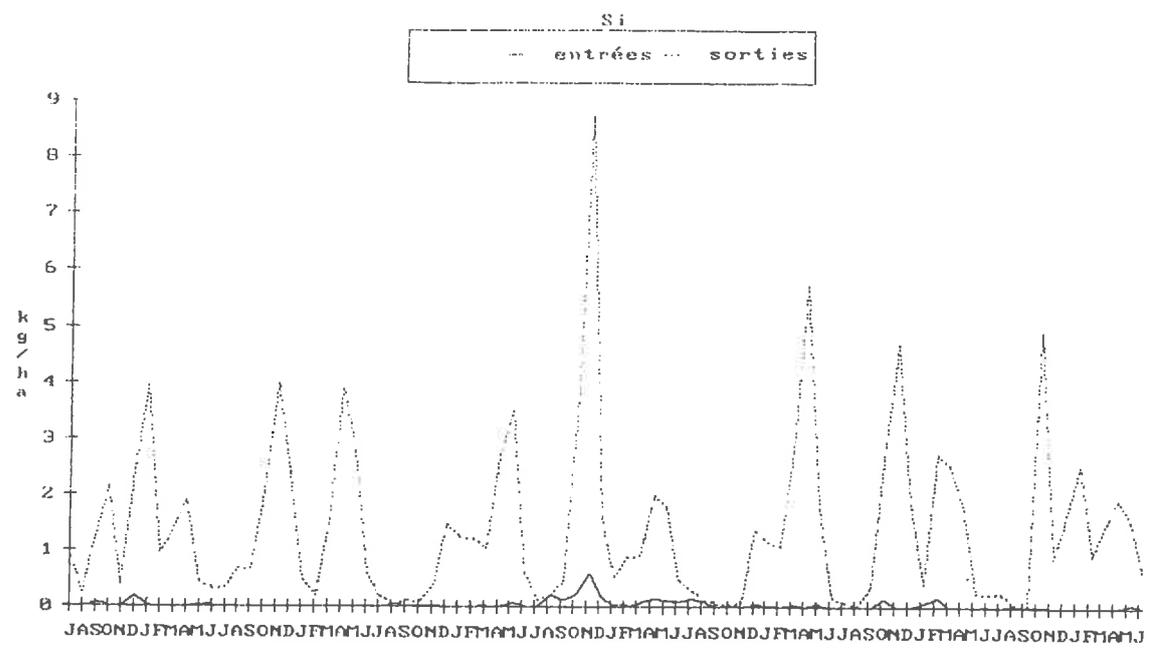
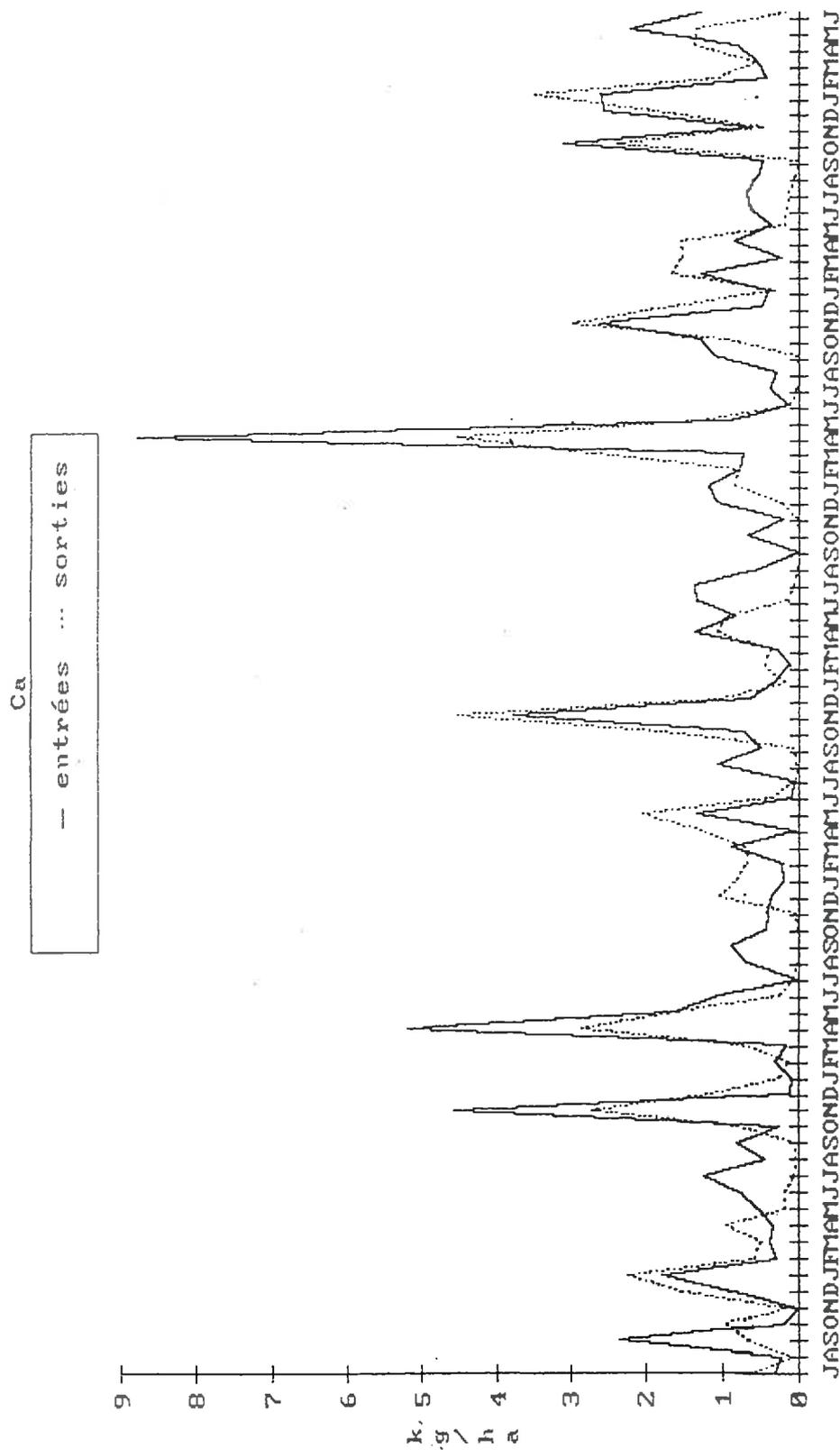


Figure 56 : Flux mensuels Sapine (hêtre) 1981-88



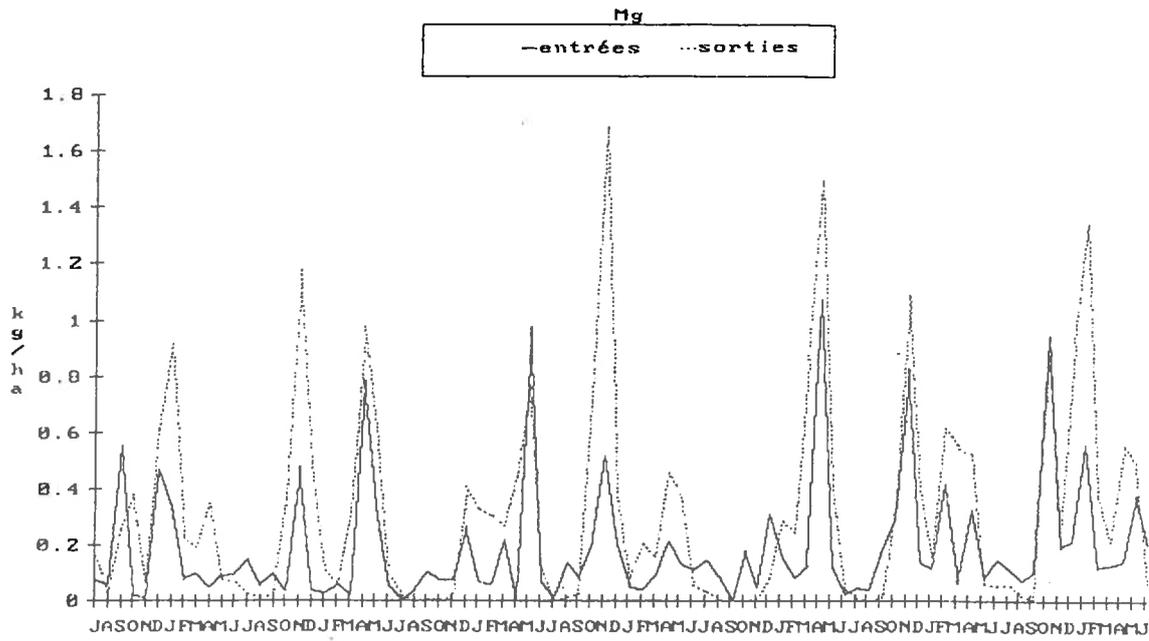
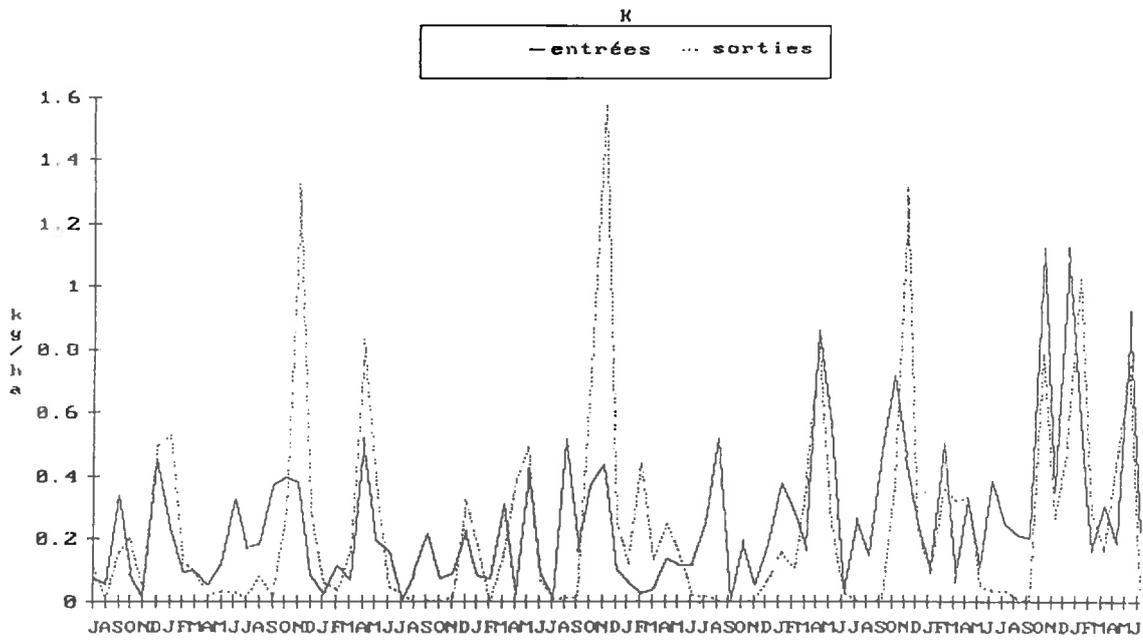


Figure 56: Flux mensuels. Sapine (hêtraie) 1981-88



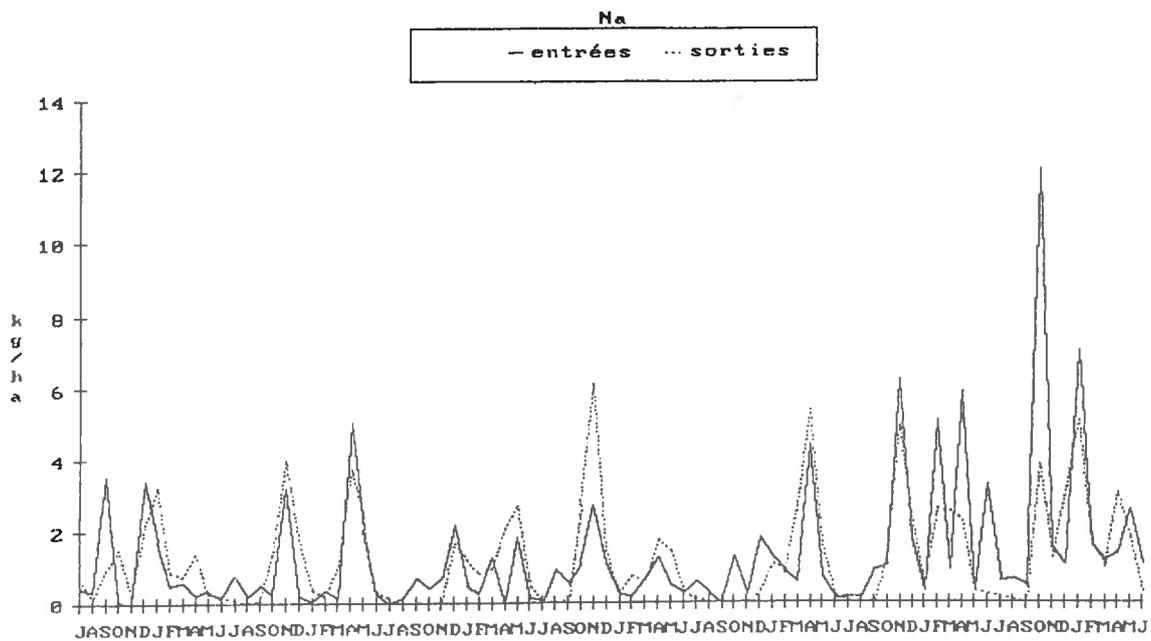
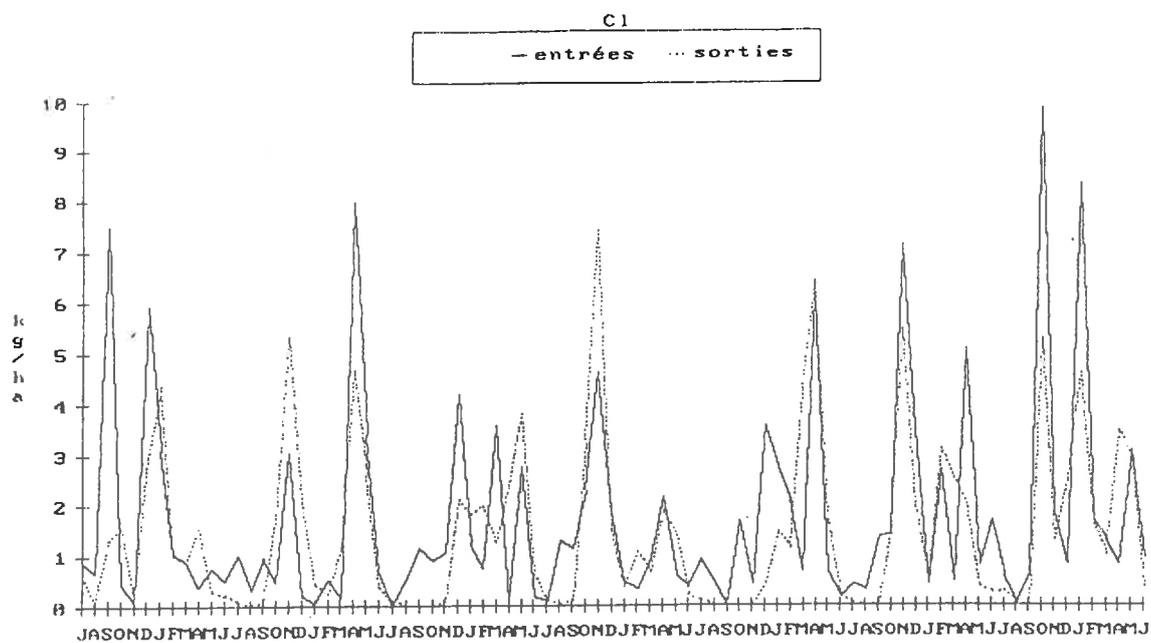


Figure 56: Flux mensuels. Sapine (hêtraie) 1981-88



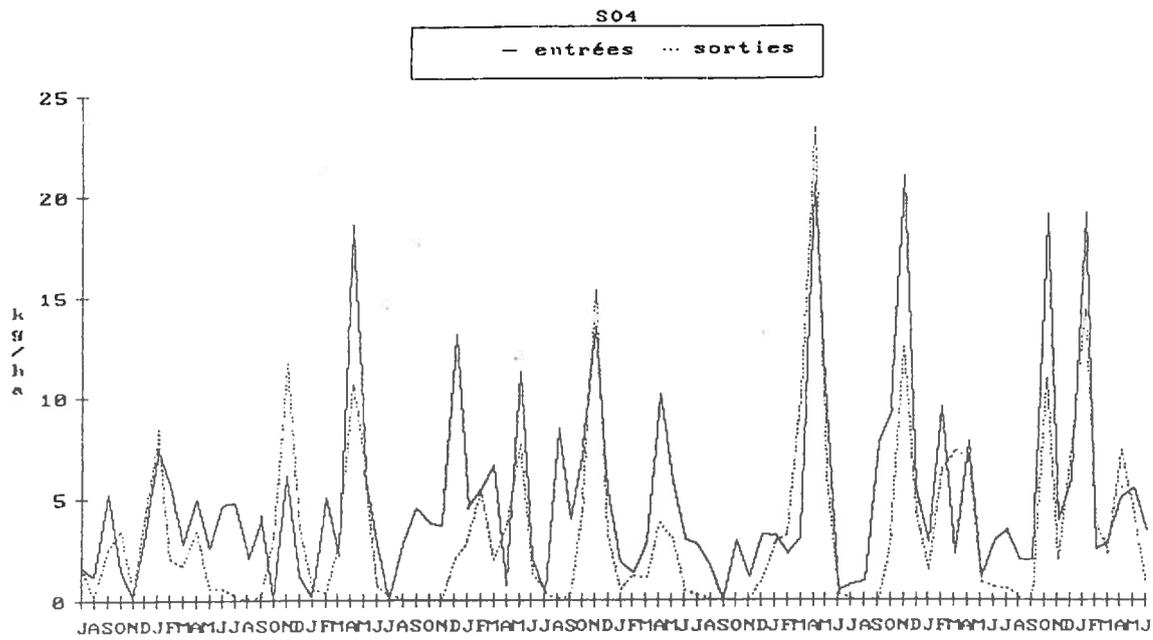


Figure 56: Flux mensuels. Sapine (hêtraie) 1981-88

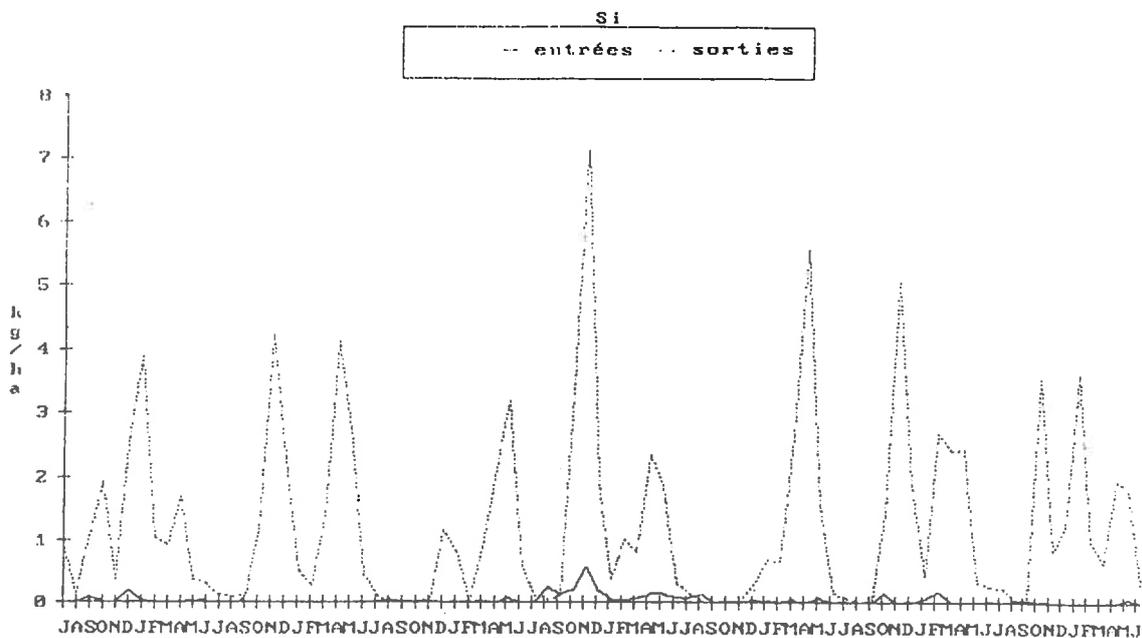
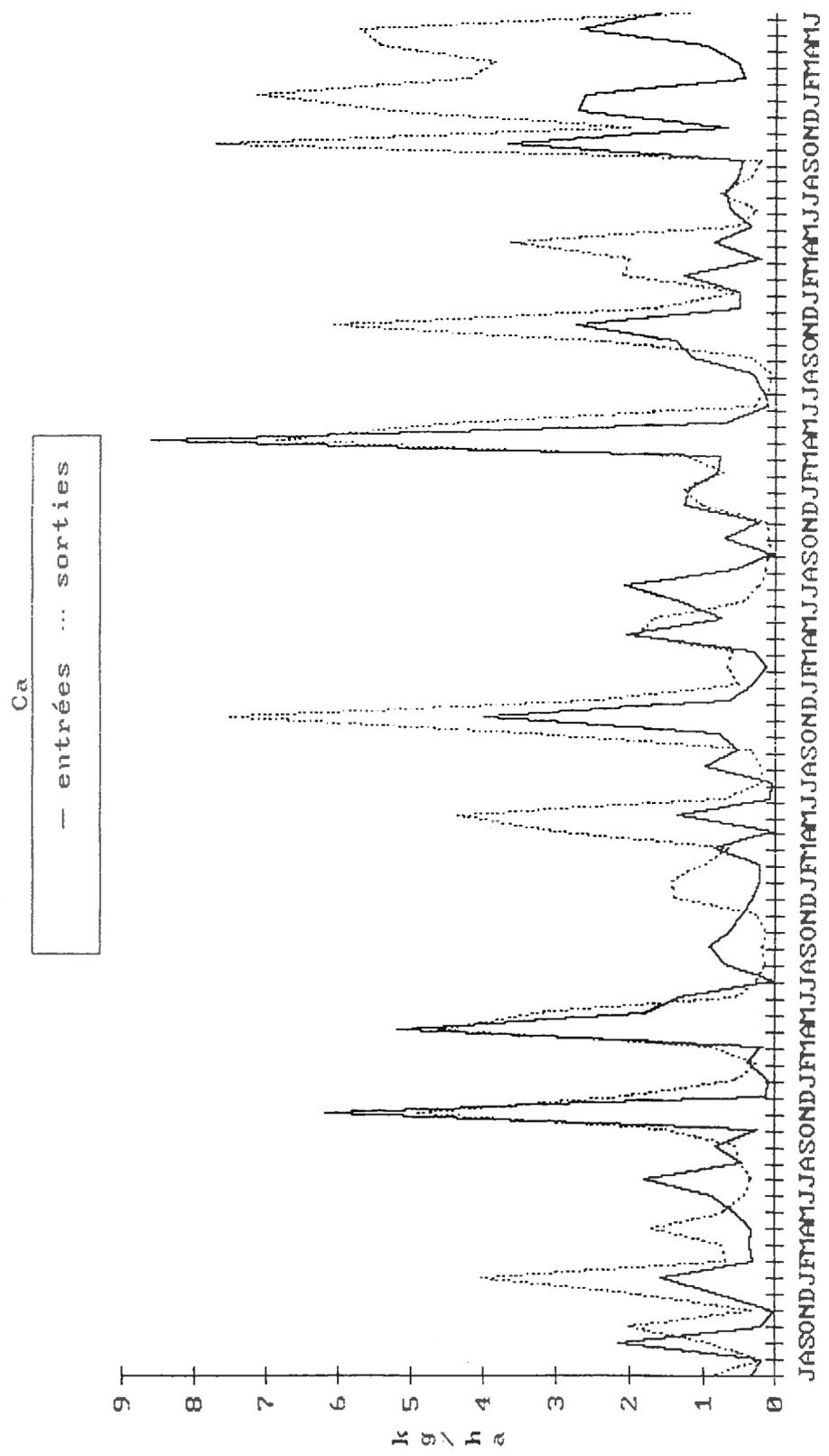


Figure 57 : Flux mensuels Latte (épicéas) 1981-88



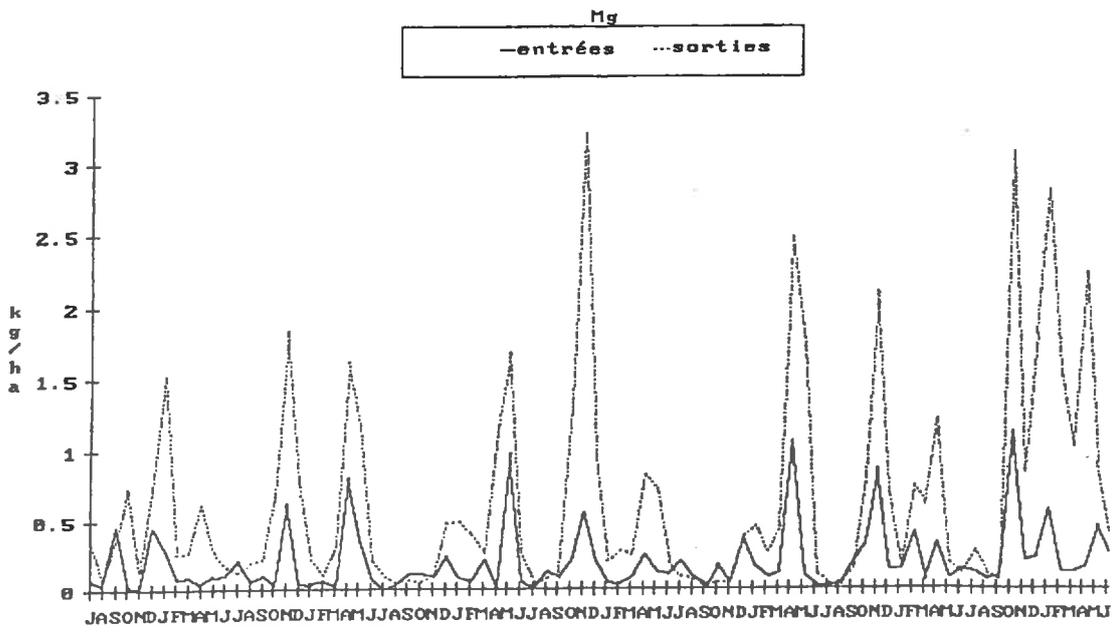
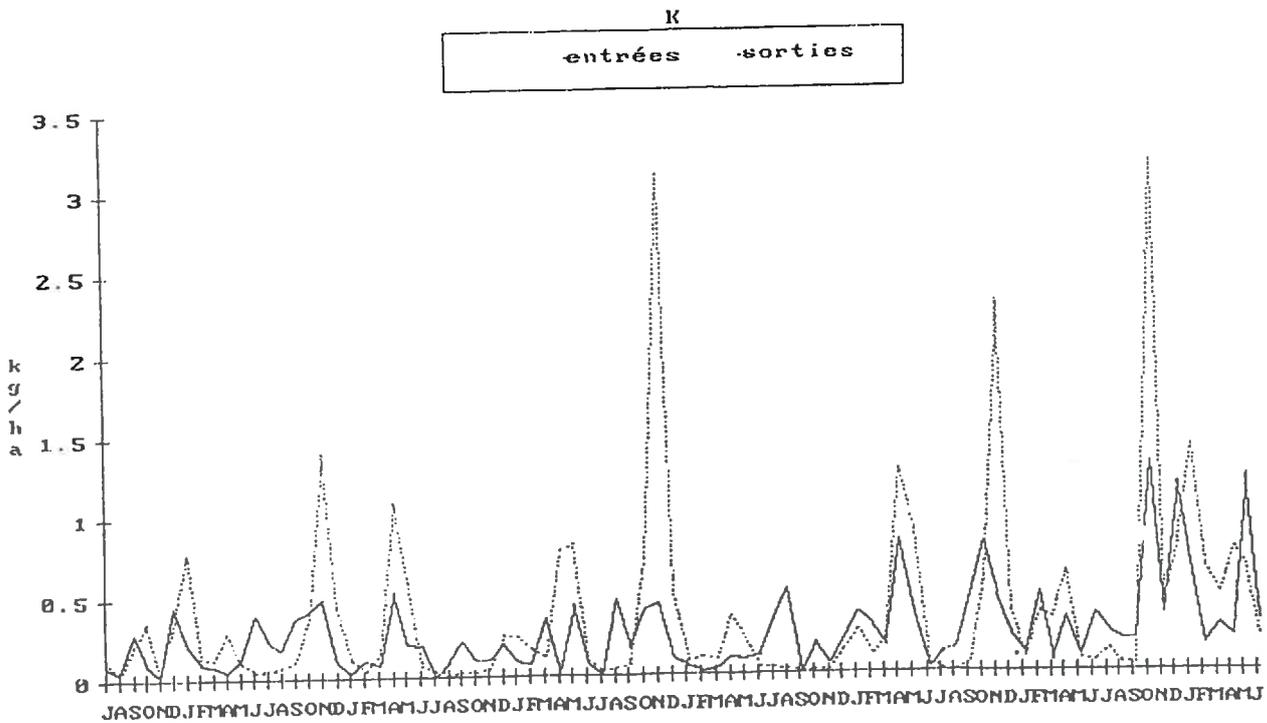


Figure 57: Flux mensuels. Latte (épicéas) 1981-88



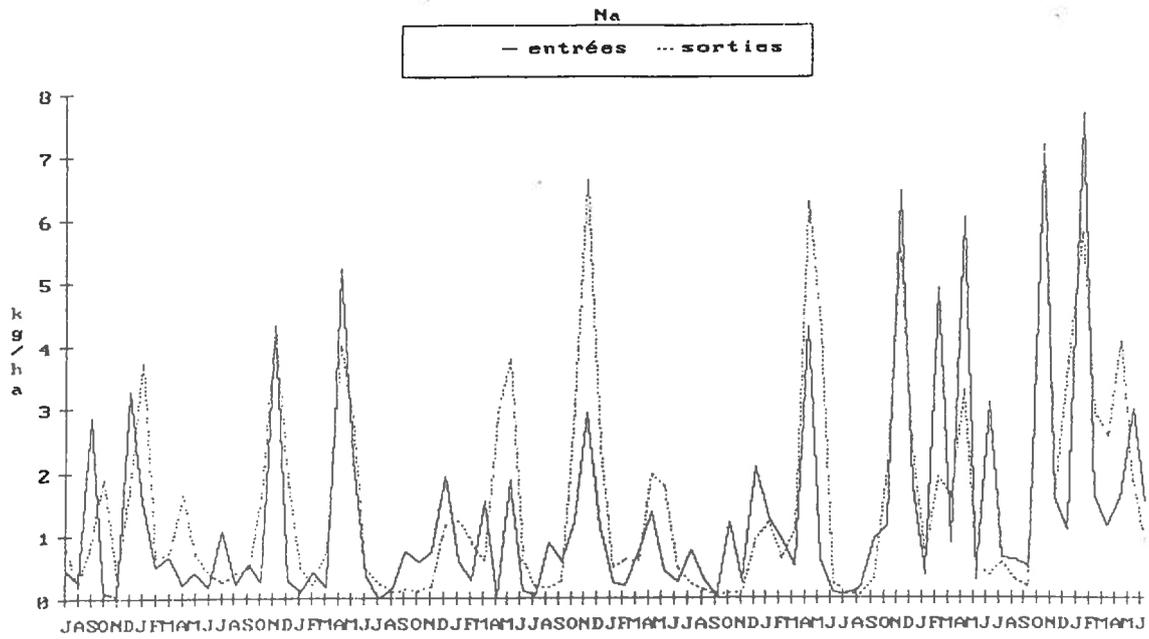
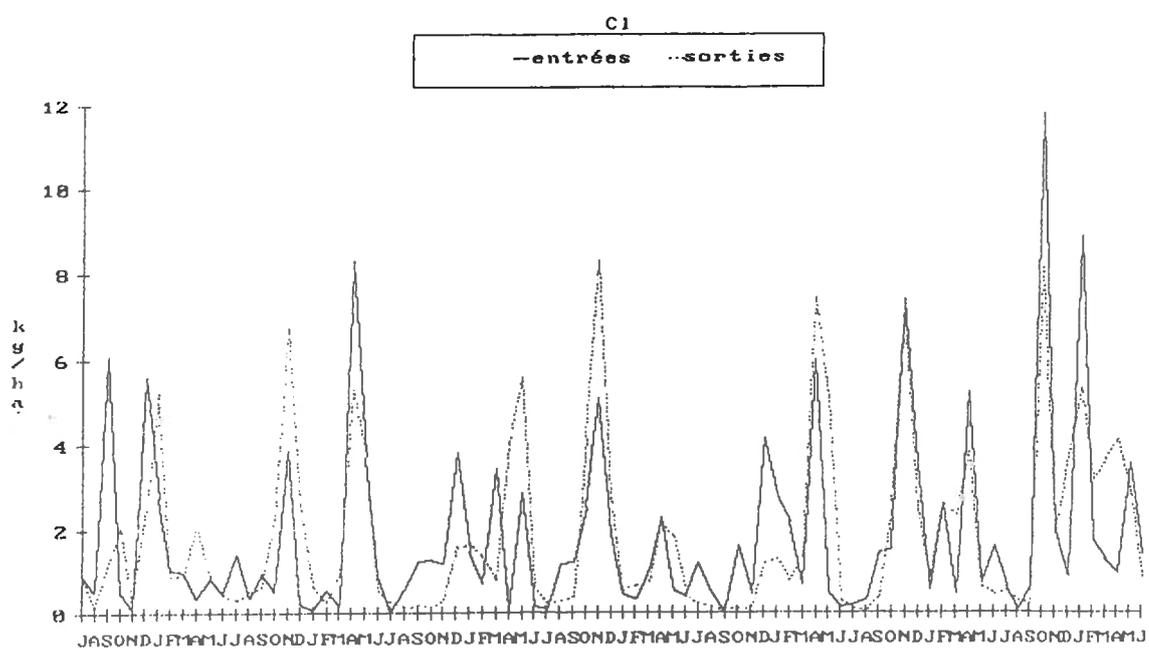


Figure 57: Flux mensuels. Latte (épicéas) 1981-88



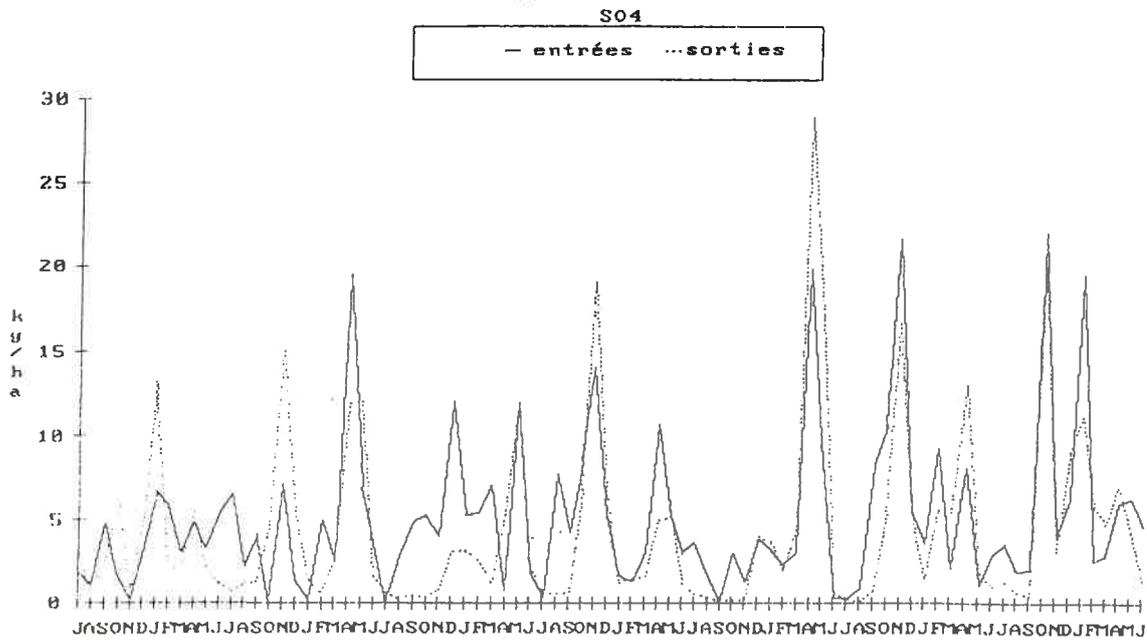
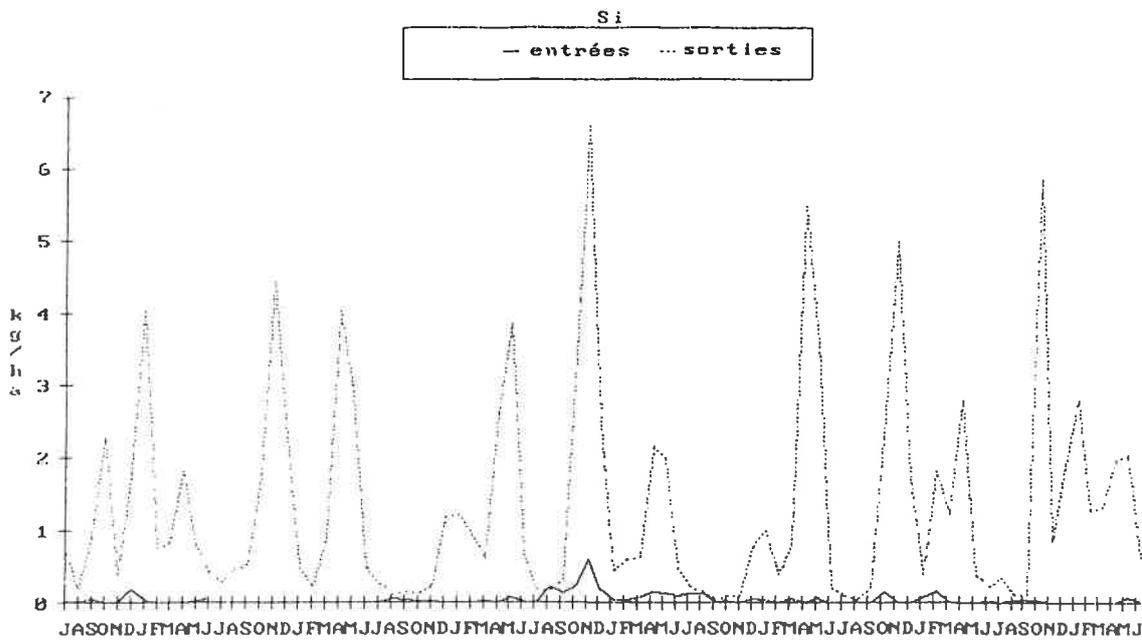


Figure 57: Flux mensuels. Latte (épicéas) 1981-88



les cernes annuels de croissance des arbres sont là pour témoigner de la grande irrégularité de la consommation des plantes, mais l'hypothèse de départ est fragile.

-3-Si l'on se reporte au raisonnement sur les différents types d'eau participant à l'écoulement (§I.4.3), il semble que les précipitations inégalement réparties augmente la participation des eaux à transit rapide dans l'écoulement ou dans l'alimentation des nappes. Or ces eaux ont un caractère météorique marqué, elle sont peu chargées, acides, et donc plus agressives par rapport au complexe d'échange et aux minéraux des horizons profonds et de l'arène, d'où possible accélération de l'altération et peut-être de la désorption des sulfates.

#### III.3.4 CONCLUSION

Grâce à la méthode de calcul de flux utilisée, on dispose d'une somme d'informations considérable sur les bilans des trois écosystèmes, dont l'interprétation ne fait que commencer. Le principal problème soulevé est la mauvaise adéquation entre ces bilans et l'estimation des dépôts occultes à partir des pluvioloessivats. Ce ne sera résolu qu'au prix d'une vérification minutieuse des différentes causes d'erreurs et de l'amélioration de la mesure des flux sous couvert.

L'étude des bilans a un pas de temps inférieur à l'année est très riche d'enseignements et de questions sur les modes de fonctionnement des écosystèmes. Une modélisation correcte de l'état des réserves hydriques des bassins-versants permettrait certainement de développer considérablement ce point.

| Station                 | H+ |      | Alc. |       | Ca    |       | Mg   |      | K    |      | Na   |      | Cl   |      | SO4  |       | NO3  |       | NH4  |      | Si  |      |      |
|-------------------------|----|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-----|------|------|
|                         | pH | Flux | Cc   | Flux  | Cc    | Flux  | Cc   | Flux | Cc   | Flux | Cc   | Flux | Cc   | Flux | Cc   | Flux  | Cc   | Flux  | Cc   | Flux | Cc  | Flux |      |
| SAPINE<br>(Hêtres)      | a  | 4,71 | 0,47 | -6,3  | -0,15 | 33,2  | 15,9 | 11,3 | 3,2  | 6,1  | 5,7  | 26,8 | 16,1 | 27,7 | 25,7 | 63,0  | 25,1 | 23,4  | 7,8  | 16,5 | 5,6 | 0,3  | 0,2  |
|                         | b  | 4,94 | 0,25 | -4,0  | -0,09 | 48,6  | 21,0 | 16,4 | 4,3  | 27,7 | 23,3 | 40,0 | 19,8 | 41,3 | 31,5 | 77,7  | 27,6 | 15,9  | 4,8  | 11,4 | 3,5 | 3,8  | 2,3  |
|                         | c  | 4,71 | 0,38 | -10,1 | -0,2  | 41,9  | 16,4 | 24,9 | 5,9  | 11,6 | 8,9  | 56,7 | 25,5 | 50,0 | 34,7 | 93,5  | 29,3 | 3,4   | 0,9  | 2,0  | 0,5 | 20,4 | 11,1 |
|                         | d  | 5,82 | 0,02 | 19,8  | 0,33  | 39,3  | 13,0 | 25,9 | 5,2  | 6,7  | 4,3  | 56,1 | 21,3 | 39,9 | 23,4 | 68,4  | 18,1 | 2,0   | 0,3  | 2,2  | 0,5 | 36,5 | 16,9 |
| URFRUITS<br>(Epicéas)   | a  | 4,71 | 0,49 | -6,3  | -0,16 | 33,2  | 17,0 | 11,3 | 3,4  | 6,1  | 6,1  | 26,8 | 15,5 | 27,7 | 24,8 | 63,0  | 25,8 | 23,4  | 8,2  | 16,5 | 5,8 | 0,3  | 0,2  |
|                         | b  | 4,78 | 0,33 | -14,1 | -0,26 | 61,5  | 24,3 | 24,2 | 5,8  | 40,8 | 31,5 | 69,7 | 31,6 | 74,1 | 51,8 | 105,5 | 33,3 | 47,4  | 13,1 | 27,1 | 7,6 | 15,3 | 8,5  |
|                         | c  | 4,82 | 0,28 | -3,3  | -0,06 | 48,5  | 18,0 | 31,3 | 7,0  | 9,3  | 6,7  | 57,3 | 24,3 | 49,9 | 32,7 | 91,9  | 27,2 | 8,4   | 2,2  | 2,2  | 0,6 | 38,4 | 19,9 |
|                         | d  | 5,8  | 0,03 | 15    | 0,26  | 44,0  | 15,4 | 25,0 | 5,3  | 4,0  | 2,7  | 54,0 | 21,7 | 32,0 | 19,9 | 60,0  | 16,8 | 10,0  | 2,5  | 1,5  | 0,4 | 37,0 | 18,2 |
| LATTE<br>(Epicéas)      | a  | 4,71 | 0,51 | -6,3  | -0,17 | 33,2  | 17,5 | 11,3 | 3,6  | 6,1  | 6,3  | 26,8 | 16,1 | 27,7 | 25,7 | 63,0  | 27,2 | 23,4  | 8,6  | 16,5 | 6,2 | 0,3  | 0,2  |
|                         | b  | 4,29 | 1,07 | -44,7 | -0,94 | 94,6  | 40,0 | 35,1 | 9,0  | 44,4 | 36,6 | 80,0 | 38,8 | 85,7 | 64,1 | 172,3 | 58,2 | 13,7  | 4,1  | 5,3  | 1,6 | 7,6  | 4,5  |
|                         | c  | 4,48 | 0,7  | -24,4 | -0,5  | 103,0 | 42,0 | 45,7 | 11,3 | 29,7 | 23,7 | 59,7 | 27,9 | 63,0 | 45,5 | 106,6 | 34,8 | 106,2 | 30,3 | 8,9  | 2,5 | 30,0 | 17,1 |
|                         | d  | 5,68 | 0,04 | 11,7  | 0,24  | 108,2 | 43,7 | 61,6 | 15,1 | 11,0 | 8,7  | 68,9 | 31,8 | 48,7 | 34,8 | 70,9  | 22,9 | 124,3 | 35,1 | 24,8 | 7,0 | 34,2 | 19,3 |
| CLOUTASSES<br>(Pelouse) | a  | 4,71 | 0,52 | -6,3  | -0,17 | 33,2  | 17,6 | 11,3 | 3,6  | 6,1  | 6,4  | 26,8 | 16,5 | 27,7 | 26,3 | 63,0  | 27,6 | 23,4  | 8,7  | 16,5 | 6,3 | 0,3  | 0,2  |
|                         | d  | 5,8  | 0,03 | 26,5  | 0,53  | 50,1  | 20,1 | 25,0 | 6,1  | 9,8  | 7,7  | 47,6 | 21,9 | 31,8 | 22,6 | 62,3  | 20,0 | 8,9   | 2,5  | 1,8  | 0,5 | 30,1 | 16,9 |

Tableau n°44:Recapitulatif des concentrations et des flux aux différents stades du transit dans les écosystèmes

a: pluies

b: pluviolésivats

c: eaux du sol (20cm)

d: rivières

Cc: concentrations en microeq/l

Flux: Flux en kg/ha/an (sauf alcalinité, en keq/ha/an)

N.B.: Valeurs calculées ou estimées pour le cycle 1987-88.

## DISCUSSION

### A. PROFILS DE CONCENTRATIONS

Ce travail a permis d'examiner l'évolution de la composition chimique des eaux au long de leur transit dans l'écosystème. Le tableau n°41 et les figures n°58 à 60 illustrent cette évolution. On remarquera que l'on a mis sur des courbes séparées les eaux du sol obtenues par extraction qui, contrairement aux autres, n'ont pas forcément un mouvement gravitaire. Il faut aussi noter que la continuité entre les différents points n'est qu'une convention graphique, puisque des étapes sont manquantes, en particulier les eaux de percolation des litières, les eaux gravitaires des horizons profonds et les eaux de nappe. Pour les Urfruits, la composition des eaux de rivières a été calculée à partir des quelques analyses disponibles pour ce ruisseau (DUMAZET, 1981, FARAH, 1987) et de la composition des eaux de La Latte avant 86.

#### *a. Cas de la hêtraie*

La plupart des éléments présentent un maximum de concentration dans l'horizon organique. Cela résulte de l'interaction de nombreux facteurs: les eaux de pluies se sont enrichies au passage des frondaisons par lixiviation, récrétion ou dissolution de dépôts atmosphériques, puis au passage des strates holorganiques par lixiviation des litières en voie de minéralisation, puis dans les premiers cm du sol par mélange avec des eaux plus concentrées, et désaturation du complexe adsorbant favorisée par la dissociation des acides organiques très présents ici. Cette désaturation est probablement très limitée, eu égard à la faible offre de ces sols très pauvres, et à une agressivité des eaux assez faible car l'acidité de la pluie a été en grande partie neutralisée lors du pluviolessivage. Mais cette neutralisation s'est faite aux dépens du stock de cations des végétaux, qu'ils vont reconstituer par prélèvement racinaire, ce processus jouant bien sûr en sens inverse des précédents mais pas pour tous les éléments: PRENZEL (1979) a montré que les hêtres absorbent sélectivement Ca, K, N et P, passivement S, Mg et Fe et ont tendance à limiter l'absorption de Cl, Na et Al.

Ca, et surtout K présentent en revanche des pics de concentration dans les pluviolessivats: la lixiviation du potassium des feuilles est très importante, le calcium est un élément majeur dans la pluie et les dépôts occultes. Ils ont en commun qu'ils font l'objet d'une absorption active par la végétation, qui peut expliquer la baisse rapide de leurs concentrations.

La suite du parcours des eaux est marquée par une baisse plus ou moins marquée des concentrations et une remontée progressive du pH: les acides organiques ont précipité, se sont minéralisés et ne sont donc plus présents en solution, les anions sont absorbés par les plantes (NO<sub>3</sub>), ou

Figure 58: profils de concentrations. —:eaux libres .....:eaux liées

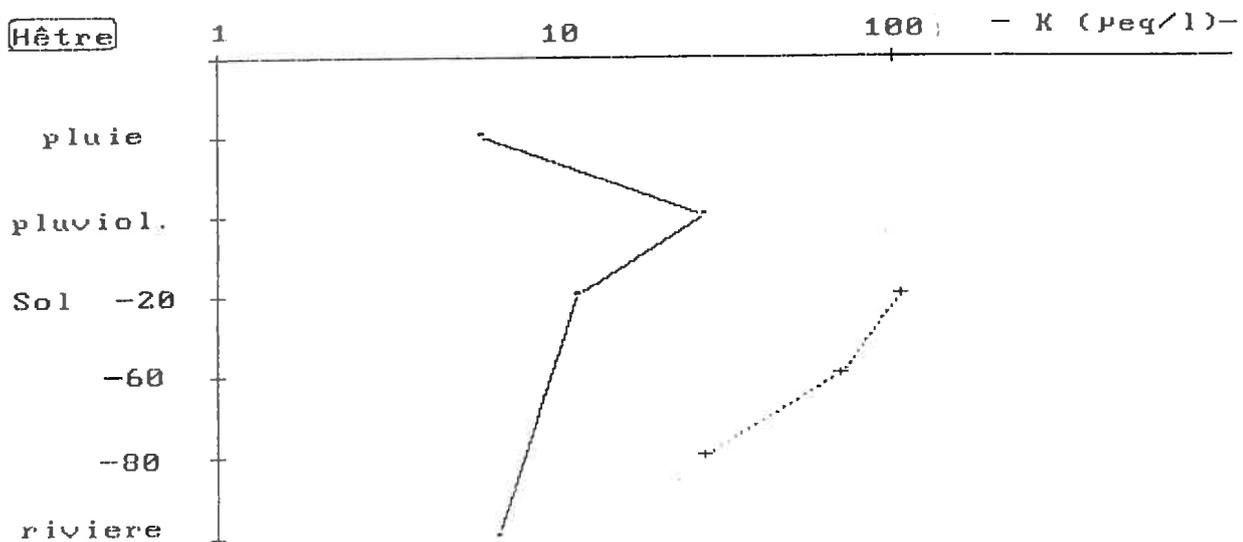
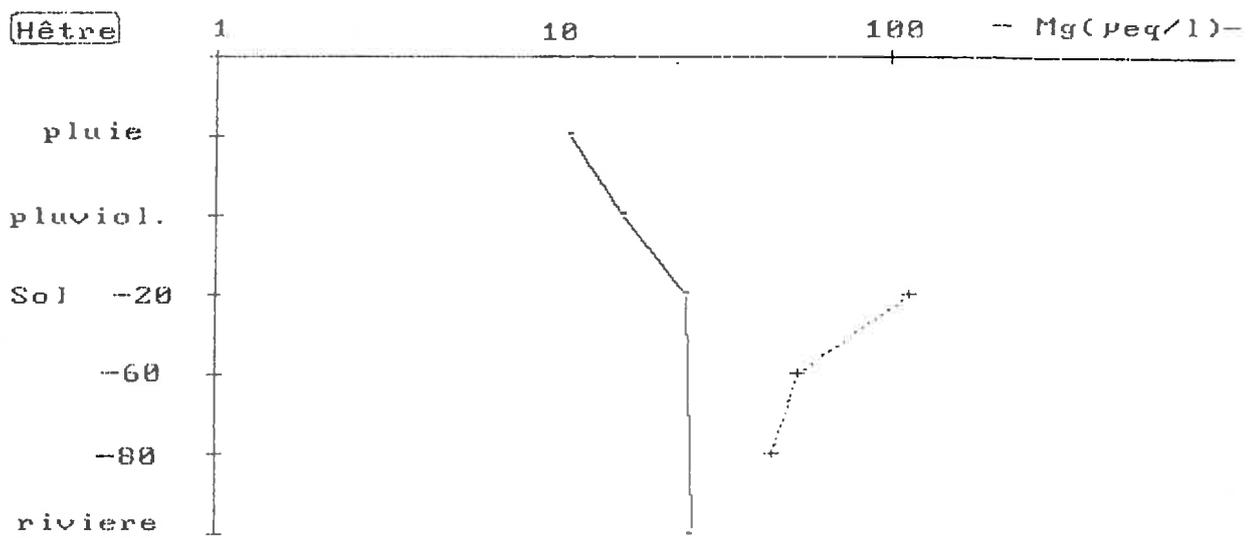
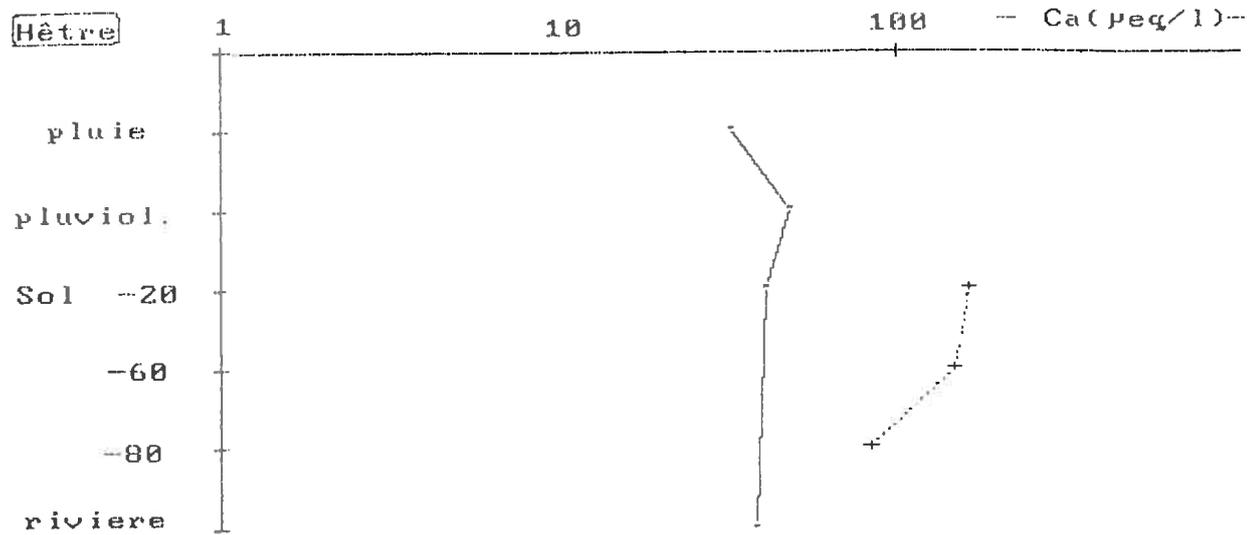




Figure 58: profils de concentrations. —:eaux libres .....:eaux liées

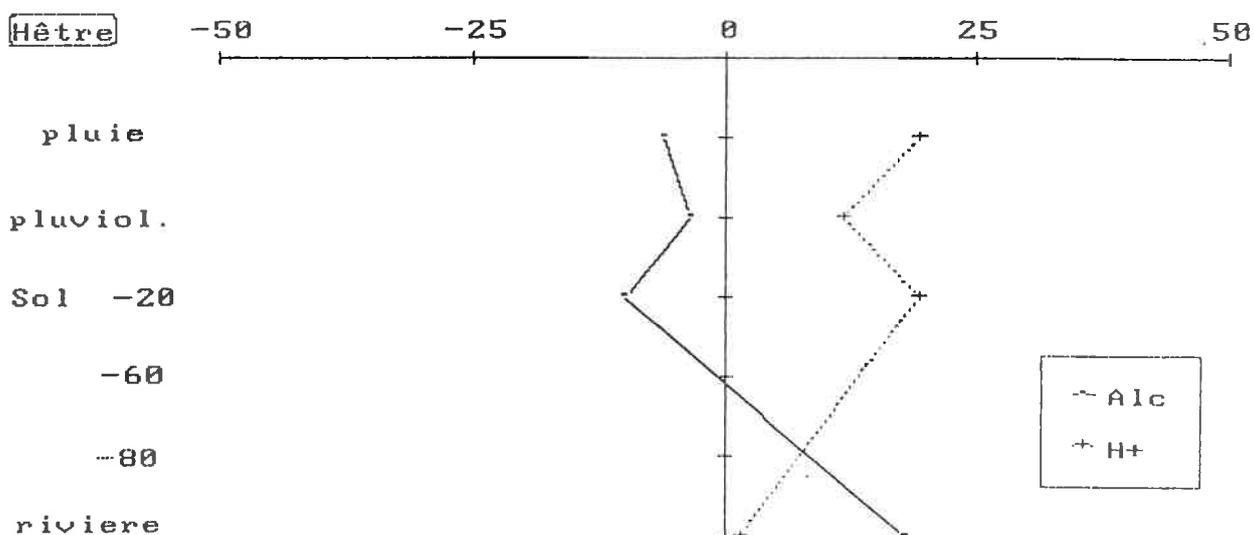
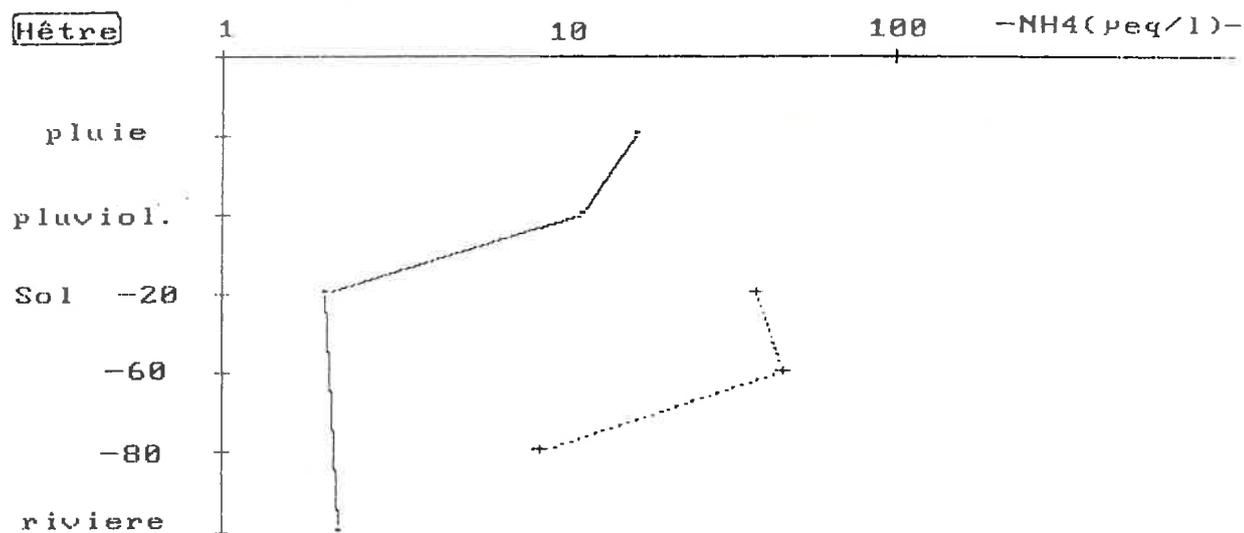
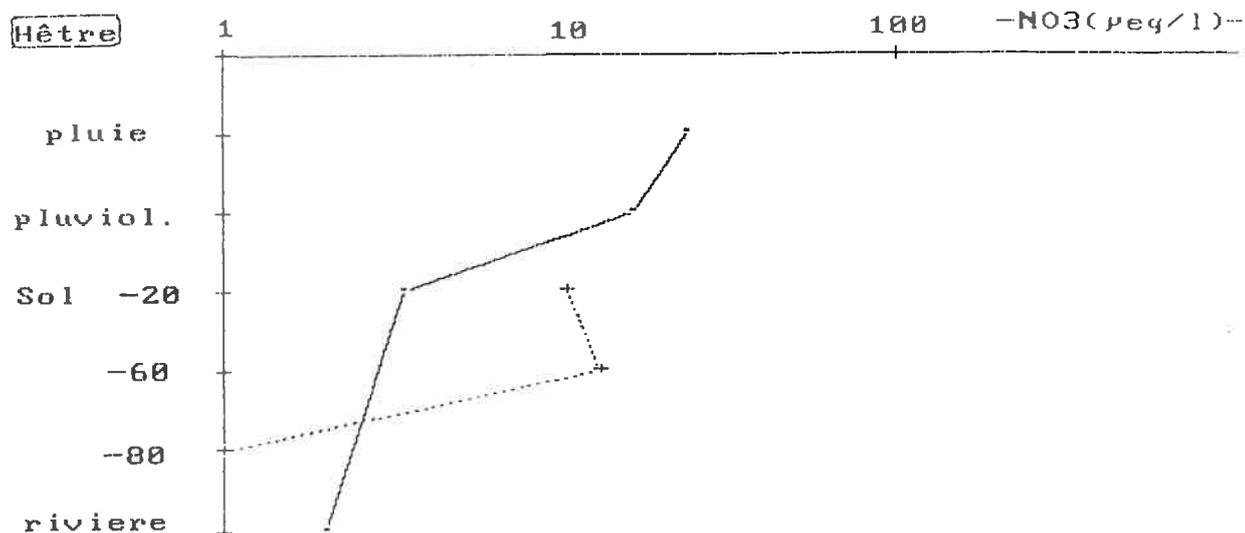


Figure 59: profils de concentrations (Urfruits). —:eaux libres .....:eaux liées

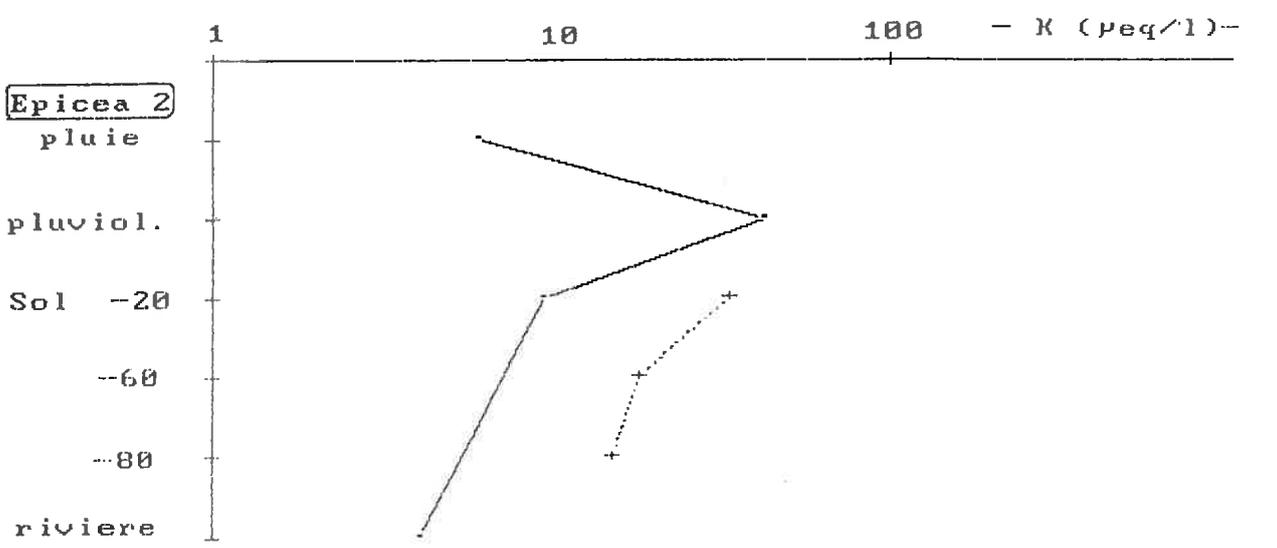
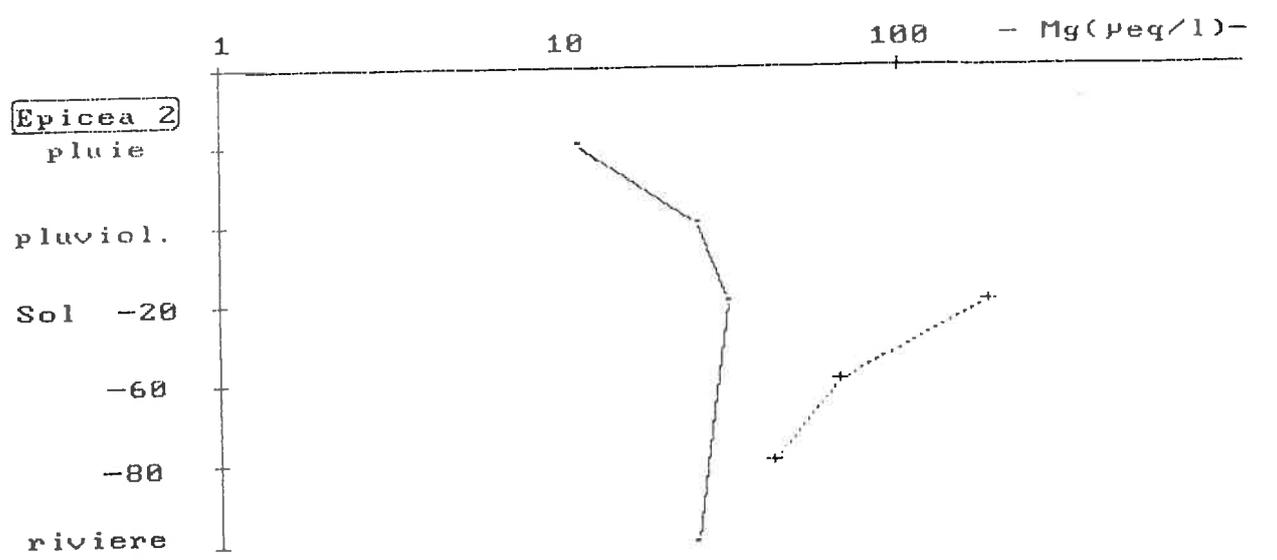
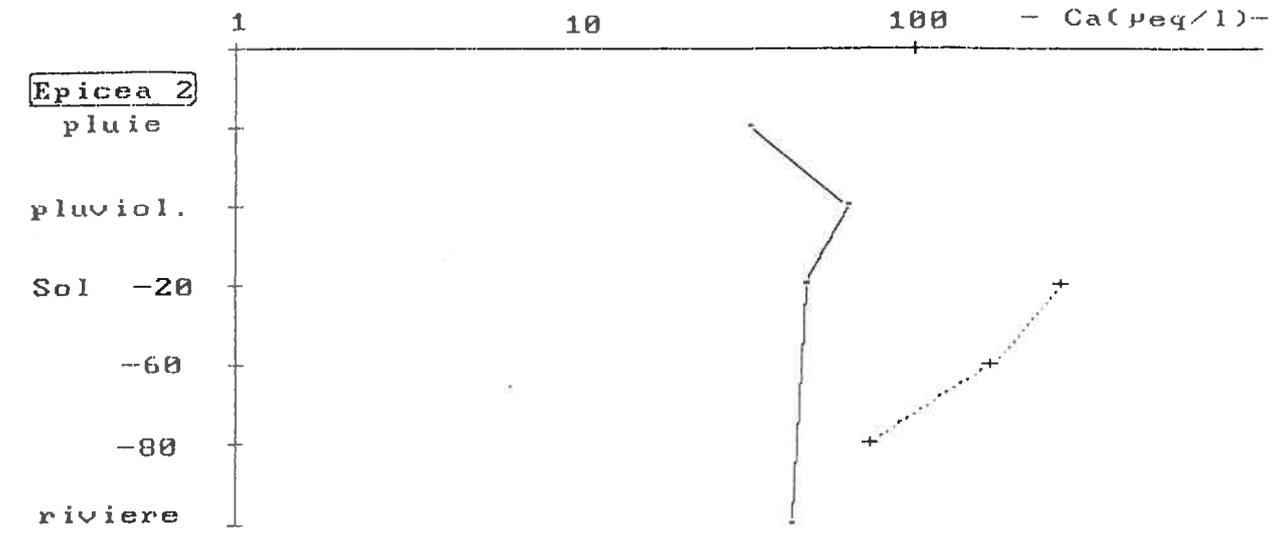


Figure 59: profils de concentrations (Urfruits). —:eaux libres .....:eaux liées

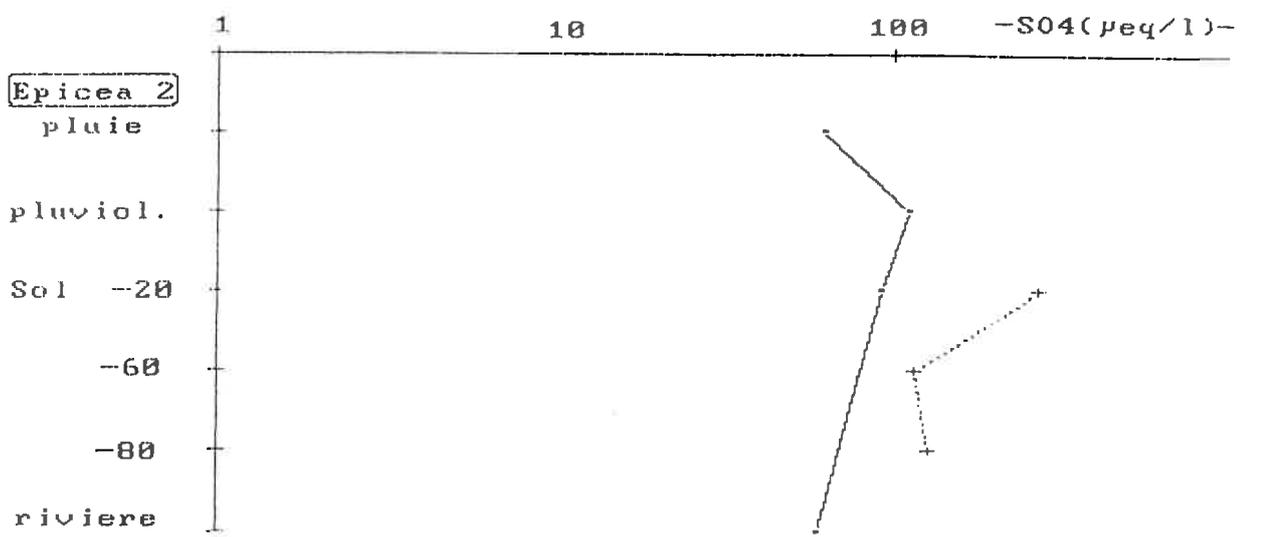
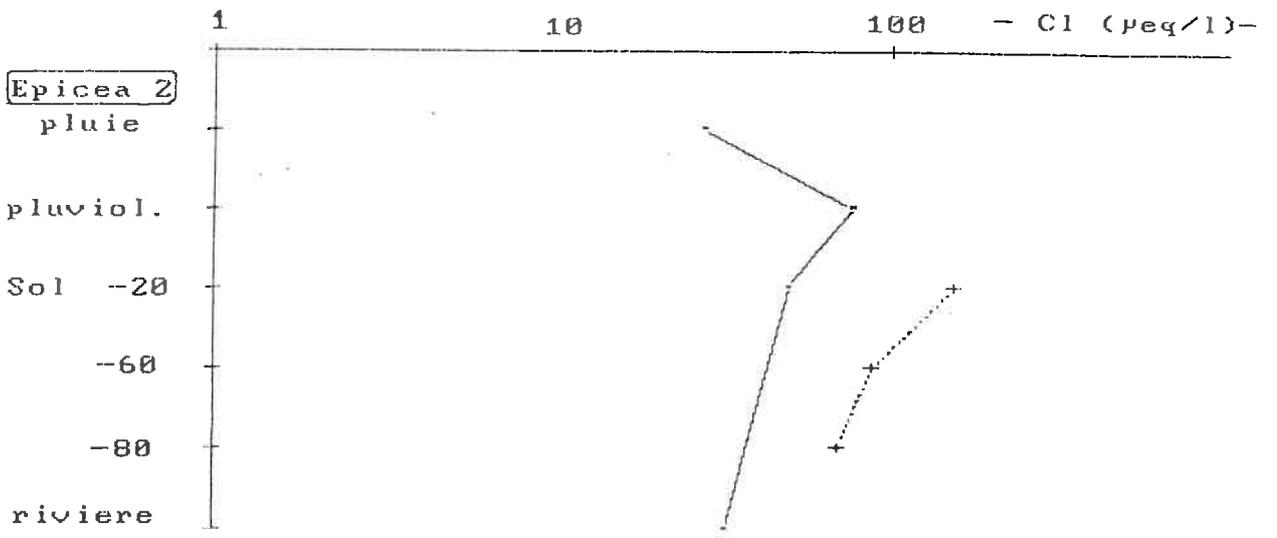
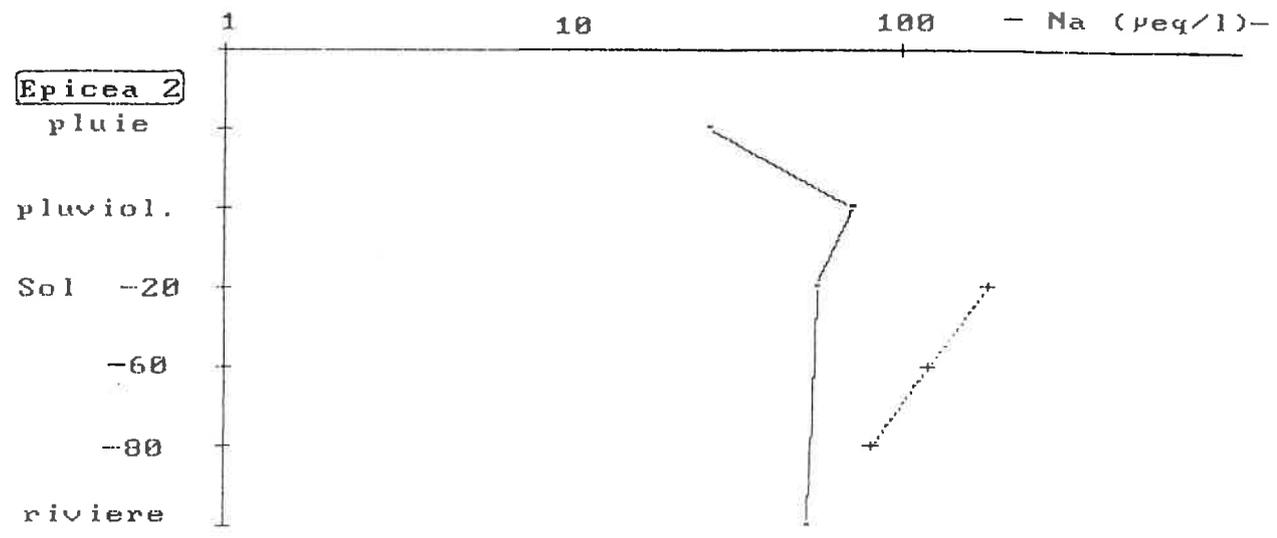


Figure 59: profils de concentrations (Urfruits). —:eaux libres .....:eaux liées

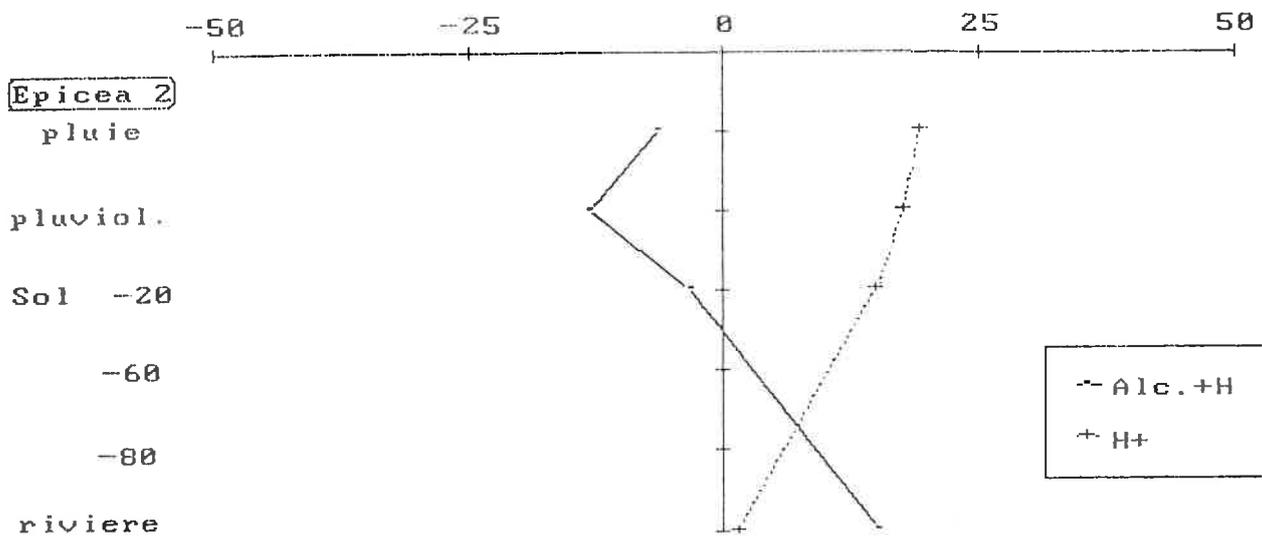
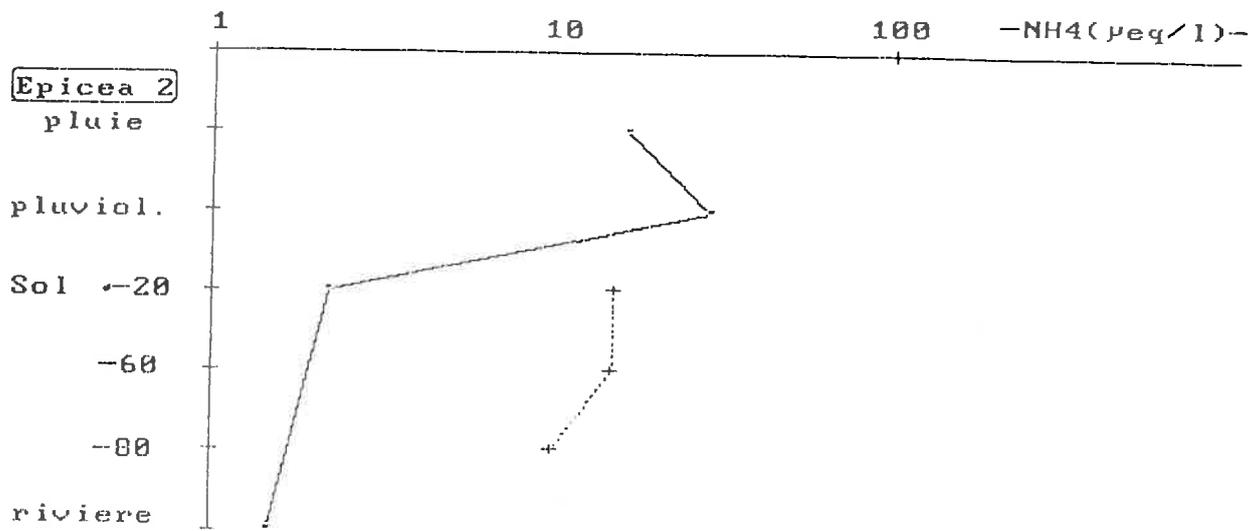
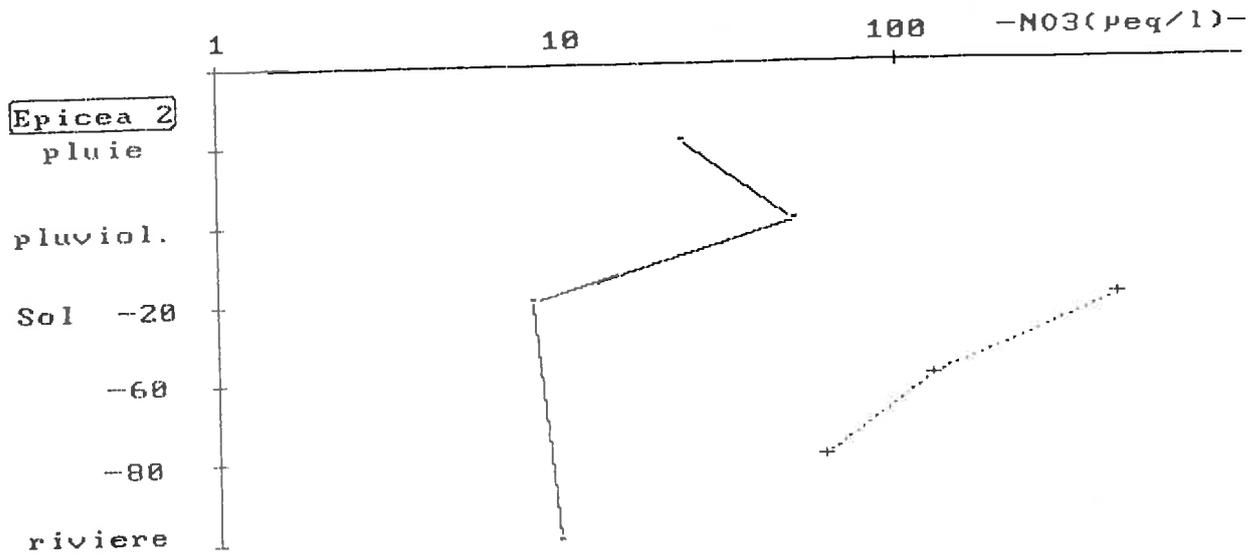


Figure 60: profils de concentrations (Latte). —:eaux libres .....:eaux liées

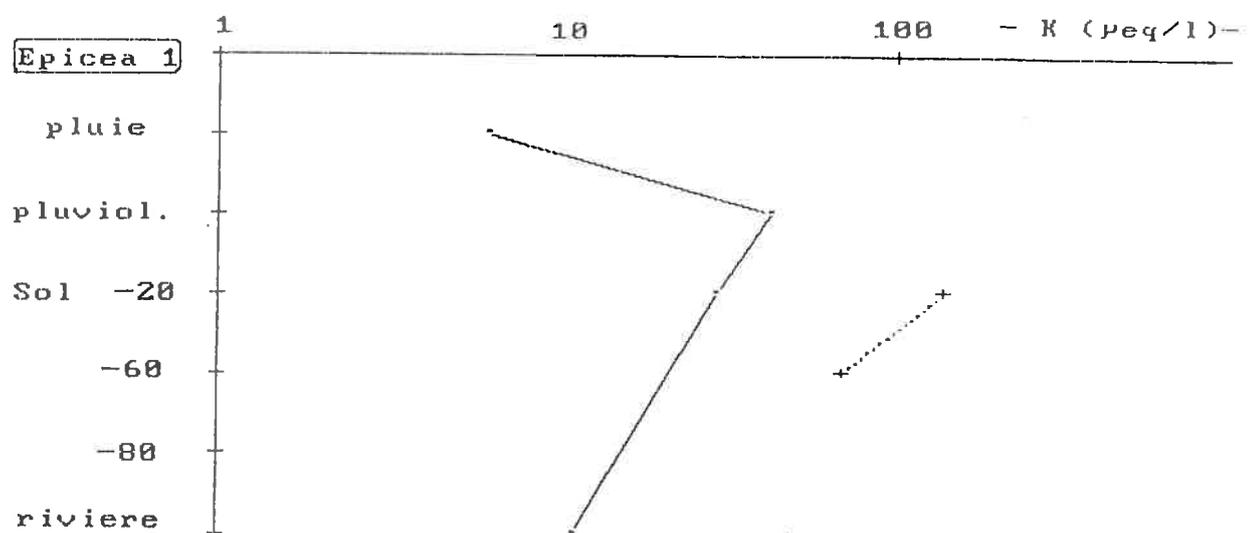
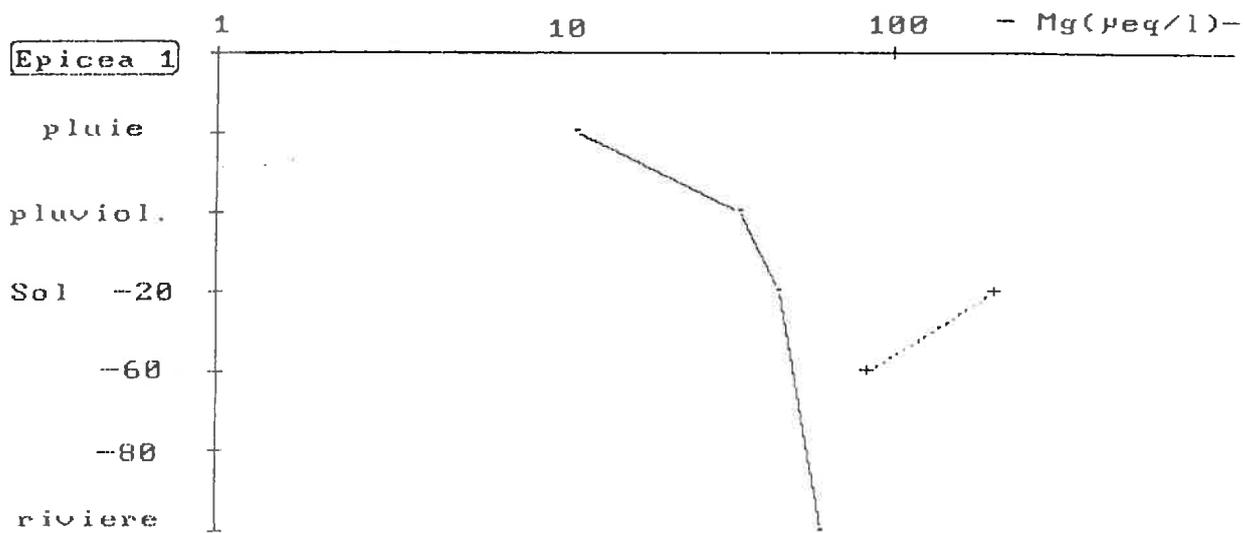
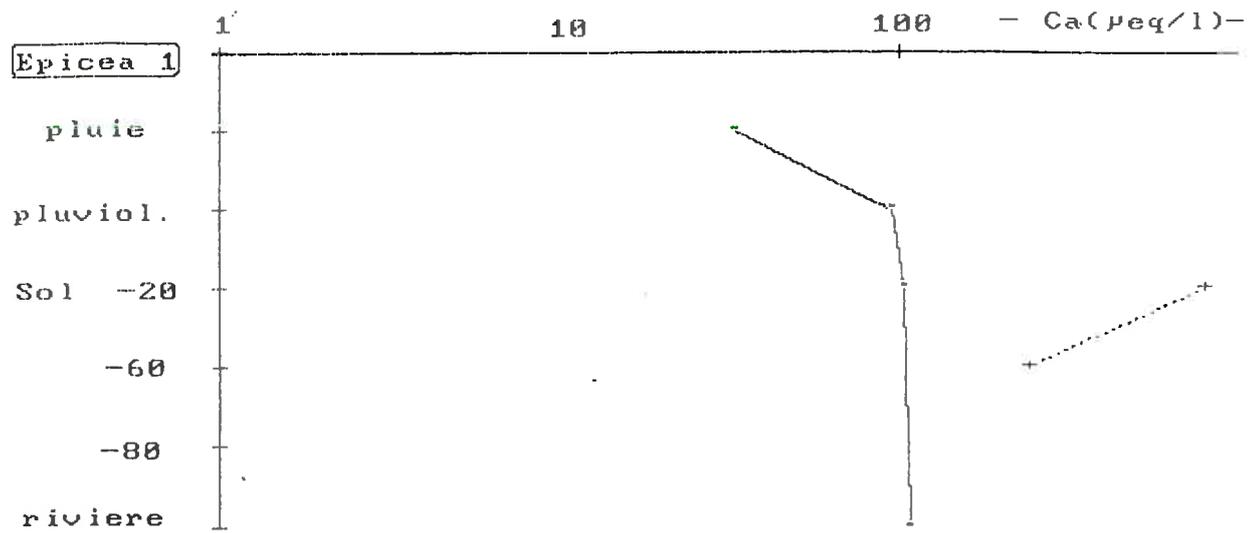


Figure 60: profils de concentrations (Latte). —:eaux libres .....:eaux liées

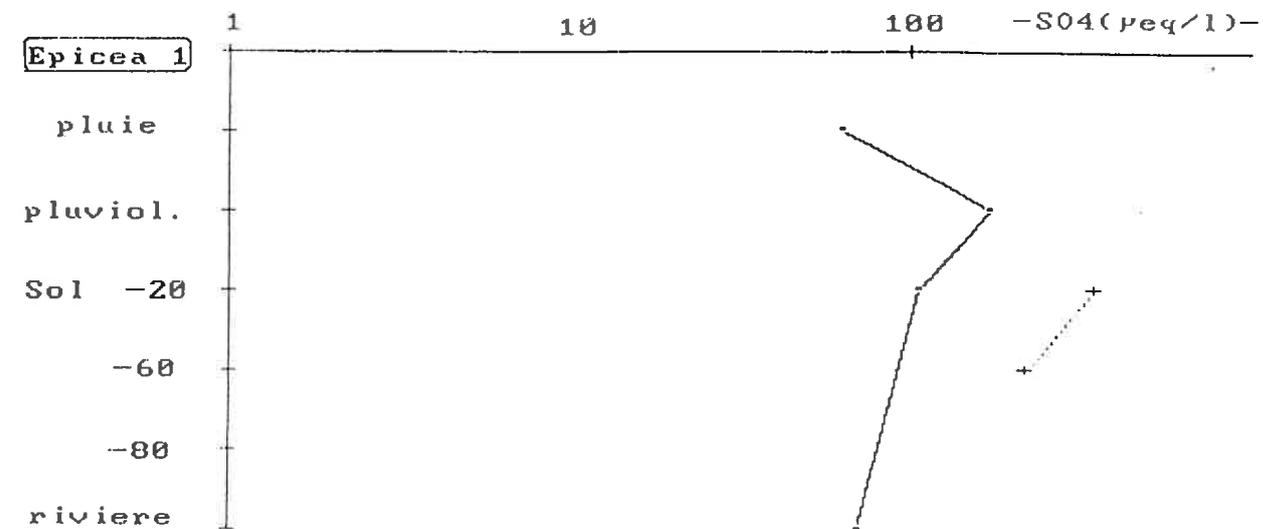
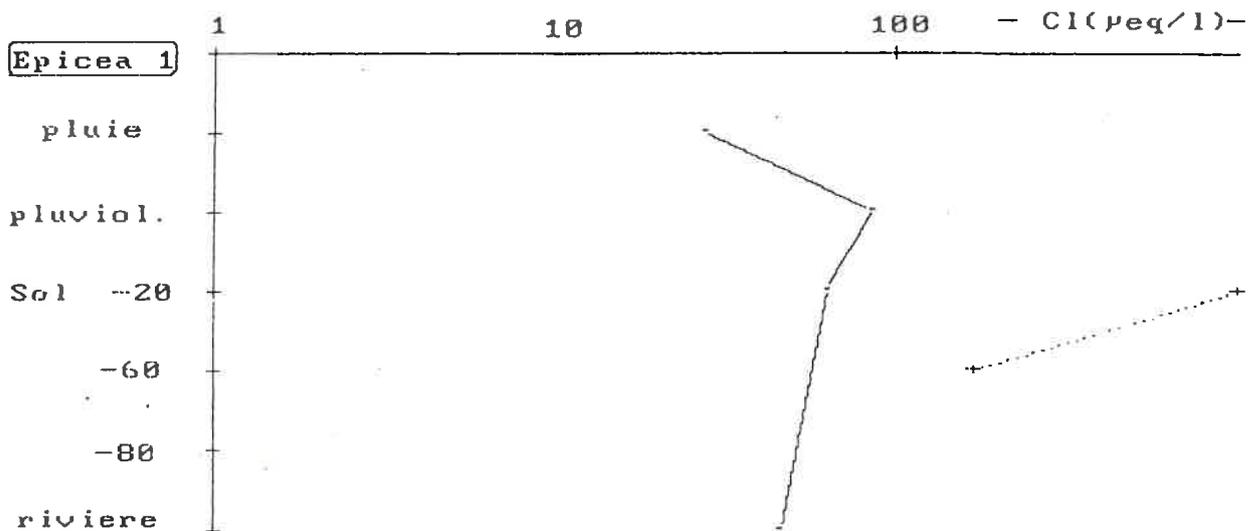
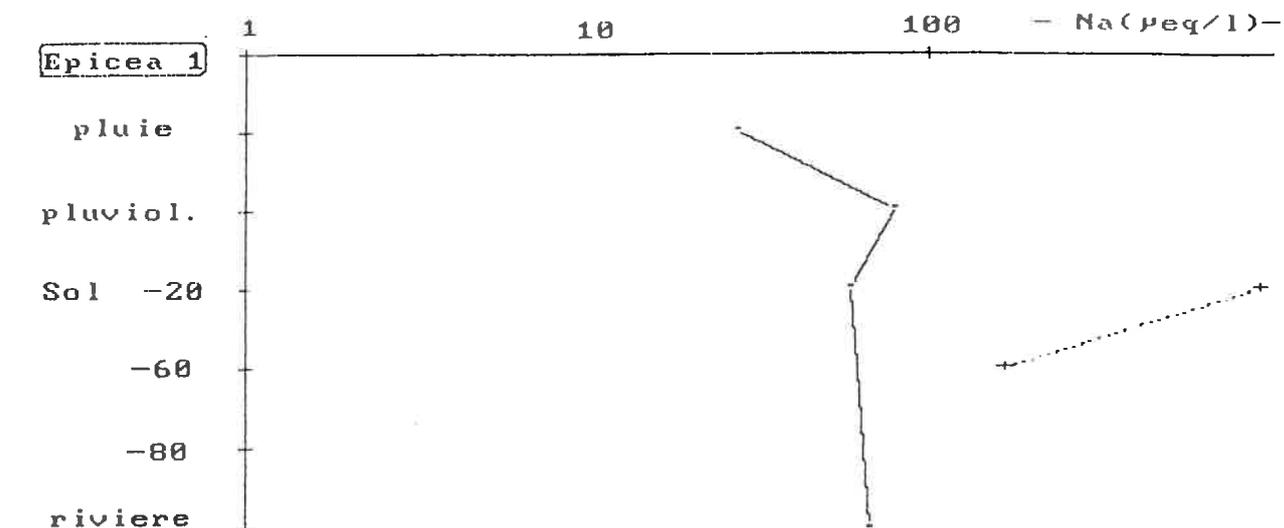
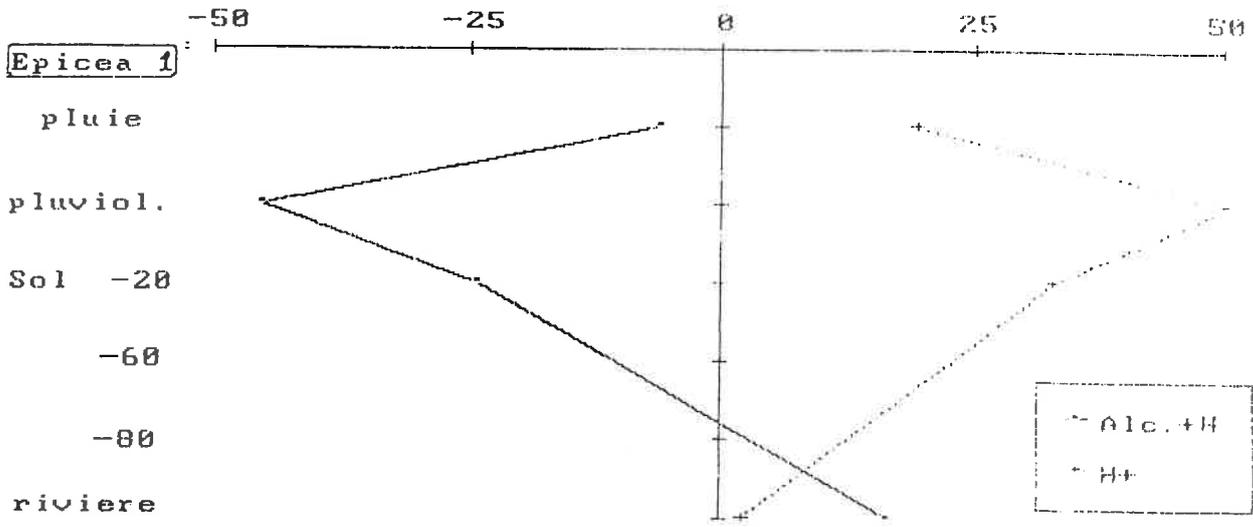
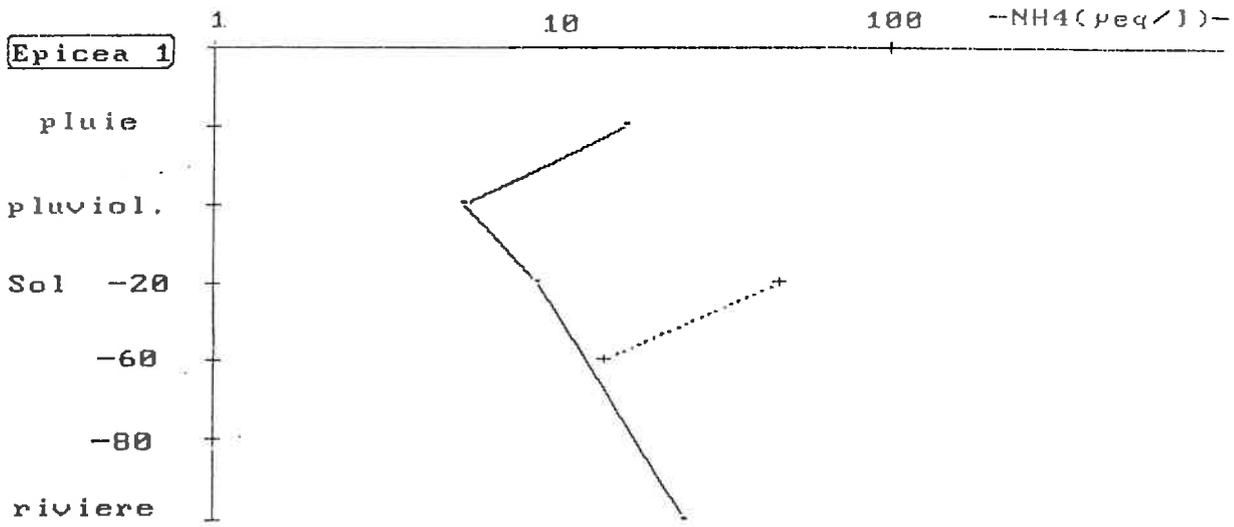
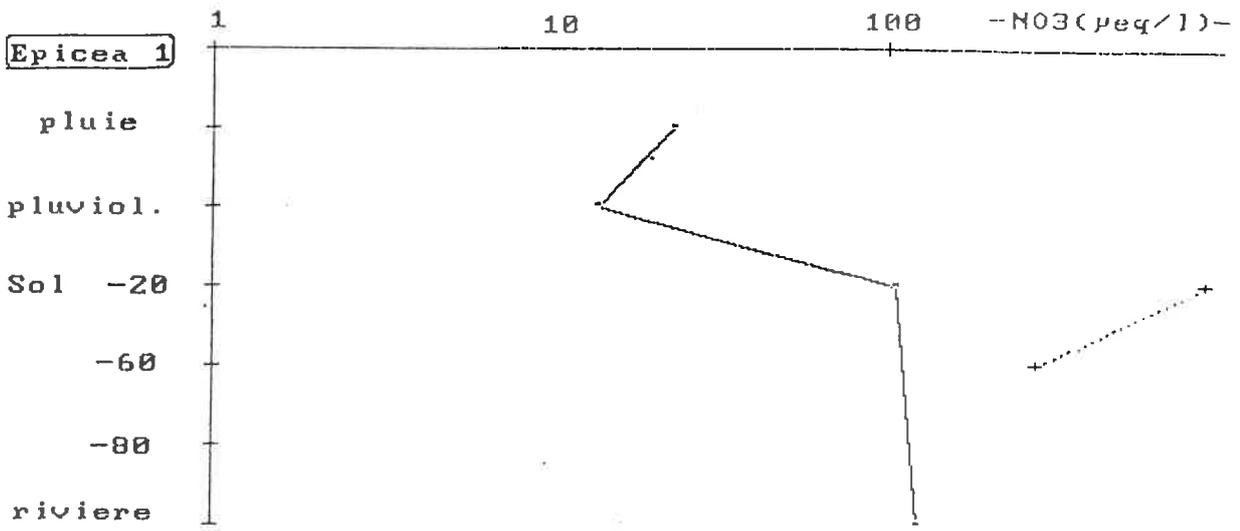


Figure 60: profils de concentrations (Latte). —: eaux libres    - - - : eaux liées



sont insolubilisés selon des modalités qui restent à préciser, mais vraisemblablement surtout par adsorption sur des sites à charges positives (hydroxydes d'Al et de Fe). Les cations sont eux aussi absorbés par les plantes ou peuvent être retenus de différentes façons (adsorption sur le complexe d'échange, rétrogradation au sein des édifices minéraux pour K, participation à des néoformations). A l'inverse, la silice et les cations sont libérés par altération.

L'évolution des teneurs en Azote minéral ne suit pas ce schéma, puisque les concentrations diminuent d'étape en étape, mis à part une très légère remontée de  $\text{NH}_4$  entre l'Al et La rivière, non confirmée par l'évolution des teneurs dans les eaux liées du sol. S'il est naturel que nitrate et ammonium soient fortement absorbés par la végétation, on pourrait néanmoins s'attendre à une augmentation des teneurs en nitrate en période hivernale ou au début du printemps, quand l'activité biologique est faible (LIKENS et al, 1977). Il est cependant à noter que la minéralisation de la matière organique se fait à un rythme très lent, comme en témoigne le caractère très humifère des sols et le C/N élevé de la matière organique.

#### *b. La pessière "saine"*

L'essentiel des phénomènes décrits ci-dessus reste valable, mais avec des nuances importantes: d'abord, le niveau général des concentrations est plus élevé dès le stade pluviollessivats. Ensuite, un plus grand nombre d'éléments présentent leur maximum de concentration dans les pluviollessivats. A part le potassium, il s'agit d'éléments fortement apportés sous forme occulte: Ca, Na, Cl,  $\text{SO}_4$ . Il est quand même probable qu'un pic de concentration existe juste sous la litière et que les eaux recueillies à 20cm, mélange d'eau de percolation verticale et d'apports latéraux, présentent des caractéristiques d'eaux plus profondes. Quoiqu'il en soit, bien que le passage des frondaisons n'ait pas ici suffi à neutraliser l'acidité incidente (il y a même diminution de l'alcalinité), cette neutralisation doit intervenir assez haut dans le profil et sans appauvrissement drastique des réserves minérales. Les concentrations en  $\text{NO}_3$  et  $\text{NH}_4$  sont nettement plus élevées que dans la hêtraie, avec un maximum accentué dans les pluviollessivats qui n'a pas encore d'explication satisfaisante, et une diminution continue ensuite.

#### *c La pessière déperissante*

Le comportement de la station de La Latte diffère en bien des points des deux précédents. D'une part le passage des frondaisons se traduit par une très forte augmentation de l'acidité des eaux: il est possible qu'aux apports atmosphériques acides s'ajoutent des acides organiques libérés par le feuillage malade.

Ensuite, même si le pH diminue nettement dans les eaux de l'Al, l'acidité n'est neutralisée qu'au prix d'une forte mobilisation des cations dans le sol, comme le traduisent

Figure 61: profils de concentrations (synthèse)

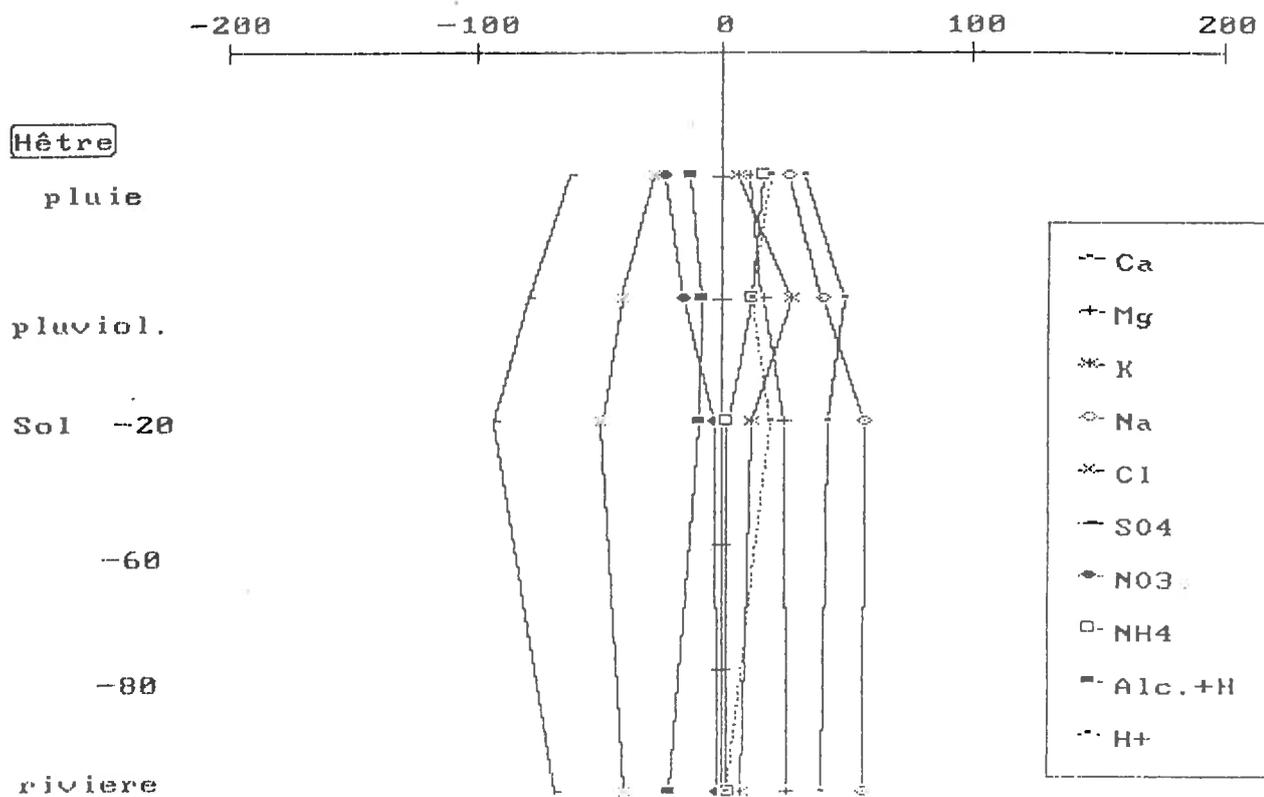


Figure 62: profils de concentrations Urfruits (synthèse)

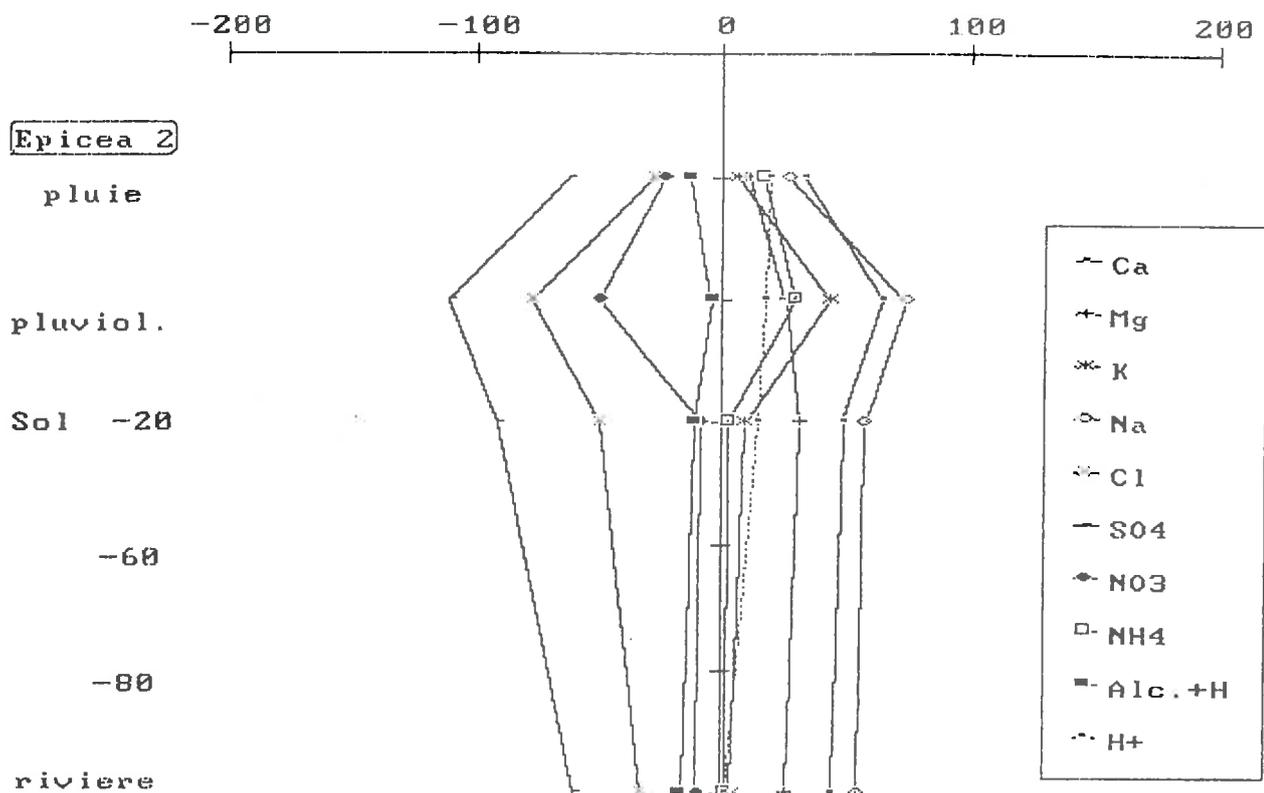


Figure 63: profils de concentrations Latte (synthèse)

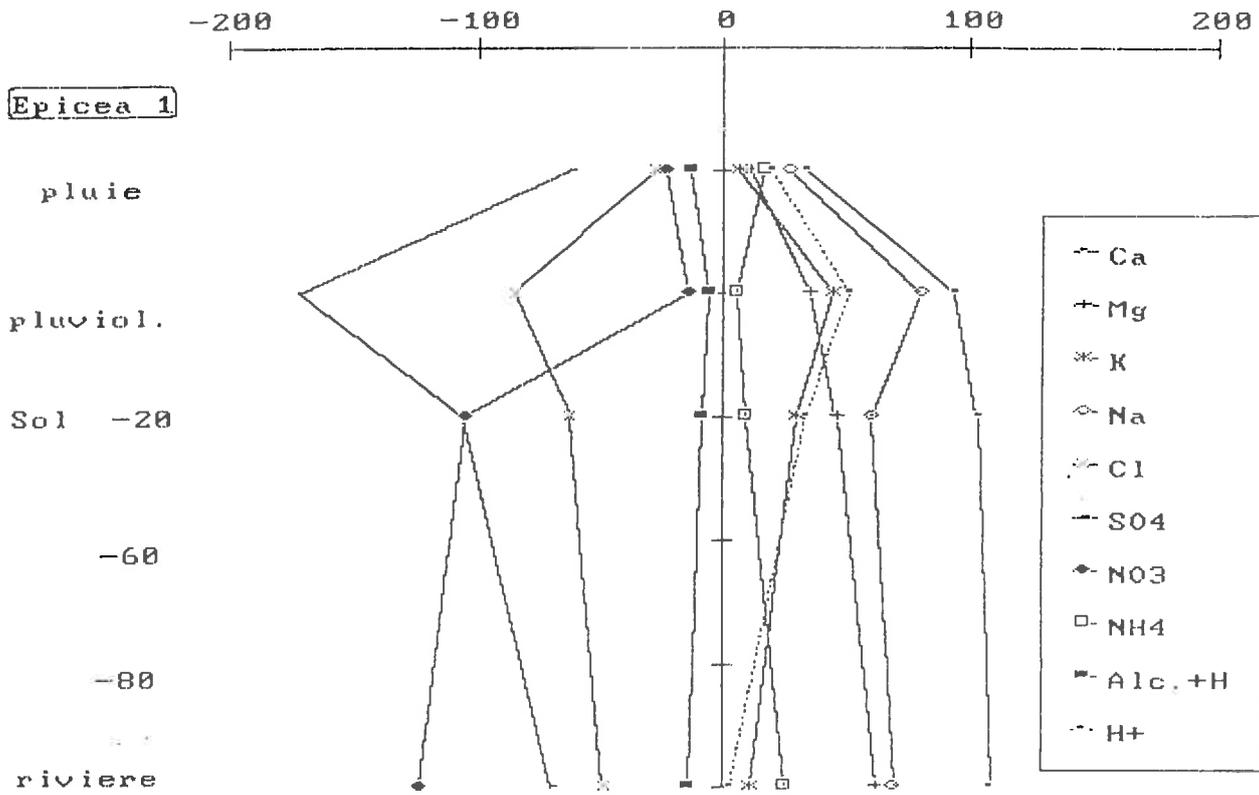
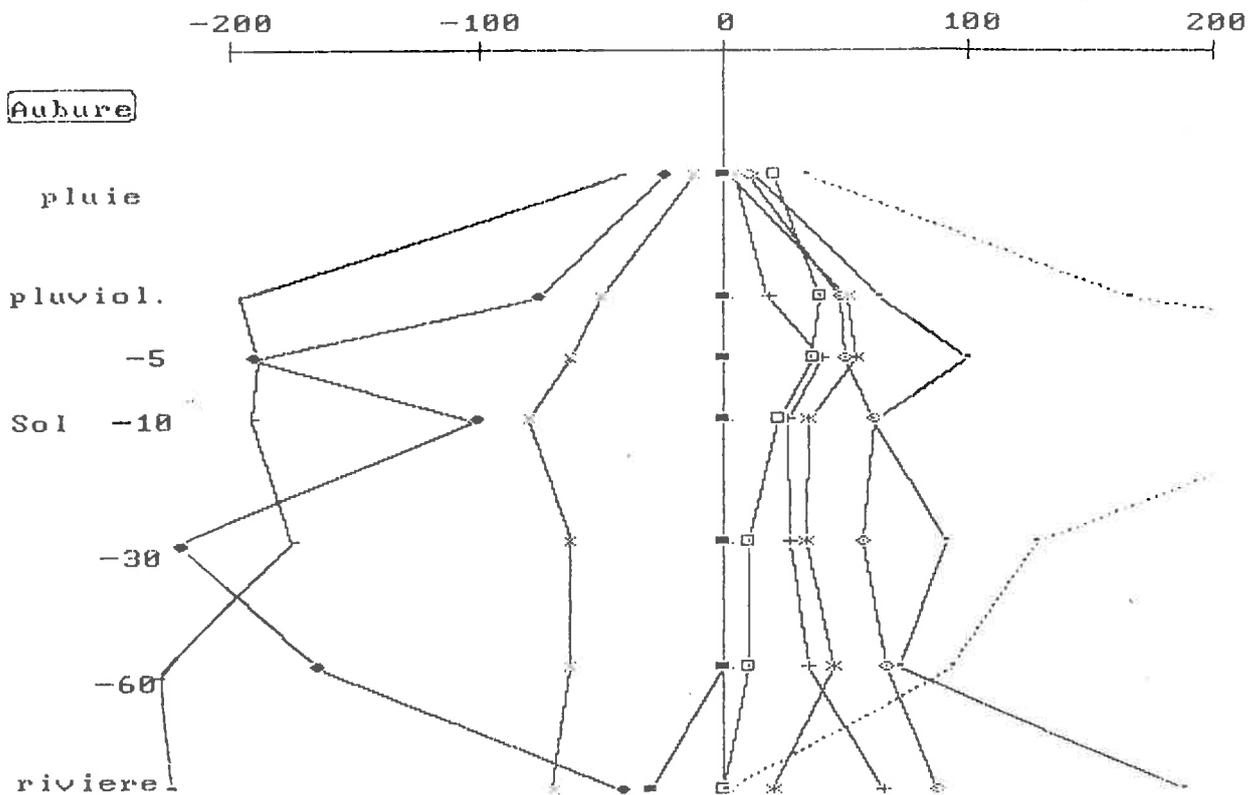


Figure 64: profils de concentrations à Aubure (d'après PREVOSTO, 1988)



en particulier les augmentations de concentrations en Ca, Mg et Na. Cette acidité n'est d'ailleurs pas principalement d'origine allochtone, mais elle est due à la forte nitrification liée à l'ouverture du peuplement et à l'arrêt du prélèvement racinaire, qui se traduit par une augmentation brutale des concentrations en nitrates dès l'Al. Et c'est bien dans cette brutale ouverture du turnover de l'azote que réside la clé des principaux bouleversements créés par la coupe.

En revanche, l'allure des profils de concentrations en sulfates et chlorures est assez semblable à celle des autres épiceas, quoique se situant à des niveaux plus élevés.

#### *d. synthèse*

La comparaison des profils de concentrations dans ces trois stations et dans la pessière déperissante d'Aubure (Fig. 61 à 64) nous montrent quatre types de comportement très tranchés:

-une forêt de feuillus en milieu peu pollué: Ses caractéristiques sont une neutralisation de l'acidité incidente très précoce, des niveaux de concentrations très bas trahissant une faible activité biologique et géochimique, mais en état quasi-stationnaire si l'on excepte la forte accumulation de Soufre dans les horizons profonds. C'est une situation d'écosystème naturel sur substrat peu altérable: la productivité est faible, les sols n'évoluent que très lentement, et le tout est d'une grande fragilité face à une éventuelle exploitation.

-Une forêt d'épiceas en bonne santé en milieu peu pollué. Ici les apports sont un peu plus abondants et un peu plus acides, mais cette acidité est neutralisée en grande partie à la base de l'Al sans grands dommages pour la réserve minérale du sol. Il y a aussi accumulation de soufre en profondeur.

-une forêt d'épiceas malades en milieu peu pollué: L'acidité incidente atmosphérique s'ajoute à l'acidité intrinsèque des pools organiques en voie de minéralisation pour provoquer de fortes exportations de cations qui semblent dans un premier temps provenir du complexe d'échange du sol, puisque les niveaux de silice en solution ne varient pas. Il y a encore accumulation de soufre dans le sol, qui diminue car les entrées occultes sont moins élevées du fait de la disparition du feuillage.

-une forêt d'épiceas déperissants en milieu pollué. Les apports occultes sont plus importants que les apports en solution, ils représentent un apport de protons considérable qui va, dans un premier temps être associé aux bases conjuguées des acides organiques des horizons superficiels. Ces pH très bas provoquent la solubilisation de l'aluminium qui domine la composition des eaux gravitaires profondes, associé aux anions d'acides fort  $SO_4$  et  $NO_3$ . Les eaux pénétrant dans l'arène présentent donc un caractère

très acide qui permettra l'altération rapide de ses minéraux, occasionnant enfin la neutralisation, mais au prix d'exportations de cations et de silice très importants et prélevés sur le stock à long terme des sols, sans profit pour la végétation car hors de la zone où les prélèvements racinaires sont importants, et à une vitesse bien supérieure à celle de l'immobilisation biologique. Là, le soufre n'est pas retenu mais exporté, ce qui constitue une source supplémentaire de protons (voir § suivant).

Ces différents cas montrent donc des degrés d'acidification croissants, dont on peut tenter la caractérisation par le calcul des bilans de protons.

## B LES BILANS DE PROTONS

### a. Mode de calcul

Les bilans de protons permettent d'évaluer l'importance relative des différents processus produisant ou consommant des protons au sein de l'écosystème (BOURRIE, 1976, PACES, 1983, VAN BREEMEN et al, 1984, MULDER, 1988, BINKLEY et RICHTER, 1987). Il existe différentes façons de présenter ces bilans, selon la définition du compartiment auquel est appliqué le calcul (phase solide du sol ou solution, par exemple), et selon la manière de comptabiliser les "sources" et les "puits" de protons. Nous proposerons ici des bilans calculés sur la solution transitant dans l'écosystème, en définissant comme suit les différents termes:

#### Sources

$H/CO_2$  = acidité incidente nette =  $Alc_{sols} - Alc_{air}$ . Le bilan de l'alcalinité prend en compte les flux de protons libres et l'acidité due à la dissolution du  $CO_2$  de la phase gazeuse du sol.

$N_{trans}$  = Bilans des transformations de l'azote =  $(NH_4^+_{air} - NH_4^+_{sols}) - (NO_3^-_{air} - NO_3^-_{sols})$ :

Cette formule, due à Van Breemen et al. (83), permet de comptabiliser la production (ou consommation) de protons due à l'ensemble des transformations de l'azote: assimilation des ions nitrate et ammonium par la biomasse, nitrification, assimilation de  $N_2$  atmosphérique, etc.

$Cat. ass.$  = Assimilation de cations par la biomasse: Toute assimilation d'un équivalent de cations par les racines revient à la libération d'un équivalent de protons (pour les détails, cf. BRINKLEY et RICHTER, 1987). Les valeurs des immobilisations minérales dans la biomasse (Tableau 42) ont été calculées d'après des données bibliographiques (DUPRAZ, 84, LELONG et al, 87) et d'après une étude sur la productivité de la pelouse et sa gestion par le troupeau ovin la parcourant (CABURET, 1986). Une évaluation plus précise à récemment été entreprise pour les deux forêts.

#### Puits

$An. ass.$  = Assimilation d'anions par la biomasse: Inversement

à ce qui précède, tout assimilation d'un équivalent d'anions par les racines revient à la consommation d'un équivalent de protons.

An. Ads.=insolubilisation d'anions= $An_{i,n} - An_{e,t} - An_{ass.}$  :  
 Déduite de l'équation de conservation de la masse (cf.introduction), cette formule permet d'estimer la fixation des anions (en l'occurrence Cl et SO<sub>4</sub>) dans le sol, qui équivaut à une immobilisation de protons.

Alt.=Altération/désaturation= $Cat_{e,t} - Cat_{i,n} + Cat_{ass.}$  :  
 Déduite aussi de l'équation de conservation de la masse, cette formule permet d'estimer la solubilisation des cations présents dans les minéraux et sur le complexe adsorbant, qui équivaut à une immobilisation de protons.

|                         | Ca  | Mg  | K   | Na  | Cl  | S   | N    | Si  |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| CLOUTASSES<br>(Pelouse) | 2,0 | 0,2 | 1,0 | €   | 0,2 | 0,1 | 3,1  | €   |
| SAPINE<br>(Hêtres)      | 4,0 | 0,8 | 3,0 | 1,0 | €   | 0,5 | 5,0  | 1,0 |
| LATTE<br>(Epiceas)      | 6,0 | 1,0 | 5,0 | 1,0 | €   | 2,0 | 10,0 | 2,0 |

Tableau 42:Accroissement minéral moyen de la biomasse sur les trois bassins-versants.Valeurs en kg/ha/an

Les tableaux 43 à 45 présentent les résultats obtenus sur une moyenne des cinq premiers cycles (pour lesquels les données manquantes ont été estimées à partir des résultats des deux dernières années) et sur le cycle 87-88 où tous les paramètres (sauf l'assimilation biologique) ont été mesurés.On peut remarquer que la somme de toutes ces relations équivaut à:

$$\text{sources-puits} = Alc_{e,t} - Alc_{i,n} - \Sigma C_{e,t} + \Sigma A_{e,t} + \Sigma C_{i,n} - \Sigma A_{i,n}$$

où C et A représente les cations et anions non susceptibles d'accepter des protons.Les différences entre les totaux de puits et de sources sont donc dû au mauvais "bouclage" de la balance ionique des eaux, en particulier des pluies.

Eu égard à l'incertitude sur la plupart des termes des bilans, la non-prise en compte des dépôts secs et des variations annuelles de l'immobilisation biologique, les valeurs proposées ne sont que des estimations peu précises.

| Moyenne 81-85           | H/CO2 | Ntrans | Cat. ass. | Σsources | Σpuits | An. ass. | An. ads. | Alt. |
|-------------------------|-------|--------|-----------|----------|--------|----------|----------|------|
| CLOUTASSES<br>(Pelouse) | 0,41  | 0,05   | 0,14      | 0,6      | 1,24   | 0,01     | 0,43     | 0,8  |
| SAPINE<br>(Hêtres)      | 0,24  | 0      | 0,39      | 0,63     | 0,98   | 0,01     | 0,41     | 0,56 |
| LATTE<br>(Epiceas)      | 0,31  | 0,05   | 0,55      | 0,91     | 1,44   | 0,04     | 0,11     | 1,29 |

Tableau 43: Bilans de protons moyens pour les trois bassins-versants.  
Valeurs en keq/ha/an

| cycle 87-88             | H/CO2 | Ntrans | Cat. ass. | Σsources | Σpuits | An. ass. | An. ads. | Alt. |
|-------------------------|-------|--------|-----------|----------|--------|----------|----------|------|
| CLOUTASSES<br>(Pelouse) | 0,7   | 0,03   | 0,14      | 0,87     | 1,32   | 0,01     | 0,57     | 0,74 |
| SAPINE<br>(Hêtres)      | 0,43  | 0,17   | 0,39      | 0,99     | 1,1    | 0,01     | 0,49     | 0,6  |
| LATTE<br>(Epiceas)      | 0,39  | 1,83   | ?         | 2,22     | 3,08   | ?        | 0,08     | 3    |

Tableau 44: Bilans de protons 1987-88 pour les trois bassins-versants.  
Valeurs en keq/ha/an

| 7-88(+dp occ.)          | H/CO2 | Ntrans | Cat. ass. | Σsources | Σpuits | An. ass. | An. ads. | Alt. |
|-------------------------|-------|--------|-----------|----------|--------|----------|----------|------|
| CLOUTASSES<br>(Pelouse) | 0,9   | 0,03   | 0,14      | 1,07     | 1,3    | 0,01     | 0,63     | 0,66 |
| SAPINE<br>(Hêtres)      | 0,8   | 0,17   | 0,39      | 1,36     | 1      | 0,01     | 0,72     | 0,27 |
| LATTE<br>(Epiceas)      | 1,3   | 1,83   | ?         | 3,13     | 3,35   | ?        | 1,73     | 1,62 |

Tableau 45: Bilans de protons 1987-88 pour les trois bassins-versants, avec les dépôts occultes. Valeurs en keq/ha/an

## *b. interprétation*

On peut tout d'abord constater que parmi les trois sources de protons calculées, celle correspondant aux transformations de l'azote est tout à fait mineure, sauf pour le cycle 87-88 à La Latte. Il en est classiquement ainsi, à l'échelle annuelle, quand il n'y a pas de modification drastique des pools d'azote dans le système (BINKLEY et RICHTER, 1987). Les deux autres sources ont sensiblement la même importance. Rappelons qu'en prenant en compte les dépôts secs, on peut dire que entre 0,4 et 1,4 keq/ha/an de protons viennent de polluants atmosphériques (cf. tab. 19 p74) soit près de la moitié du total des sources, ce qui est tout à fait important pour des écosystèmes réputés peu pollués. On peut toutefois souligner que dans le cas d'Aubure, l'acidité d'origine atmosphérique représente 85% des sources (DAMBRINE, 1988), ce qui est loin d'être le cas ici.

En ce qui concerne les puits de protons, les conclusions diffèrent si l'on considère les dépôts occultes ou si on les néglige. Dans le premier cas, les protons sont consommés majoritairement par l'altération (et/ou désaturation), surtout sous épicéas où le rôle de l'immobilisation du soufre apparaît très faible. Dans le deuxième cas, les deux phénomènes sont d'égale importance, sauf sous hêtres où l'adsorption anionique devient prépondérante. Selon la première hypothèse, les sols sous épicéas ne retiendraient presque pas le soufre, et selon la seconde, ils en retiendraient deux fois plus que les sols des autres bassins.

Sans doute faut-il ici adopter une position moyenne. Il est vraisemblable que la capacité des sols à retenir les anions est voisine dans les trois bassins (cf. VANNIER, 1987), le surplus d'acidité dans la pessière étant neutralisé par un surplus de désaturation et d'altération. Il n'en reste pas moins que l'immobilisation du soufre reste un système consommateur de protons d'une grande importance dans ces trois bassins, plus qu'à Aubure par exemple où, malgré une rétention de soufre non nulle dans les sols (0,4 keq/ha/an, DAMBRINE, op.cit.), les sources de protons trois fois plus fortes que sur le Mont-Lozère sont contrebalancées par une importante mobilisation d'Aluminium et de protons jusqu'à l'arène, d'où la forte altération de celle-ci. Il semblerait donc que la capacité de rétention d'anions de ce type de sol soit faible, voire même qu'elle diminue lorsque l'acidité augmente. D'après FULLER et al. (1987), cette capacité de rétention liée aux hydroxydes d'Aluminium et de Fer augmenterait quand le pH baisse (les hydroxydes devenant de plus en plus chargés positivement), mais diminuerait à partir de pH 4.3, car les édifices minéraux seraient alors attaqués. KHANNA et al. (1987) aboutissent à des conclusions similaires en invoquant la précipitation et la redissolution de minéraux de type Basalumite ou Jurbanite (Mais ces minéraux n'ont jusqu'à maintenant jamais été mis en évidence dans ce type de sols). Ces hypothèses se fondent, entre autres

faits, sur la concomitance des relargages de sulfates et de la mobilisation de l'aluminium, ce qui ne semble toutefois pas aussi net dans les sites français ou néerlandais, où l'aluminium en solution est surtout corrélé avec les nitrates (GRAS, 1988, DAMBRINE, 1988, VAN BREEMEN, 1982, MULDER, 1987).

Notons pour conclure sur ce point qu'à Aubure, il semble qu'une remobilisation du soufre ait lieu dans l'arène, puisque les bilans entrées-sorties du bassin-versant sont fortement négatifs. Une étude comparée des stocks et des formes de soufre serait certainement très instructive, car on a peut-être là, nonobstant les différences entre les sites, une sorte de chronoséquence. Cette question est d'une grande importance pratique, car si la constitution d'un stock de soufre est, à court terme, un moyen de limiter l'acidification des eaux et la désaturation des profils, c'est aussi une acidification effective du sol (MULDER, 1987) qui peut nuire à la réversibilité des dommages en cas de réduction des apports acides (HAUHS et WRIGHT, 1988).

## CONCLUSION GENERALE

### A. RÉCAPITULATIF: SITUATION DES TROIS ÉCOSYSTÈMES SUR LE CHEMIN DE L'ACIDIFICATION ET SCÉNARIOS POSSIBLES

Le fonctionnement hydrobiogéochimique actuel des bassins versants de Lozère se caractérise par les faits suivants:

-Des apports atmosphériques en grandes quantités, surtout sous forme soluble, peu acides, mais suffisamment tout de même pour représenter une source de protons importante, particulièrement sous épicéas (près de 50% du total des sources).

Malgré les incertitudes qui demeurent sur l'importance des dépôts occultes, on peut situer autour de 30kg/ha les apports annuels de soufre dans la hêtraie, dont les deux tiers en solution, et autour de 40kg/ha dans la pessière.

-Une neutralisation de cette acidité incidente dès les premiers stades du transit de l'eau, et au prix d'une mobilisation minime des réserves minérales des sols. A la base de l'horizon holorganique, le pH des eaux gravitaires est égal ou supérieur à celui du sol, et leur alcalinité croît rapidement.

-Des pertes en cations et en Silice effectivement limitées (moins de 5kg/ha/an de Calcium, de Magnésium et de Sodium, moins de 2kg/ha/an de Potassium, et environ 15kg/ha/an de Silice) mais aussi une forte accumulation de soufre (entre 10 et 15kg/ha/an, au minimum).

-Un transit de la quasi-totalité des eaux à travers la couche bio-pédologique, malgré la faible capacité des réservoirs du sol (50 à 100mm) et du sous-sol.

-Une productivité biologique faible, vraisemblablement stable actuellement, limitée essentiellement par les facteurs climatiques et en particulier par le déficit en eau estival.

-Une certaine fragilité liée à la forte désaturation du complexe adsorbant des sols et à la fréquence de stress climatiques: les sécheresses accentuées sont suivies de phases de lixiviation de cations et de sulfates.

Au total, l'absence de symptômes de dépérissement dans le secteur (si l'on exclut l'attaque parasitaire de La Latte, dont le lien avec la qualité de l'air paraît peu probable) s'explique par ce fonctionnement encore proche de la normale, qu'il faut peut-être attribuer à une pollution encore faible et vraisemblablement récente. Toutefois, l'accélération des pertes en bases après chaque crise climatique et surtout à l'occasion de la suppression du couvert forestier montre que cet équilibre est capable de se rompre facilement, et si pour l'instant ces

dysfonctionnements ont un caractère épisodique et accidentels, il n'en sont pas moins irréversibles à court terme et fragilisent chaque fois un peu plus le milieu. De plus, l'accumulation du soufre dans les sols n'est pas sans susciter des inquiétudes sur le long terme. Par conséquent, en se gardant de toute extrapolation abusive, on peut penser que la menace d'une dégradation rapide de ce fonctionnement est à écarter pour la hêtraie, sauf bouleversement majeur. Pour les forêts d'épicéas, l'avis doit être plus nuancé: il conviendra d'abord d'évaluer les pertes dues à la coupe et le temps de retour à la normale, mais il semble désormais évident que le cycle résineux/coupe rase/résineux est à éviter, ce dont la plupart des forestiers sont déjà conscients. Ainsi, si l'on reprend les premières conclusions de Dupraz (1984), il se confirme qu'un peuplement d'épicéas en bon état et exploité rationnellement ne provoque pas de désaturation rapide des sols, ni d'augmentation drastique de l'altération. Mais le fait qu'il augmente globalement l'acidité du sol (par augmentation des pools d'azote et de soufre, et vraisemblablement de l'acidité d'échange), et les effets néfastes de la suppression du couvert lors de l'exploitation doivent être pris en compte par le gestionnaire soucieux de la pérennité de la fertilité chimique du sol. Le cas de la pelouse est différent: les risques d'acidification ne sont pas à l'ordre du jour dans ce milieu dont l'avenir immédiat est soumis à un contexte socio-économique incertain. Lieu d'une activité agricole frappée d'obsolescence (la transhumance ovine), mais qui donne au paysage de la montagne lozérienne sa beauté incomparable, sa conservation passerait par la mise en oeuvre de ce qu'il est convenu d'appeler "une politique volontariste et à long terme", Arlésienne de tous les amateurs de voeux pieux...

## B- PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'intérêt des suivis de longue durée de bassins-versants n'est plus à démontrer. Le programme Mont-Lozère, de par son ancienneté, la diversité des domaines abordés, la situation des sites au sein d'instances de protection et de recherche nationales et internationales et... son faible coût, mérite assurément d'être maintenu et développé. De plus, la relative lourdeur d'une telle expérience est compensée par la possibilité d'une réorientation des objectifs suivis en fonction des thèmes de recherches prioritaire au niveau national ou européen. Mais pour cela, les lacunes actuelles devront être comblées pour valoriser les résultats acquis et prétendre à une place de référence internationale. D'autre part, un certain nombre de questions restent posées et sont des possibles thèmes de recherche à développer. Voici le résumé des unes et des autres, qui nous paraissent d'une égale importance:

-Souci constant d'améliorer la fiabilité des analyses, même au prix d'un échantillonnage moins ex-

haustif:mieux vaut peu de données très fiables qu'une pléthore de résultats douteux.

-Poursuite de la caractérisation fine du substratum,des formations superficielles et des sols,en mettant l'accent sur la variabilité spatiale et la dynamique actuelle.

-Intensification et affinement des mesures qualitatives et quantitatives sur les eaux du sol et des pluviollessivats, au moins au printemps et en automne,afin de mieux maîtriser leur variabilité pour réduire l'incertitude sur les entrées et les flux internes.Un suivi des eaux gravitaires à d'autres profondeurs (haut de l'horizon A11 et sommet de l'arène,par exemple).

..-Suivi de l'aluminium en solution, surtout dans les eaux du sol, et de la matière organique dissoute (avec si possible distinction entre alcalinité carbonatée et non carbonatée).

-Dynamique et formes du soufre dans les sols,en comparaison avec un site plus acidifié tel qu'Aubure par exemple,afin d'évaluer les réels dangers de son acumulation dans les sols.

-Meilleure évaluation des stocks et modélisation de l'évolution des réserves de la zone saturée et du sol, et caractérisation de leur composition chimique.

-Développement du volet biologie:biomasse,minéralomasse,retour au sol par la litière,matière organique des sols et des solutions.

-Poursuite de l'analyse des données disponibles,avec d'autres outils statistiques:analyse des séries chronologiques,analyses corrélatoires et spectrales...

La majeure partie de ces investigations sont difficilement contournables dans la perspective d'une modélisation déterministe du fonctionnement biogéochimique de ces sites, qui serait une étape importante à franchir dans le développement de cette recherche.

Vaste programme,déjà en partie initié...Si le présent travail peut contribuer,d'une manière ou d'une autre, à la poursuite et l'approfondissement de l'un quelconque de ces thèmes,il aura atteint la plus précieuse de ces ambitions.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON-CALLES U.M., et ERIKSSON E., 1979. Mass balance of dissolved inorganic substances in three representative basins in Sweden. *Nordic Hydrology*, pp. 99-114
- AUSSENAC G., BONNEAU M., LE TACON F., 1972. Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'Est de la France. *Oecol. plant.* tome 7, 1, pp. 1-21.
- AVILA A., 1987. Balanç d'agua i nutrients en una conca d'alzinar al Montseny. Tesi doctoral, universitat autonoma de Barcelona. 150p.
- AVILA A., RODA F., 1988. Export of dissolved elements in a evergreen-oak forested watershed in the Montseny Mountains (NE Spain). *Catena*, suppl. 12, pp. 1-11.
- BAKER T.G., et ATTIWILL P.M., 1987. Fluxes of elements in rain passing through forest canopies in south-eastern Australia. *Biogeochemistry*, 4, pp. 27-39.
- BARTH M., 1987. Reversibility of acidification. Proc. of a workshop, Grimstad, Norway, 9-11 june 1986, Elsevier Appl. Sci., London.
- BESSEMOULIN P., 1987. Liaison entre conditions atmosphériques et pollution. in "Les recherches en France sur le déperissement des forêts", rapport DEFORPA n°1, ENGREF NANCY, pp 47-51
- BINKLEY D. et RICHTER D., 1987. Nutrients cycles and H+ budgets of forest ecosystems. *Advances in Ecol. Res.*, vol. 16, pp. 1-51.
- BONNEAU M., et LANDMANN G., 1988. De quoi la forêt est malade? *La Recherche* n°205, vol n°19, pp. 1543-1563.
- BONNEAU M., 1983. Conséquences des monocultures résineuses et alternatives possibles. Rapport scientifique final. ATP écosystèmes, CNRS, 68p.
- BONSANG B., 1982. Le soufre dans l'atmosphère. *La Recherche*, n°137, vol. 13, pp. 1133-1142.
- BOUCHARD M., 1983. Bilan géochimique et origine d'éléments dissous dans un bassin-versant granitique breton (France). *Revue de Géol. dyn. et de géogr. phys.*, vol. 24, fasc. 4, pp. 363-379.
- BOUDJEMLINE D., 1987. Susceptibilité au ruissellement et aux transports solides de sols à texture contrastées. étude expérimentale au champ sous pluies simulées. Thèse 3ème cycle, Univ. d'Orléans, 266p.
- BOURRIE G., 1976. Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibre minéraux-solutions dans les eaux naturelles. *Sciences du sol*, n°3, pp. 141-160.
- BOURRIE G., 1978. Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux Granites des Vosges et de la Margeride. Thèse doc.-ing., Univ. L. Pasteur Strasbourg, 174p.

- BOURRIE, 1989 à paraître.
- BULDGEN P., 1981. Features of nutrient leaching from organic soil layer microcosms of beech and spruce forests: effects of temperature and rainfall. *Oikos* 37, 8p.
- BULDGEN P., et REMACLE J., 1981. Influence of environmental factors upon the leaching of cations from undisturbed microcosms of beech and spruce litters. *Soil Biol. Biochem.*, vol. 13, pp. 143-147.
- BULDGEN P., et REMACLE J., 1984. Sulphur budget in forest watersheds in Haute-Ardenne region (Belgium). Proc. "acid deposition and sulphur cycle", Bruxelles, juin 84, pp. 163-172.
- CABURET A., 1986. Impact du pâturage sur les bassins-versants des Cloutasses et des Bouzèdes. Rapport interne PNC, Florac, 30p.
- CALOT G., 1973. Cours de statistique descriptive. Dunod ed., 488p.
- CEA, 1978. Statistique appliquée à l'exploitation des mesures. 2 tomes. Masson ed.
- CHERET V., 1987. La sapinière du Luchonnais (Pyrénées Hautes-Garonnaises): Etude phyto-écologique, recherches sur le phénomène de dépérissement forestier. Thèse Univ. Toulouse, 287p.
- CHRETIEN H., 1988. Contribution à l'étude de trois bassins-versants du Mont-Lozère. Rapport stage IUT BAGE Perpignan, 31p.
- COSANDEY C.M., BOUDJEMLINE D., LELONG F., ROOSE E.J. 1987. Etude expérimentale du ruissellement de surface sur des sols à végétation contrastée du Mont-Lozère. *Comm. Journ. hydrol. de Thonon*, oct. 87, 14p.
- CPCS, 1967. Classification des sols. Document multigrade, 96p.
- CRYER R., 1976. The significance and variation of atmospheric nutrients input in a small catchment system. *J. of Hydrol.*, 29, pp. 117-137.
- DAMBRINE E., PREVOSTO, B., 1988. Flux des éléments minéraux dans un écosystème forestier d'altitude soumis à une pollution atmosphérique. relations avec le dépérissement. Rapport scientifique DEFORPA, 25p.
- DAUGE J.M., 1986. Evaluation de l'impact de l'écobuage sur la fertilité du milieu (versant Sud du Mont-Lozère). Rapport final, PNC-Univ. d'Orléans, 119p.
- DEFORPA, 1989. Journées de travail, Nancy.
- DIDON J.F., 1985. contribution à l'étude de la variabilité spatio-temporelle des pluies sur le Mont-Lozère. Campagne 84-85. DEA USTL Montpellier, 80p.
- DIDON-LESCOT, J.F., DURAND P., LELONG F., BELAMIE R., 1988. Premières données sur les bilans d'azot minéral dans les bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère en liaison avec le suivi d'une coupe forestière. *Comm. CILEF, Aussoy*, mai 88, 12p.
- DUBOS, H., 1986. Caractérisation hydrique des sables du Mont-Lozère. Erreur de mesure. comparaison avec un matériel limoneux. Rapport interne, 7p.

- DUMAZET, B., 1983. modification de la charge chimique des eaux au cours du transit à travers trois écosystèmes distincts du Mont-Lozère. Thèse 3ème cycle, Univ. d'Orléans, 147p.
- DUPRAZ C., 1984. Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins versants comparatifs à végétation contrastée. Thèse Doc. Ing., 363p.
- DURAND P., 1987. Description des sols d'un bassin-versant du Mont-Lozère. Approche de leur dynamique actuelle et de leurs potentialités. Rapport PNC, 20p.
- DURAND P., LELONG F., DIDON-LESCOT J.F., 1987. Influence des conditions hydrologiques sur les bilans hydrogéochimique dans de petits bassins versants du Mont-Lozère. comm. Journées hydrol., Thonon, oct. 87, 12p.
- FARAH A.S., 1986. Variabilité spatiale de la composition chimique des eaux drainant le massif du Mont-Lozère et les massifs environnants. DEA Univ. d'Orléans, 42p.
- FELLER M.C., et KIMMINS J.P., 1979. Chemical characteristics of small streams near Haney, in southwestern British Columbia. Water Res. Res., vol.15 n°2, pp.247-258.
- FORGEARD F., GLOAGEN J.C., et TOUFFET J., 1980. Interception des précipitations et apports au sol d'éléments minéraux par la pluie et les pluviollessivats dans une hêtraie atlantique et dans quelques peuplements résineux en Bretagne. Ann.Sci.forest., 37 (1), 53-71.
- FOSTER I.D.L., 1979. Chemistry of bulk precipitation, throughfall, soil water and stream water in a small catchment in Devon, England. Catena, vol.6, pp.145-155.
- FULLER R.D., DRISCOLL C.T., LAWRENCE G.B., NODVIN S.C., 1987. Processes regulating sulphate flux after whole tree harvesting. Nature, 325, pp.707-710.
- GALLOWAY J.N., DIANWU Z., JILING X. et LIKENS G.E., 1987. Acid rain: China, USA and remote area. Science, vol.236, pp.1559-1562
- GLAVAC V., KOENIES H., JOCHHEIM H., HEIMERICH R., 1988. Relief effects on the deposition of air pollutants in forest stands-lead deposition as an example. Air pollution and ecosystems, Proc. symposium Grenoble, 18-22 mai 87, Mathy ed., pp.520-529.
- GRAS F., MERLET D., ROUILLER J., 1987. Apports atmosphériques et acidification des solutions de sol dans une forêt déperissante des Vosges (E. de la France). Air pollution and ecosystems, Proc. symposium Grenoble, 18-22 mai 87, Mathy ed., pp.520-529.
- GRAS F., 1988. Etude de l'aluminium dans les solutions de deux sols forestiers du massif vosgien. comm. journées de travail DEFORPA, Nancy, 24-26 fev. 1988, 21p.
- GUERIN F., 1987. Etude du fonctionnement de trois petits bassins versants du Mont Lozère à l'aide d'un modèle Hydrologique global et des analyse corrélatoires et spectrales. Rap. DEA, Univ. Orléans, 89p.

- HAUHS M., WRIGHT R.F., 1988. Acid deposition: reversibility of soil and water acidification - a review - CCE, Air Pollut. Report 11, 42p.
- IBP, 1978. Dynamics properties of forest ecosystems. Reichle ed., Cambridge Univ. press, 700p.
- IVENS W.P.M.F., DRAAIJERS G.P.J. et BLEUTEN W., 1988. Atmospheric nitrogen deposition in a forest next to intensively-used agricultural area. Air pollution and ecosystem, Mathy ed., CCE, pp.536-541
- JAMAGNE M., 1968. Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agron., vol.18 (hors série), 142p.
- JOHNSON D.W., et COLE D.W., 1980. Anion mobility in soil: relevance to nutrient transport from forest ecosystems. Environment International vol.3, pp79-90.
- JOHNSON P.L., SWANK W.T., 1975. Studies of cations budgets in the southern Appalachians on four experimental watersheds with contrasted végétation. Ecology, Vol.54, 3, pp.70-80.
- KATZ B.G., BRICKER O.P., KENNEDY M.M., 1985. Geochemical mass balance relationships for selected ions in precipitation and stream water, Catoclin Mountains, Maryland. Am. Journ. of Soil Sci., vol.285, pp.904-930.
- KELLER C., BOURRIE G., VEDY J.-C., 1987. Formes de l'alcalinité dans les eaux gravitaires. Influence des métaux lourds contenus dans des composts. Sci. du sol, Vol.5, 1, pp.17-29.
- KHANNA P.K., PRENZEL, J., MEIWES K.J., ULRICH B., MATZNER E., 1987. Dynamics of sulphate retention by acid forest soils in a acidic deposition environment. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987, 51 (2):446-452
- LELONG F., DUPRAZ C., DURAND P., DIDON J.F., 1987. Comparative hydrochemical budgets and weathering and acidification rates in three small similar granitics watersheds with contrasted végétation (Mont-Lozère, France). Comm. 8th intern. Symp. of environmental biogeochemistry, Nancy, 15p.
- LELONG F., DURAND P., DIDON J.F., 1988. Comparaison des bilans hydrogéo-chimiques, des taux d'altération et d'acidification dans trois petits bassins versants granitiques similaires à végétation contrastée (Mont-Lozère, France). Sci. Géol. Bull., 41, 3-4, pp.263-278.
- LELONG F. et SOUCHIER B., 1979. Méthodes d'identification et de quantification des constituants. in Pédologie, tome II, Bonneau et Souchier, Masson ed, 459p.
- LEWIS W.H., et GRANT M.C., 1979. Sampling and chemical interpretation of precipitation for mass balances studies. Water Res. Res. vol. 19, n°6, pp1098-1104.
- LIKENS, G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S., EATON J.S., JOHNSON N.M., 1977. Biogeochemistry of a forest ecosystem. Springer verlag, N.-Y., 146p.
- LOSSAINT P., RAPP M., 1978. La forêt méditerranéenne de chênes verts. In Problèmes d'écologie, M. Lamotte et F. Bourlière éd., Masson, Paris, pp.129-185.

- LOVETT G.M., et LINDBERG S.E., 1984. Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. *J. of Applied Ecology*, 21, pp. 1013-1027.
- LOVETT G.M., et LINDBERG S.E., 1985. field measurements of particle dry deposition rates to foliage and inert surfaces in a forest canopy. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 19, n°3, pp. 238-243.
- LOYE-PILOT M.D., MORELLI J., MARTIN J.M., GROS J.M., STRAUSS B., 1986. Impact of saharian dust on the rain acidity in the mediterranean atmosphere. *Comm. 4th European Symposium on physico-chemical behaviour of atmospheric pollutants. Stresa, Italie, sept. 86.*
- LOYE-PILOT, 1987. *Comm. Journ. Hydrol., Thonon, oct. 87.*
- MATZNER E., KHANNA P.K., MEIWES K.J., LINDHEIM M., PRENZEL J. et ULRICH B., 1982. Elementflüsse in Waldökosystemen im Solling. *Datendokumentation, Göttinger Bodenkundliche Berichte 71:1-267.*
- MIELLET P., et SCHMITT V., 1988. Etude des formations superficielles dans trois bassins-versants granitiques du S-E du Mont-Lozère. *Mem. maîtrise Géog. phys., Univ. Paris I, 100p.*
- MILLER H.G., MILLER J.D., COOPER J.M., 1987. Transformation in rainwater chemistry on passing through forested ecosystems. In *Pollutant Transport and Fate in ecosystems. Brit. Ecol. Soc. n°6, pp. 171-180.*
- MULDER J., 1988. Impact of acid atmospheric deposition on soils. *Field monitoring and Al chemistry. Doctoral thesis, Agricultural Univ. of Wageningen, The Netherlands, 165p.*
- NOIRFALISE A., et VANESSE R., 1975. Conséquences de la monoculture des conifères pour la conservation des sols et pour le bilan hydrologique. *Association des espaces verts, Bruxelles, 42p.*
- PACES T., 1982. Natural and anthropogenic flux of major elements from Central Europe. *Ambio, vol. 11, 4, pp. 206-208.*
- PACES T., 1985. Sources of acidification in Central Europe basins. *Nature, vol. 315, pp. 31-36*
- PACES T., 1986. Weathering and mass balance in small drainage basins: environmental applications in the Bohemian Massif (Central Europe). *Sci. Géol. Bull. 39, 2, pp. 131-150.*
- PELLET J., 1972. Données lithologiques et structurales sur les terrains cristallins cévenols affectés par l'accident de Villefort. *Bull. du service de la carte géol. de la France, n°282, tome LXI, BRGM, 238p.*
- PRENZEL J., 1979. Mass flow to the root system and mineral uptake of a beech stand calculated from 3-field data. *Plant and soil, 51, pp. 39-49.*
- PREVOSTO B., 1988. Flux des éléments minéraux dans un écosystème forestier déperissant. *Mem. 3ème année ENITEF. 59p.*

- PRICE A.G., et WATTERS R.J., 1988. Seasonal fluxes of some ions through the overstory, underbrush, and organic soil horizons of an aspen-birch forest. *Water Res. Res.*, vol. 24, n°3, pp. 403-408.
- PROBST A., VIVILLE D., AMBROISE B., FRITZ B., 1989. Bilan hydrogéochimique d'un petit bassin-versant forestier des Vosges granitiques en Alsace: Le bassin amont du Strengbach à Aubure. Rapport d'activité 1988, DEFORPA, 16p.
- PROBST A., et DAMBRINE E., 1988. Fonctionnement et bilans hydrogéochimiques comparés des bassins versants d'Aubure et du Mont-Lozère. *Rap. DEFORPA*, 45p.
- RAPP M., et IBRAHIM M., 1978. Egouttement, écoulement et interception des précipitations par un peuplement de *Pinus pinea* L. *Oecol. plant.*, 13, (4), pp. 321-330.
- RAPP M., et ROMANE F., 1968. Egouttement des précipitations sous des peuplements de *Quercus ilex* L. et de *Pinus halepensis* Mill. *Oecol. plant.*, III, pp. 271-284.
- RAPP M., 1974. Le cycle biogéochimique d'un bois de pin d'Alep. in *Ecologie Forestière*, Pesson, Gauthier-Villars ed.
- RAPP, 1983. in "Disturbance and Ecosystem", Ed. by H.A. Mooney and M. GODRON, Springer Verlag ed.
- RODA, F., 1983. Biogeoquímica de les aigües de pluja i de drenatge en alguns ecosistemes forestals del Montseny. *Tesi doctoral*, Univ. autonoma de Barcelona, 400 p.
- SAS, 1987. *User's Manual*, 7th edition.
- SOUCHIER B., 1971. La pédogénèse sur roches cristallines à l'étage montagnard. *Thèse Fac. Sci. Paris*, 194p.
- SWANK, W.T. et DOUGLASS, J.E. 1977. Nutrients budgets for undisturbed and manipulated hardwood forest ecosystems in the mountains of North Carolina. *Watershed Research in Eastern North America Workshop*, Correll Ed. pp 343-364.
- TREVISAN D., 1983. Pédogénèse et typologie des sols de trois bassins-versants du Mont-Lozère. *DEA Univ. Nancy I*.
- UIFRO, 1989. Management of nutrition in forests under stress. *Symposium Freiburg*, Sept. 18-21, 1989.
- VALADAS B., 1987. Morphodynamiques récentes dans le Massif Central français: étude comparée des massifs granitiques du Limousin, de Margeride et du Mont-Lozère. *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl.-Bd. 65, pp. 85-99.
- VAN BREEMEN N., BURROUGH P.A., VELTHORST E.J., VAN DOBBEN H.F., DE WIT T., RIDDER, T.B., REIJNDERS H.F.R., 1982. Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. *Nature*, vol. 299, pp. 548-550.
- VAN BREEMEN N., MULDER J., DRISCOLL C.T., 1984. Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75, pp. 283-308.

- VAN MOORT J.C.,1966.Les roches cristallophylliennes des Cévennes et les roches plutoniques du Mont-Lozère. Annales de la faculté des sciences de l'Univ. de Clermont,n°31.
- VANNIER C.,1987.Bilans chimico-minéralogiques et hydrochimiques comparés des sols des bassins-versants du Mont-Lozère.Mem. DEA,Univ. d'Orléans,60p.
- VELBEL M.A.,1985.Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge.Am.journ. of Soil Sci.,vol.285,pp.904-930.
- VITOUSEK,1983.in "Disturbance and Ecosystem,Ed.by H.A. Mooney and M.GODRON,Springer Verlag ed.
- YUREVITCH ,BATCHELDER G.L.,1988.Hydrogeochemical cycling and chemical denudation in the Fort River watershed.Central Massachussetts.An appraisal of mass-balance studies. Water Res.Res.,vol.24,n°1,pp.105-114.