

REPRÉSENTATIVITÉ À L'ÉCHELLE D'UN BASSIN VERSANT DES MESURES CHIMIQUES PRISES DANS UN COLLECTEUR DE PLUIE : UN EXEMPLE DANS LE MASSIF DES MAURES

par Benoît FOURCADE ⁽¹⁾, Claude MARTIN ⁽²⁾ et Anne COUDRAIN-RIBSTEIN ⁽¹⁾

(1) : UMR 5569 "Hydrosociences", CNRS-IRD-UMII, Place Eugène Bataillon, CC MSE, 34095 MONTPELLIER Cedex 5. Mél. : Benoit.Fourcade@msem.univ-montp2.fr.

(2) : UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie de l'Université de Nice - Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3209, 06204 NICE Cedex 3.

RÉSUMÉ : La mesure, au moyen d'un collecteur de pluie, des entrées d'éléments minéraux sur un bassin versant, est analysée à travers des données recueillies pendant cinq ans dans le massif des Maures. Une approche de bilan de chlorure montre que des dépôts occultes de cet élément non captés par le collecteur représentent près de la moitié des entrées à l'échelle du bassin. L'étude des relations entre les concentrations et les durées séparant les prélèvements met en évidence la contribution des dépôts par temps sec à la signature chimique des eaux recueillies. Cependant cette contribution ne représente qu'une partie, variable suivant les éléments, des dépôts à l'échelle du bassin. La mesure des entrées chimiques apparaît biaisée. Elle doit être considérée avec prudence, et donc croisée avec d'autres sources d'informations, telles que des analyses chimiques de l'égouttement sous les arbres.

MOTS CLÉS : bassin versant, Méditerranée, aérosol, chlorure, bilan chimique, mesure, pluie.

ABSTRACT : Dissolved minerals inputs measurement on a catchment by an open rain-gauge is analyzed through a five-years monitoring in the Maures massif, in the South of France. Relationships found between sampling delays and concentrations, and chloride deficits, highlight the contribution of partially recovered occult depositions on water contents. Nevertheless, that contribution only represents part of the basin-scale deposits. The measurement of chemical inputs appears to be biased. It must be assessed with caution, and scrutinized in the light of other sources of information, such as throughfall chemical analysis.

KEY WORDS : catchment, Mediterranean, aerosol, chloride, chemical balance, measurement, rain.

I - INTRODUCTION

Les apports atmosphériques constituent une source majeure d'éléments chimiques pour les écosystèmes continentaux. Ils se déposent au sol sous forme dissoute ou particulaire avec la pluie, les poussières atmosphériques ou les gouttelettes de brouillard. Si les entrées dans les précipitations sont aisément mesurées au moyen de pluviomètres à ouverture automatique, le dépôt de particules par temps sec et l'interception du brouillard posent de réels problèmes météorologiques qui ont fait l'objet d'investigations spécifiques. Alors que les trajectoires des gouttes de pluie sont sub-verticales, celles des poussières et des gouttelettes de brouillard ont une importante composante horizontale. Cette particularité entraîne une différence de pouvoir de captation entre les collecteurs à ouverture horizontale généralement utilisés et la végétation, qui joue un rôle de filtre (E. ERICKSON, 1960).

L'analyse de la composition granulométrique et chimique des particules portées par l'air permet d'accéder à une estimation des flux entrants de chaque constituant (E.K. BERNER et R.A. BERNER, 1987). La mesure des entrées par le brouillard nécessite la mise en place d'un dispositif de captation (B. REYNOLDS *et al.*, 1997). L'ensemble des dépôts peut être estimé par la mesure de l'égouttement à travers les feuillages et des flux le long des troncs (G. LIKENS *et al.*, 1977 ; J. BELLOT *et al.*, 1999). Cependant une analyse complémentaire est nécessaire pour estimer le rôle des processus d'absorption et de désorption d'éléments chimiques au niveau de la végétation (G.M. LOVETT et S.E. LINDBERG, 1984). Enfin, pour les éléments au comportement conservatif avéré, on peut accéder au terme d'entrée totale par le biais de bilans de masse à l'échelle du bassin (N.E. PETERS, 1989). D'importantes incertitudes persistent quels que soient les investissements consacrés. À défaut de solutions pleinement satisfaisantes, les collec-

teurs de pluie ouverts sont encore souvent utilisés pour quantifier les entrées chimiques (P. DURAND *et al.*, 1992), qualifiant la solution alors mesurée de "précipitation globale" ("*bulk precipitation*").

Nous avons cherché à identifier, à travers l'analyse de données recueillies dans le massif des Maures (Fig. 1) pendant cinq cycles hydrologiques (septembre 1989 à août 1994), l'objet mesuré dans cette "précipitation globale". Il s'agit de tirer des mesures réalisées des enseignements sur les dépôts humides et secs, et leurs implications pour les entrées à l'échelle du bassin.

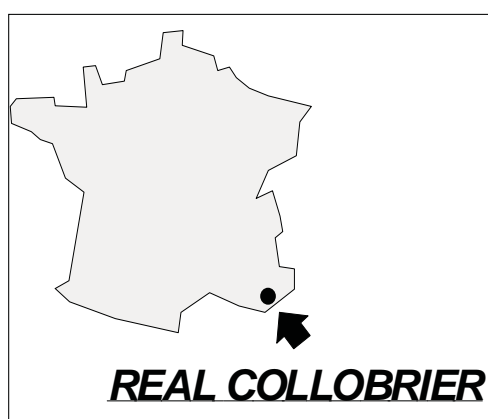


Figure 1 - Localisation du BVRE du Réal Collobrier.

II - TERRAIN D'ÉTUDE ET MÉTHODES

Cette étude a porté sur des données hydrologiques et chimiques recueillies sur le bassin versant du Rimbaud. D'une superficie de 1,46 km², ce bassin est situé dans une zone forestière, à une distance de 8 km de la mer Méditerranée. Le substratum est entièrement constitué de gneiss. La végétation, à l'origine formée d'un maquis complanté de pins et chênes lièges, ainsi que d'une châtaigneraie en fond de vallon, a été détruite à 85 % par un incendie de forêt en août 1990. Le bassin, qui fait partie du Bassin Versant de Recherche et Expérimental (BVRE) du Réal Collobrier, est suivi depuis 1966 par le Cemagref (Groupement d'Aix-en-Provence), qui y a installé une station de mesure des débits à l'exutoire et un pluviographe, situé à 554 mètres d'altitude. Dans ce secteur, les précipitations annuelles moyennes avoisinent 1 100 mm.

Les eaux de pluie reçues par le pluviographe s'écoulent dans un bidon en plastique placé dans une fosse couverte. Des échantillons ont été prélevés à intervalles de temps compris entre 7 jours et deux mois, généralement après les épisodes pluvieux d'importance. Des analyses des échantillons recueillis ont déterminé le pH et la conductivité, puis, après filtration (0,45 µm), les concentrations de SiO₂ (colorimétrie), Ca²⁺, Mg²⁺ (volumétrie et absorption atomique), K⁺ et Na⁺ (photométrie de flamme), HCO₃⁻ (volumétrie avec suivi potentiométrique), Cl⁻ (volumétrie et colorimétrie), NO₃⁻, SO₄²⁻ (colorimétrie). Les réflexions qui suivent portent sur la composition chimique des 54 prélèvements réalisés au pluviographe pendant la période 1989-1994. De nombreux travaux ayant été réalisés au voisinage du site d'étude nous ont permis de croiser les résultats obtenus avec d'autres sources d'informations : échantillonnages d'égouttements sous diverses essences végétales, mesures dans un collecteur à ouverture automatique déclenchée par la pluie.

III - COMPOSITION CHIMIQUE ET ORIGINES DES PLUIES

La composition des eaux recueillies est dominée en anions par le chlorure et le sulfate, en cations par le calcium et le sodium (Fig. 2). La minéralisation est comprise entre 3 et 45 mg/l, 81 % des échantillons se situant entre 5 et 25 mg/l. Les eaux recueillies sont généralement peu acides, avec un pH voisin de 5. Le pH est rarement inférieur à 4,5 ou supérieur à 6,5.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur les concentrations de Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, alcalinité carbonatée (Alk) et SiO₂. Elle montre que 90 % de la variance de l'échantillon centré réduit est expliqué avec trois composantes. La première composante, qui explique 50 % de la variance, rend compte des variations de charge ionique totale. La représentation sur le plan des deuxième et troisième composantes (respectivement 24 % et 16 % de la variance) est plus discriminante sur les variations de composition (Fig. 3). La moitié environ des prélèvements présente des caractères chimiques peu affirmés, alors que l'autre moitié se répartit entre trois types bien distincts de composition, liés à l'origine des masses d'air ayant engendré les dépôts sur le bassin et dont

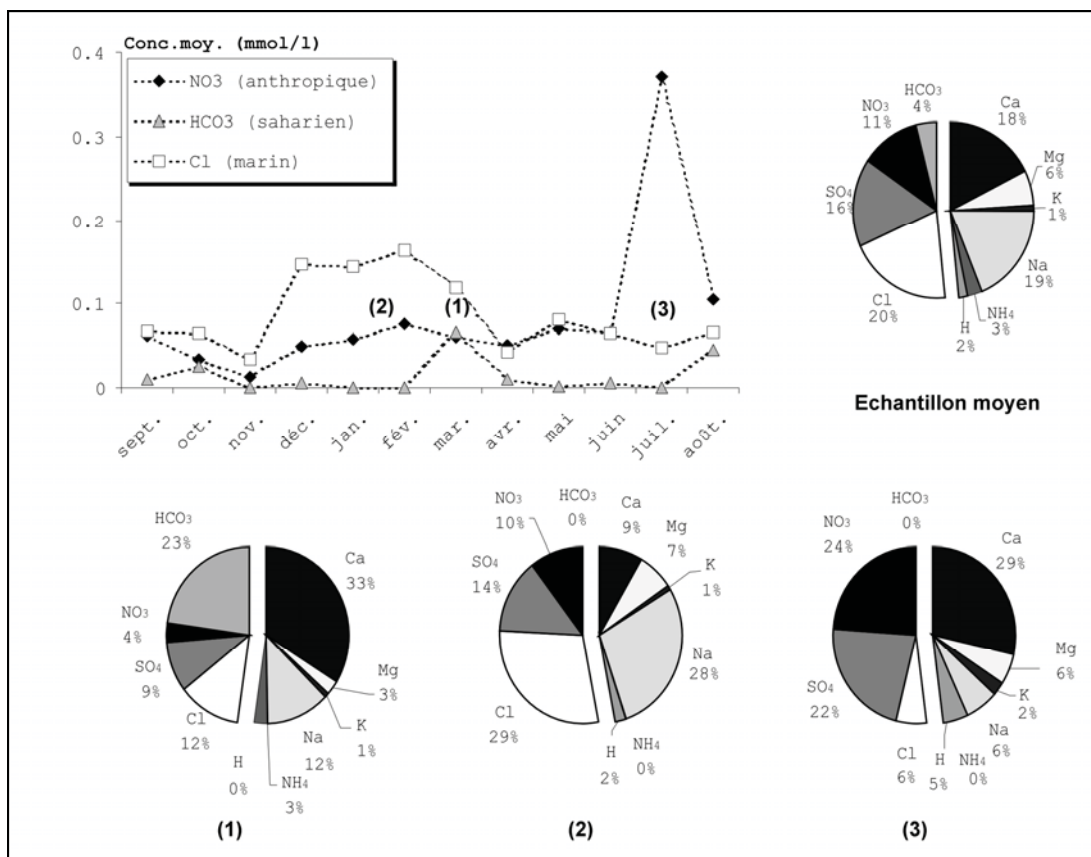


Figure 2 - Concentrations moyennes mensuelles de NO₃⁻, HCO₃⁻, Cl⁻ (1989-94) et composition chimique des eaux prélevées au pluviographe : échantillon moyen 1989-94 (moyennes pondérées par les hauteurs d'eau), Type 1 (saharien, du 5 au 18/3/91), Type 2 (marin, du 9/2 au 25/3/94) et Type 3 (anthropique, du 27/6 au 29/8/94).

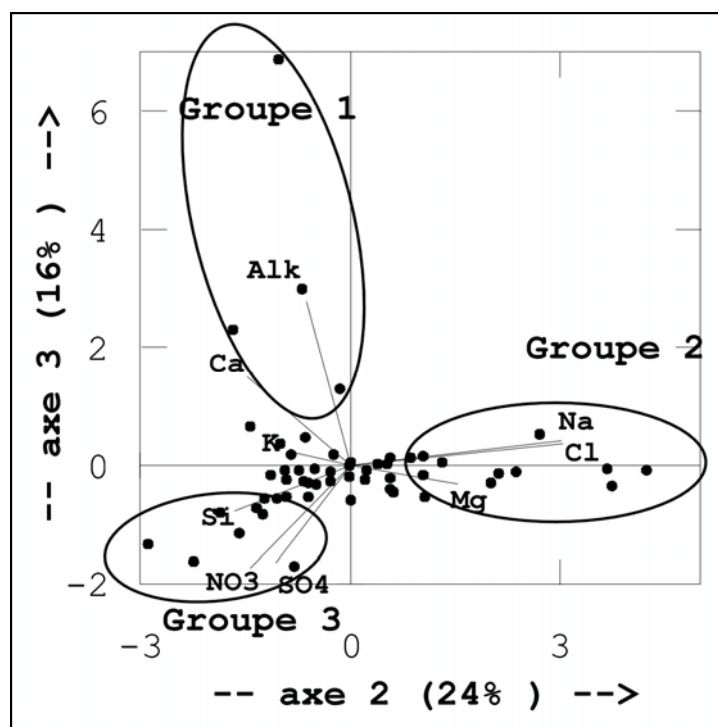


Figure 3 - ACP sur les concentrations mesurées dans les eaux du pluviographe.

l'occurrence revêt un certain caractère saisonnier (Fig. 2) :

- quelques prélèvements sont enrichis en HCO_3^- et Ca^{2+} du fait de la dissolution des poussières carbonatées transportées par-dessus la Méditerranée depuis le Sahara (M.D. LOÏE-PILOT *et al.*, 1986).
- quelques prélèvements d'hiver, riches en sels marins (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}), correspondent à des épisodes pluvieux alimentés par des masses d'air chargées en aérosols de la Méditerranée,
- des prélèvements de printemps et d'été présentent des enrichissements en SO_4^{2-} , NO_3^- , K^+ et Ca^{2+} qui ont été couramment identifiés (P. DURAND *et al.*, 1992) comme correspondant à la pollution atmosphérique des régions industrielles européennes.

Ces trois types de caractère chimique des eaux ont été décrits dans d'autres études portant sur la façade nord occidentale de la Méditerranée (P. DURAND *et al.*, 1992 ; A. ESCARRÉ *et al.*, 1999). Des suivis de trajectoires de masses d'air ("back trajectories") (M.D. LOÏE-PILOT, 1986) ont par ailleurs confirmé l'origine (saharienne, marine, anthropique) des enrichissements constatés.

IV - LE PROBLÈME POSÉ PAR LES BILANS DE CHLORURE

Lorsque le substratum d'un bassin versant ne renferme pas d'évaporites, le chlorure évacué par les cours d'eau provient uniquement des précipitations. Le flux moyen annuel de cet élément à l'exutoire est alors égal au flux moyen apporté au bassin par l'atmosphère. Le bassin du Rimbaud est constitué de roches exemptes de chlorure. Disposant à la fois des mesures d'entrées et de sorties, des bilans annuels ont été établis. Les entrées sont celles mesurées directement dans le collecteur. Les sorties nécessitent, quant à elles, l'intégration des flux mesurés :

$$\text{Sortie} = \int C(t).Q(t).dt$$

où C représente la concentration (mg/l) et Q le débit (l/s).

Les débits sont mesurés à un pas de temps très fin (chaque minute en crue). Un préleveur asservi au limnigraphe a permis d'effectuer 295 mesures de concentration de chlorure entre 1989 à 1994. L'interpolation nécessaire au calcul des

sorties annuelles a été effectuée en prenant en compte les relations étroites liant les concentrations aux débits (C. MARTIN, 1987).

Les bilans ainsi établis, qui devraient être équilibrés aux variations de stocks près, sont largement déficitaires (Fig. 4).

La qualité des mesures (M.D. LOÏE-PILOT, 1984) ne peut être remise en question pour de telles disparités. Sur le bassin du Rimbaud, en supposant des erreurs systématiques de 15 % sur les débits, de 10 % sur les concentrations, de 10 % sur la méthode d'interpolation des concentrations (erreurs représentées sur la figure 4), les bilans restent encore déficitaires.

L'hypothèse de déstockages de chlorure du bassin ne peut être évoquée pour les quantités impliquées. En effet, le chlorure étant un élément très mobile, la concentration aux plus faibles débits constitue une image de la concentration moyenne dans les aquifères du bassin. Nous observons bien une diminution progressive, de 1990 à 1994, de cette concentration (de 16,5 à 13 mg/l), preuve d'une variation du stock de chlorure. La réserve d'eau capable, par une telle baisse de sa concentration, d'expliquer le déficit observé sur cette même période (16,5 t/km²) serait de 4800 mm, valeur irréaliste au vu des conditions lithologiques (gneiss massif) et pédologiques (sols squelettiques). Les variations de stock ne sauraient expliquer plus de 5 % de l'anomalie de bilan.

La cause principale des déséquilibres de bilan ne peut donc être que la prise en compte partielle des apports secs, non contenus dans la pluie. Cette hypothèse, argumentée sur d'autres bassins (C.A.J. APPELO et D. POSTMA, 1993 ; N.E. PETERS, 1989 ; A. PROBST *et al.*, 1992), est confirmée dans le massif des Maures par deux autres faits :

- des expériences de captation de l'égouttement des feuillages (C. MARTIN *et al.*, 1996 ; A. PICHON *et al.*, 1996) ont révélé un enrichissement en chlorure des eaux au passage de la canopée, d'un facteur 1 à 3 suivant les espèces végétales ;
- de septembre 1978 à août 1980, le collecteur d'eaux de pluie du Rimbaud a été incliné vers la Méditerranée, pouvant ainsi capter une plus grande quantité d'aérosols marins (C. MARTIN, 1986). Les entrées mesurées au cours de ces deux cycles sont les plus importantes de toute la période de mesure, et le bilan "entrées

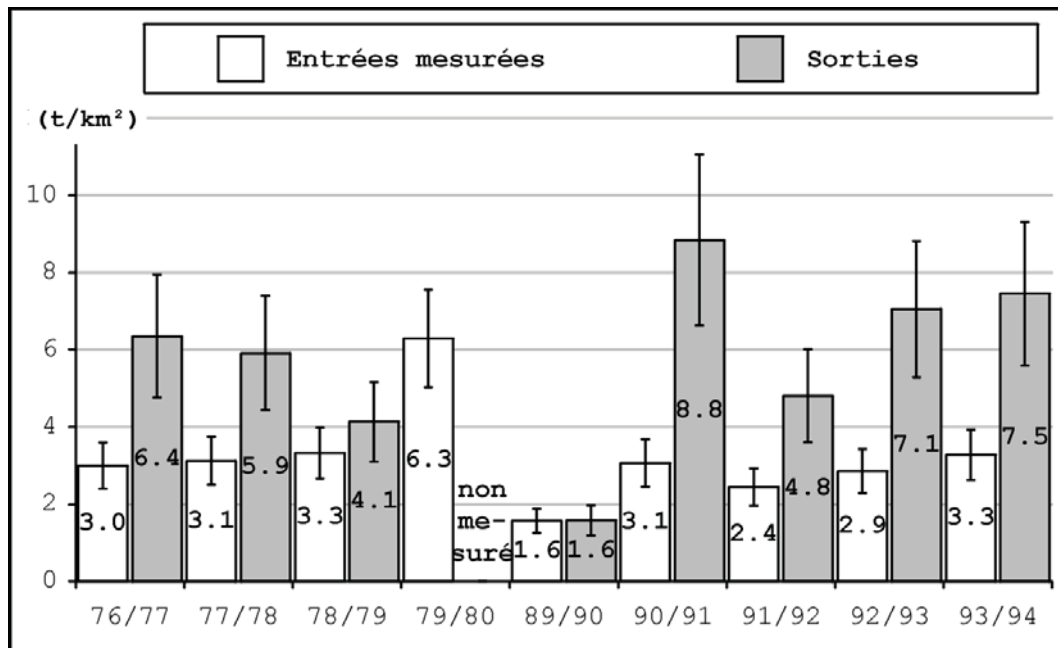


Figure 4 - Entrées et sorties annuelles de chlorure sur les périodes 1976-80 (C. MARTIN, 1986) et 1989-94.

mesurées - sorties" de 1978-79 s'en trouve équilibré (Fig. 4).

De toute évidence, l'excès des exportations de chlorure par rapport aux entrées s'explique par un apport atmosphérique occulte, mal capté par les collecteurs à ouverture horizontale.

V - RELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS ET LES DURÉES DE COLLECTE

En dépit de leurs insuffisances, les collecteurs à ouverture horizontale interceptent une partie des dépôts secs, qui sont ensuite lessivés lors des pluies. La concentration des pluies est ainsi modifiée au niveau du collecteur par (a) la lixiviation des sels solubles déposés dans le cône de l'appareil, (b) les échanges biogéochimiques à l'intérieur du bidon (dissolution, production / consommation par la biomasse, échanges gazeux). Afin d'étudier l'influence de ces deux processus sur la concentration des eaux recueillies, des temps caractéristiques ont été affectés à chaque échantillon d'eau :

- D_{acc} , temps compris entre la dernière pluie avant le début du prélèvement et la dernière pluie avant la fin du prélèvement, est lié à la masse de dépôts secs ayant pu être lessivés,

- D_{grav} , temps de séjour moyen de l'eau dans le collecteur, caractérise les échanges ayant lieu à l'intérieur du bidon.

Nous avons étudié les relations de ces temps caractéristiques, ainsi que de la hauteur d'eau H , avec les différentes concentrations mesurées.

Des régressions pas à pas ont systématiquement rejeté la durée D_{grav} , dépourvue de signification au seuil de confiance de 90 %. Les échanges à l'intérieur du bidon ne sont donc pas décelables avec l'échantillonnage dont nous disposons. Les deux variables restantes, D_{acc} et H , expliquent une part significative de la variance. Assurés de leur pertinence, nous les avons intégrées dans un modèle conceptuel simple permettant d'étudier l'importance des dépôts secs pour chaque élément chimique. Ce modèle repose sur trois hypothèses :

- la concentration dans les pluies C_p est constante,
- des aérosols se déposent dans le cône du collecteur avec un flux φ constant,
- la dissolution des aérosols après lessivage par les pluies est instantanée.

Avec ces hypothèses, la concentration d'un élément chimique (C_i) est donnée par :

$$C_i = C_{pi} + \varphi_i \cdot (D_{acc}/H)_i .$$

C_p et φ , paramètres du modèle, varient d'un élément à l'autre, alors que $Dacc/H$ reste identique. C_p et φ sont estimés pour chaque élément par régression linéaire de $Dacc/H$ sur les concentrations mesurées. Les résultats montrent que le dépôt sec constant influe sur toutes les concentrations ($\varphi > 0$), mais à des niveaux de signification variables (Tab. I et Fig. 5).

L'analyse des valeurs des deux paramètres et de leur niveau de signification permet de caractériser des comportements différents de chacun des éléments chimiques :

- Les éléments d'origine marine, Na^+ et Cl^- , présentent une tendance dépourvue de

signification au seuil de confiance de 90 % ($\varphi \approx 0$). Leur présence dans le flux d'aérosols constant n'est donc pas attestée statistiquement.

- La silice apparaît au contraire liée uniquement aux dépôts secs ($C_p \approx 0$).

- Les éléments d'origine terrestre, anthropique et biologique, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , sont liés à $Dacc/H$ par des relations significatives au seuil de confiance de 99 %. Toutefois les moins bonnes relations sont obtenues pour Mg^{2+} , dont l'origine marine explique environ la moitié des apports, et pour Ca^{2+} , soumis, du fait des apports sahariens, à de trop fortes variations pour que la corrélation soit bonne.

Tableau I - Paramètres du modèle $C = C_p + \varphi(Dacc/H)$ et part estimée du dépôt sec.

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SiO_2
C_p ($\mu mol/l$)	30,9 *	12,5 *	3,2 *	76,7 *	82,5 *	29,9 *	34,0 *	- 0,6 \square
φ ($\mu mol/m^2/j$)	17,7 *	5,6 *	3,3 *	3,5 *	3,3 *	17,0 *	46,3 *	8,5 *
Part du dépôt sec constant (%)	19,3	13,3	28,1	4,8	3,9	17,8	34,2	100,0
Intervalle de confiance à 95 %	5-30	7-24	20-38	<12	<12	11-25	26-44	>81

* : significativement différent de 0 au seuil de confiance de 99 %. \square : non significativement différent de 0 au seuil de confiance de 90 %.

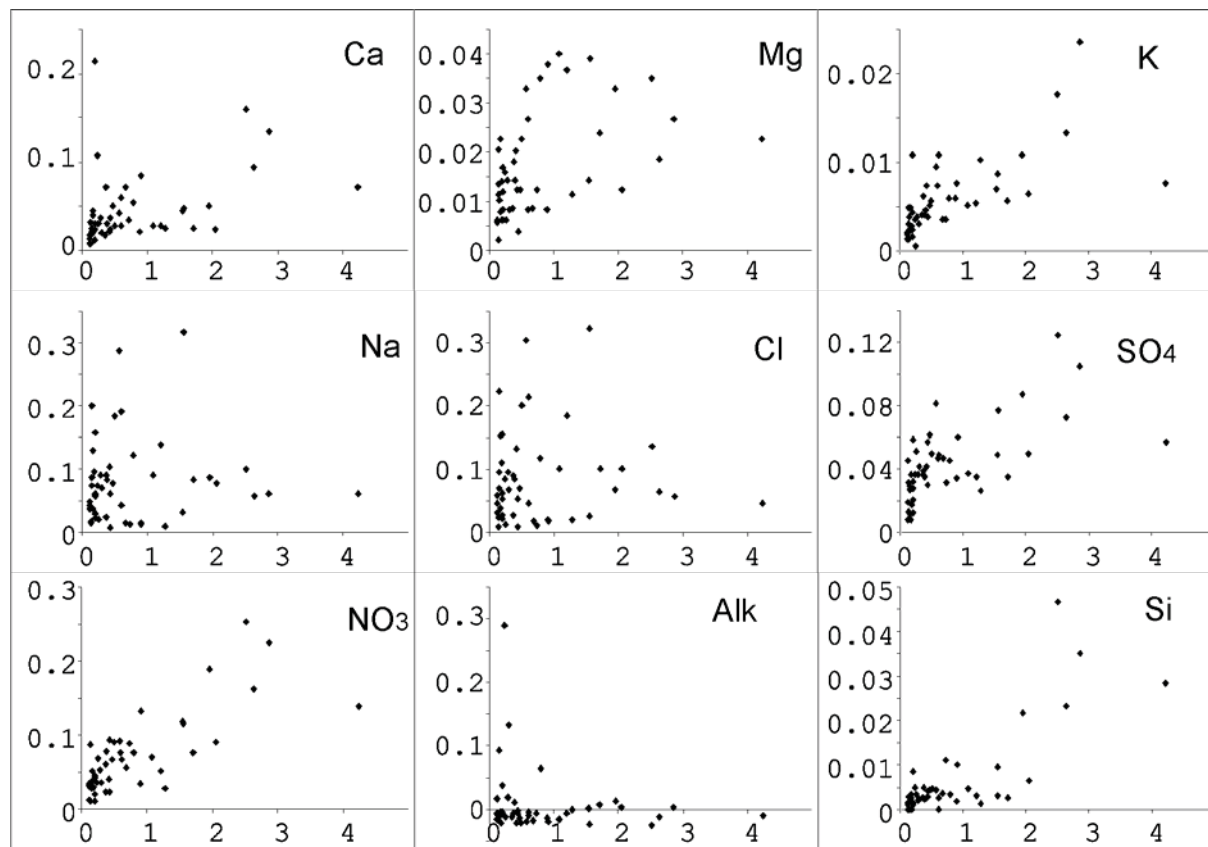


Figure 5 - Concentrations mesurées en fonction de $Dacc/H$.

Les dépôts constants liés au temps sec fournissent suivant les éléments une contribution plus ou moins importante aux concentrations mesurées dans le collecteur, dont la silice et les éléments marins occupent les positions extrêmes.

Pour les éléments marins le bilan de chlorure à l'échelle du bassin a montré l'importance des apports occultes. La faible part de concentration expliquée par le modèle à flux constant permet de supposer que ces apports sont concomitants aux épisodes pluvieux. Deux arguments confortent cette hypothèse. D'une part, le vent d'est, apportant souvent la pluie, est chargé d'aérosols marins, comme l'a montré l'expérience d'inclinaison du collecteur entre 1978 et 1980. D'autre part, un collecteur continuellement ouvert et un appareil à ouverture automatique déclenchée dès les premières gouttes de pluie, tous deux postés sur le bassin versant voisin du Boussicaut, ont enregistré des entrées similaires pour chacun des deux éléments marins. Ainsi, les apports d'éléments marins sont uniquement liés aux épisodes humides, avec ou sans pluie. Les entrées occultes, non captées au collecteur, seraient dues à la captation des gouttelettes de nuages, phénomène dont l'importance a été démontrée en d'autres sites (B. REYNOLDS *et al.*, 1997). Sur le bassin versant du Rimbaud, ces entrées représentent, en moyenne interannuelle, environ la moitié des entrées totales.

En ce qui concerne les éléments non marins, le modèle nous donne une estimation des flux de dépôt sec au collecteur, qui peut être comparée aux résultats d'une campagne d'échantillonnages simultanés dans un appareil ouvert et dans un appareil à ouverture automatique déclenchée par la pluie (C. MARTIN *et al.*, 1996). Les résultats du modèle concordent pour certains éléments (écart entre le collecteur continuellement ouvert et celui à ouverture automatique : + 8 % pour Ca^{2+} ; + 3,6 % pour Mg^{2+} ; + 37,8 % pour NO_3^-), alors que d'autres posent problème (- 20,6 % pour SO_4^{2-} ; 0 % pour K^+). Le cas particulier du sulfate, plus représenté dans le collecteur à ouverture automatique que dans le collecteur ouvert, appelle à se poser la question des conditions aérodynamiques locales, pouvant favoriser un dépôt sélectif des éléments suivant les conditions de vent.

Les dépôts d'éléments non marins au collecteur constituent cependant une image biaisée des dépôts à l'échelle du bassin. Une campagne d'échantillonnage de l'égouttement sous les arbres, réalisée de mars à novembre 1993

(A. PICHON *et al.*, 1996), montre que ces derniers sont vraisemblablement sous-estimés par les mesures au collecteur, dans des proportions toutefois sensiblement inférieures à celles trouvées pour les éléments marins. Une fois retirée la part due à l'excrétion de ces éléments, biologiquement actifs, par les feuillages (J. BELLOT *et al.*, 1999 ; A. PROBST *et al.*, 1992), nous pouvons estimer les coefficients qui, appliqués à la correction relative à effectuer sur le chlorure, fournissent les corrections relatives pour d'autres éléments. Les coefficients trouvés sont les suivants : 0,60 ($\pm 0,20$) pour Ca^{2+} ; 0,70 ($\pm 0,20$) pour Mg^{2+} ; 0,40 ($\pm 0,20$) pour SO_4^{2-} . Le rôle important joué par la végétation au niveau des transferts de potassium et de nitrate ne nous permet pas d'évaluer l'enrichissement correspondant à ces deux éléments. En effet, la quasi-totalité du potassium sous les arbres est fourni par excrétion, et une partie du nitrate est absorbée par les feuilles. L'étude de l'origine des éléments nous conduit à penser que, pour ces deux éléments, les enrichissements relatifs doivent être du même ordre de grandeur que pour le sulfate.

Afin de compléter notre information, nous avons cherché à savoir quelle était la part de la production végétale de l'environnement direct du collecteur dans les dépôts secs. L'incendie d'août 1990 offrait, à ce titre, l'occasion de comparer les données d'un poste aux abords incendiés, avec celles recueillies dans des secteurs restés intacts. La destruction de la végétation par l'incendie a provoqué, d'une part, la constitution d'une couche de cendres soumise durant quelques mois à l'érosion éolienne et, d'autre part, l'arrêt des flux locaux de poussières végétales diverses et de pollens. La comparaison entre postes a porté sur les concentrations de Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , caractéristiques de la production végétale. Cette analyse a permis de montrer l'absence de différences significatives liées au rôle de la végétation. Celle-ci est plus déterminante sur le plan physique, en zone forestière, par la position d'abri qu'elle confère aux collecteurs de pluie par rapport aux vents dominants (C. MARTIN *et al.*, 1996).

VI - CONCLUSIONS : CONSÉQUENCES SUR L'ESTIMATION DES FLUX D'ENTRÉE

La "précipitation globale" recueillie dans des collecteurs ouverts est couramment utilisée pour

quantifier les apports chimiques atmosphériques au sol. Cette étude contribue à préciser les biais liés à cet échantillonnage. S'il peut être admis que l'ensemble des entrées "humides" apportées par les événements pluvieux sont bien captées, seule une partie des entrées "sèches" sont déposées dans le collecteur. De plus, la part recueillie de ces entrées varie fortement d'un élément chimique à l'autre.

L'interprétation des données chimiques, menée en tenant compte de l'échelonnement des prélèvements et des épisodes pluvieux, montre que les éléments d'origine continentale sont apportés au collecteur pour une part comprise entre 13 % (Mg^{2+}) et 100 % (SiO_2) sous forme de poussières et d'aérosols en période de temps sec. La part de ces entrées mesurées au collecteur qu'il faut attribuer à des recyclages locaux, internes au bassin versant, ne peut être précisée.

Une approche de bilan du chlorure sur le bassin versant a permis de montrer que les entrées de sels marins s'effectuent pour moitié environ sous forme sèche ($\cong 3 \text{ t/km}^2/\text{an}$ de Cl^- en moyenne). Ces apports secs, qui ne sont pas mesurés au collecteur, se produisent essentiellement pendant les épisodes hivernaux humides.

Pour les autres éléments, la détermination des entrées occultes, non recueillies par le collecteur, est impossible à partir de l'examen des bilans "entrées - sorties". C'est le cas pour les éléments dont une partie des gains ou des pertes se produisent par échanges gazeux (HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), mais c'est également le cas pour ceux dont les exportations sont en partie alimentées par l'altération des roches (silice, cations basiques) ou pour lesquels les stocks du bassin versant peuvent varier en relation avec l'évolution du couvert végétal (modification de la minéralomasse) et/ou des caractères chimiques des sols. L'utilisation de données chimiques obtenues par échantillonnage de l'égouttement sous les arbres fournit à ce titre une information complémentaire mais peu exploitable en termes quantitatifs. Les différences entre les entrées mesurées et les entrées réelles de ces éléments paraissent, sur le site d'étude, sensiblement inférieures à celles des éléments marins.

En définitive, les entrées mesurées à des collecteurs d'eaux de pluie ouverts à surface réceptrice horizontale donnent des indications incomplètes sur les entrées réelles. Le croisement avec d'autres sources d'information est nécessaire pour juger de la pertinence des entrées mesurées.

Remerciements : Les données sur les précipitations et les débits nous ont été communiquées par Jacques LAVABRE (du Groupement d'Aix-en-Provence du Cemagref), qui assume la responsabilité du BVRE du Réal Collobrier. Nous sommes en outre reconnaissants à Hubert GIMENEZ (Laboratoire de Pétrologie de l'Université de Nice) et à Jacques QUILLARD (Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen) d'avoir participé, aux côtés de Claude MARTIN, à la réalisation des analyses.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- APPELO C.A.J. et POSTMA D. (1993) - *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. BALKEMA édit., 536 p.
- BELLOT J., AVILA A. et RODRIGO A. (1999) - Throughfall and stemflow. In : *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*, F. RODÀ, J. RETANA, C.A. GRACIA et J. BELLOT édit., Springer-Verlag, p. 209-222.
- BERNER E.K. et BERNER R.A. (1987) - *The global water cycle*. Édit. Prentice-Hall, 397 p.
- DURAND P., NEAL C. et LELONG F. (1992) - Anthropogenic and natural contributions to the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes National Park (Mont-Lozère, southern France). *J. Hydrol.*, vol. 130, p. 71-85.
- ERICKSON E. (1960) - The yearly circulation of chloride and sulphur in nature; meteorological, geochemical and pedological implications. Part II. *Tellus*, vol. 12, n° 1, p. 63-109.
- ESCARRÉ A., CARRATALA A., AVILA A., BELLOT J., PIÑOL J. et MILLAN M. (1999) - Precipitation Chemistry and Air Pollution. In : *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*, F. RODÀ, J. RETANA, C.A. GRACIA et J. BELLOT édit., Springer-Verlag, p. 195-208.
- LIKENS G.E., BORMANN F.H., PIERCE R.S., EATON J.S., et JOHNSON N.M. (1977) - Biogeochemistry of a forest ecosystem. Springer-Verlag, 146 p.
- 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. Appl. Ecol.*, vol. 2, p. 1013-1027.
- LOÏE-PILOT M.D. (1984) - Problèmes soulevés lors de l'établissement du bilan d'érosion

- chimique du bassin versant de la Solenzara (Corse). *Physio-Géo*, vol. 9, p. 153-164.
- LOÏE-PILOT M.D., MARTIN J.M. et MORELLI J. (1986) - Influence of saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, vol. 321, p. 427-428.
- MARTIN C. (1986) - *Contribution à l'étude de la dynamique des versants en roches métamorphiques ; l'exemple du massif des Maures*. Thèse de Doctorat d'État, Univ. Paris I (Panthéon-Sorbonne), 935 p.
- MARTIN C. (1987) - Les mesures de l'érosion chimique dans les bassins versants de roches cristallines : comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes d'investigation dans le massif des Maures (Var - France). *Zeit. Geomorph.*, vol. 31, n° 1, p. 73-87.
- MARTIN C., CHEVALIER Y., GIMENEZ H., MARTIN P. et QUILLARD J. (1996) - Apports d'éléments minéraux atmosphériques et pluviolessivats dans la partie occidentale du massif des Maures. *Ét. Géogr. Phys.*, vol. XXV, p. 3-23.
- PETERS N.E. (1989) - Atmospheric deposition of sulfur to a granite outcrop in the piedmont of Georgia, USA. In : *Atmospheric deposition*, IAHS Publ., n° 179, J.W. DELLEUR édit., p. 173-181.
- PICHON A., TRAVI Y. et MARC V. (1996) - Chemical and isotopic variations in throughfall in a Mediterranean context. *Geophys. Res. Let.*, vol. 23, n° 5, p. 531-534.
- PROBST A., VIVILLE D., FRITZ B., AMBROISE B. et DAMBRINE É. (1992) - Hydrochemical budgets of a small forested granitic catchment to acid deposition : the Strengbach catchment case study (Vosges massif, France). *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 62, p. 337-347.
- REYNOLDS B., FOWLER D., SMITH R.I. et HALL J.R. (1997) - Atmospheric inputs and catchment solute fluxes for major ions in five Welsh upland catchments. *J. Hydrol.*, vol. 194, p. 305-329.