

Mesures de l'érosion chimique dans le massif des Maures: l'exemple du bassin versant du Rimbaud (Var, France)

C. MARTIN

CNRS, LA 141, 191 rue Saint-Jacques, F-75005,
Paris, France

RESUME Les observations concernent un petit bassin versant gneissique, au relief accusé et aux sols squelettiques, situé sous un climat méditerranéen humide ($P = 1222$ mm, $T = 12.2^{\circ}\text{C}$). Diverses corrélations, entre les mesures hydrochimiques et hydrologiques, permettent d'établir le bilan hydrogéochimique annuel moyen. Au total, les pertes en solution représentent 7.9 t d'oxydes $\text{km}^{-2}\text{an}^{-1}$. Mais l'échelle de lixiviation des éléments témoigne à la fois de la présence occulte de roches carbonatées et de la fixation de K^+ dans la biomasse pérenne. En fait, l'érosion des gneiss représente 7.6 t d'oxydes $\text{km}^{-2}\text{an}^{-1}$. L'évolution géochimique actuelle apparaît nettement bisiallitique. Mais les données recueillies traduisent aussi l'intervention passée d'une altération monosiallitique. Les pertes de Na^+ indiquent une vitesse de transformation des roches en sols de 96 mm kan^{-1} et, plus globalement, une vitesse de descente de l'altération de 26 mm kan^{-1} .

Chemical erosion measurements in the massif des Maures: the example of the Rimbaud drainage basin (Var, France)

ABSTRACT The observations are about a small hummocky gneissic drainage basin, with skeletal soils, in a rainy mediterranean climate ($P = 1222$ mm, $T = 12.2^{\circ}\text{C}$). Various correlations between hydrochemical and hydrological data allow the mean annual hydrogeochemical balance to be calculated. The total losses of dissolved solids are 7.9 t of oxides $\text{km}^{-2}\text{year}^{-1}$, but the leaching sequence of elements shows that the basin contains hidden carbonate rocks, and that K^+ occurs in the perennial biomass. Indeed, the gneiss erosion represents 7.6 t of oxides $\text{km}^{-2}\text{year}^{-1}$. The current geochemical evolution appears to be very bisiallitic, but the collected data provide evidence of a past monosiallitic weathering environment. The losses of Na^+ indicate, for the gneiss, a rate of transformation in soils of 96 mm kyear^{-1} and, more generally, a rate of weathering lowering of 26 mm kyear^{-1} .

LE CADRE EXPERIMENTAL

Le bassin versant du Rimbaud (1.46 km^2) est situé au coeur du massif des Maures, un petit massif de roches cristallines bordé par la mer

Méditerranée. Il est constitué de gneiss et présente un relief assez accusé. Les versants y ont une pente moyenne de 9°, avec des altitudes comprises entre 470 et 622 m.

Les sols, peu épais, légèrement acides, très sableux et caillouteux, aux matériaux remaniés, appartiennent à la classe des rankers. Ils recouvrent des roches altérées cohérentes au pendage très redressé, mais on trouve aussi parfois des arènes sableuses conservées sous forme de poches. L'épaisseur moyenne des formations superficielles avoisine 34 cm. Leur fraction $<2 \mu\text{m}$ renferme des kaolinites, des illites-micas et des vermiculites plus ou moins hydroxyalumineuses. Le Tableau 1 indique la composition chimique moyenne des matériaux altérés, comparée à celle des roches mères selon la méthode isoquartz. L'enrichissement des sols en fer et en alumine résulte vraisemblablement des cycles biogéochimiques. Il démontre que les formations superficielles n'ont pas subi un lessivage efficace ni un entraînement sélectif d'éléments minéraux par les eaux de ruissellement. Les sols portent un maquis complanté de chênes-liège et de jeunes pins maritimes, où domine la bruyère arborescente.

TABLEAU 1 Composition chimique moyenne des matériaux minéraux, en g pour 100 g de roches saines, après soustraction de l'eau d'imbibition et des cations échangeables

Matériaux	SiO ₂ c.	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
rk	31.05	16.06	4.84	0.49	1.04	3.40	1.90
Ra	30.44	15.46	4.56	0.42	1.09	3.97	1.69
Ma	33.23	15.56	4.59	0.74	1.16	4.01	2.25
Rs	35.05	15.60	4.60	0.99	1.19	4.06	2.60

rk: rankers; Ra: roches très altérées, sous des arènes; Ma: ensemble des matériaux altérés; Rs: roches saines (quartz = 33.7%); SiO₂ c.: silice combinée.

Le climat est de type méditerranéen humide. Au coeur du massif, à Collobrières, les précipitations annuelles moyennes atteignent 1067.5 mm, sur la période septembre 1925-août 1979, et la température moyenne 13.8°C. Les températures moyennes oscillent de 6.6°C en janvier à 22.3°C en juillet. Les pluies, amenées par des vents d'origine marine, se produisent surtout d'octobre à mars. L'été, quant à lui, recoit à peine 8% des précipitations annuelles. Toutefois les hauteurs d'eau précipitées et le régime pluviométrique varient énormément d'une année à l'autre. Enfin, l'on enregistre presque chaque année au moins une pluie journalière supérieure à 80 mm.

Le ruisseau du Rimbaud réagit violemment aux précipitations, à cause de la massivité des roches, de la minceur des sols et des caractères morphométriques du bassin versant (Kc de Gravelius = 1.07; Dd = 4.86 km km⁻²; Rc de Strahler = 2.81). En outre, il interrompt

son écoulement pendant une partie de l'été. Le Tableau 2 rassemble les paramètres du bilan hydrologique calculés, sur une période de 53 ans, grâce aux bonnes corrélations linéaires trouvées entre les données recueillies à Collobrières et dans le bassin versant, après son équipement en août 1967.

TABLEAU 2 Données climatiques et hydrologiques annuelles moyennes

P (mm)	T ($^{\circ}C$)	D (mm)	$P-D$ (mm)	D/P
1221.8	12.2	647.0	574.8	0.53

D : drainage.

L'ETABLISSEMENT DES BILANS HYDROGEOCHIMIQUES

Les mesures portent sur les entrées d'éléments minéraux atmosphériques de septembre 1976 à août 1980 et sur les exportations en solution de septembre 1976 à août 1979.

Les mesures hydrochimiques

Les entrées Un collecteur recueille à la fois les poussières sèches, les aérosols et les eaux de pluie, ce qui permet de quantifier les apports d'éléments minéraux en procédant pluie par pluie (Tableau 3).

TABLEAU 3 Apports d'éléments minéraux mesurés dans le collecteur (septembre 1976-août 1980)

Mesures	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-
a ($t\ km^{-2}an^{-1}$)	0.00	1.67	0.37	0.18	2.02	4.57
t ($mg\ l^{-1}$)		1.30	0.29	0.14	1.57	3.55
(t) ($mg\ l^{-1}$)		0.07	0.26	0.07	1.96	3.55

a : apports; t : teneurs moyennes des eaux recueillies;
 (t) : teneurs, calculées à partir de la teneur en ions Cl^- , reflétant la composition chimique de l'eau de mer.

Les ions Cl^- , Na^+ et Mg^{2+} ont surtout une origine marine. Du reste, le sodium et le magnésium témoignent, chaque année, une relation très étroite avec les ions Cl^- : les droites de régression fournissent une estimation des teneurs moyennes avec un écart relatif très faible, allant de -1.7 à +3.5% pour Na^+ et de -8.7 à +6.7% pour Mg^{2+} . En outre, à l'échelle du massif, les rapports Na^+/Cl^- et Mg^{2+}/Cl^- varient, d'un endroit à l'autre, dans le même sens que la

teneur en ions Cl^- . Le calcium a, lui, une origine continentale. Les eaux recueillies sur l'ensemble de la région présentent, pour chaque pluie, des teneurs en cet élément très voisines. Le calcium est donc apporté par les eaux de pluie sous forme ionique. Enfin, le potassium manifeste une double origine, marine et continentale. Certes, les eaux recueillies sont parfois polluées par des débris végétaux, dont on sait qu'ils libèrent très vite leur potassium. Mais, à l'échelle du massif, les teneurs en ions K^+ varient partout dans des proportions quasi identiques d'une pluie à l'autre. La part du recyclage local dans les entrées de cet élément est donc négligeable. Il faut également souligner qu'au début de l'année 1978-1979, les teneurs en ions K^+ et SO_4^{2-} atteignent des valeurs particulièrement élevées, respectivement 1.9 et 8.4 mg l^{-1} . Il s'agit là d'un événement exceptionnel dont la cause nous échappe encore.

Par ailleurs, pour deux cases lysimétriques voisines, nous obtenons les résultats indiqués dans le Tableau 4. Il apparaît ici que la végétation est un piège à poussières sèches et à aérosols bien meilleur que les collecteurs, conformément aux observations d'Erickson (1960) et de Claridge (1970).

TABLEAU 4 Lixiviation des ions Cl^- en terrain défriché et sous couvert végétal (septembre 1977-août 1979)

Cases	Lixiviation ($\text{t km}^{-2}\text{an}^{-1}$)	P (mm an^{-1})
Nue	4.0	P incidentes = 1056
Couverte	5.1	P au sol = 885

Les sorties La composition chimique des eaux du Rimbaud varie beaucoup en fonction des conditions hydrologiques (Tableau 5). Dans cette situation, la quantification des sorties est souvent délicate (cf. Walling, 1978; Martin, 1981). Mais on peut exploiter les bonnes corrélations, généralement bi-logarithmiques, que l'on trouve entre les teneurs et les débits dans le cas de petits bassins versants relativement homogènes (cf. Walling, 1971; Mathieu, 1972). Pour chaque phase de récession, une série d'équations permet de déterminer les teneurs à partir du débit. Les exportations sont calculées suivant un pas de temps variable, en considérant tous les points de l'hydrogramme utilisés pour la détermination de

TABLEAU 5 Variations de la composition chimique des eaux

Date	Débit (l s^{-1})	Eléments minéraux (mg l^{-1}):							
		SiO_2	Ca	Mg	K	Na	Cl	HCO_3	SO_4
26/10/76	3089	3.0	2.6	1.0	0.81	3.3	4.2	7.6	5.1
05/08/77	0.05	10.9	3.9	1.4	0.76	7.7	8.3	15.8	9.5

l'écoulement (cf. Martin, 1981). Les valeurs obtenues seront présentées dans le prochain paragraphe. Notons cependant que sur la période 1976-1979, les exportations moyennes d'ions Cl^- atteignent $5.46 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$, alors que les entrées mesurées près du collecteur, en terrain défriché, s'élèvent à $4.31 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Or le bassin versant a reçu des précipitations particulièrement abondantes (1445 mm an^{-1} , contre 1266) et son couvert végétal constitue un piège à éléments minéraux atmosphériques très efficace. Tous les ions Cl^- exportés proviennent donc bien des apports.

D'autre part, nous découpons les graphes des débits et des exportations en solution instantanés en tranches horizontales, afin de déterminer la composition chimique moyenne des eaux directement fournies aux ruisseaux par différents ensembles de couches aquifères. Les débits limites retenus pour cette opération correspondent aux points d'inflexion des courbes de récession représentées en coordonnées semi-logarithmiques (cf. Roche, 1963). Les caractères morphométriques et lithologiques du bassin versant garantissent l'intérêt d'une comparaison entre les résultats présentés dans le Tableau 6 (cf. Walling & Webb, 1980).

TABLEAU 6 Composition chimique moyenne des eaux issues des ensembles de couches aquifères extrêmes (septembre 1976-août 1978)

Eaux fournies	Eléments minéraux (<i>i</i> , en mg l^{-1}):							HCO_3^-	SO_4^{2-}
	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl^-			
par A	3.31	2.93	0.94	0.77	3.53	4.08	7.98	5.43	
<i>i</i> / Cl^-	0.81	0.72	0.23	0.19	0.81	1.00	1.93	1.33	
par B	9.28	3.49	1.25	0.46	6.19	7.17	11.98	9.18	
<i>i</i> / Cl^-	1.29	0.49	0.17	0.06	0.86	1.00	1.67	1.28	

A: ensemble de couches aquifères vide pour un débit du Rimbaud de 1120 l s^{-1} ; B: ensemble de couches aquifères saturé pour un débit de 20.5 l s^{-1} .

L'évolution de la teneur en ions Cl^- des eaux souterraines traduit les effets de l'évapotranspiration sur la concentration des solutions. En conséquence, l'augmentation du rapport SiO_2/Cl^- résulte de l'altération des roches; et la diminution des rapports Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+/Cl^- , comme celle de la teneur en potassium, de la nutrition des plantes. La stabilité du rapport Na^+/Cl^- témoigne des modalités de la lixiviation du sodium: le sodium libéré par l'altération des plagioclases est évacué plus facilement lorsque les matériaux se trouvent saturés en eau. Enfin, la stabilité du rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ montre que les ions SO_4^{2-} ont tous une origine extérieure au bassin versant.

Les bilans annuels Les entrées sont calculées à partir des précipitations enregistrées dans le bassin versant et des teneurs mesurées dans les eaux recueillies par le collecteur. Cependant

les teneurs moyennes des eaux d'infiltration en ions Na^+ , Mg^{2+} et K^+ importés sont déduites également des exportations d'ions Cl^- . En effet, le rapport entre les exportations et les précipitations annuelles indique la teneur moyenne en ions Cl^- , qui sert à calculer les teneurs en sodium et en magnésium grâce aux bonnes corrélations trouvées dans les eaux recueillies par le collecteur, et la teneur en potassium à l'aide de l'équation: $\text{K}^+ (\text{mg l}^{-1}) = (0.02 \text{ Cl}^-) + b$, où 0.02 Cl^- représente les entrées d'origine marine et b les apports continentaux. Finalement, les bilans hydrogéochimiques s'établissent ainsi (Tableau 7):

TABLEAU 7 Bilans hydrogéochimiques annuels (e = entrées, s = sorties, E = érosion, en $\text{t km}^{-2}\text{an}^{-1}$)

Eléments	1976-1977:			1977-1978:			1978-1979:		
	$P = 1917 \text{ mm}$			$P = 1453 \text{ mm}$			$P = 965 \text{ mm}$		
	$D = 1143 \text{ mm}$			$D = 909 \text{ mm}$			$D = 461 \text{ mm}$		
	e	s	E	e	s	E	e	s	E
SiO_2	0.00-7.59= -7.59			0.00-5.40= -5.40			0.00-3.18= -3.18		
Ca^{2+}	2.79-3.59= -0.80			1.54-3.15= -1.61			1.23-1.86= -0.63		
Mg^{2+}	0.56-1.32= -0.76			0.32-1.01= -0.69			0.38-0.69= -0.31		
K^+	0.26-0.61= -0.35			0.15-0.50= -0.35			0.26-0.26= 0.00		
Na^+	3.15-5.84= -2.69			2.51-4.43= -1.92			1.85-2.53= -0.68		

L'évacuation du fer et de l'alumine étant par ailleurs négligeable, les pertes annuelles mesurées représentent immobilisés plus respectivement 14.0; 11.8 et 5.5 t d'oxydes km^{-2} . Toutefois un bilan annuel est bien illusoire, car certains éléments sont plus ou moins longtemps soit par le complexe absorbant des sols, soit par la végétation. En outre, la moyenne de trois bilans annuels n'est pas forcément représentative de l'érosion chimique moyenne, tant les données varient d'une année à l'autre.

L'extension des données dans le temps

Diverses corrélations permettent, en procédant par types de situations hydrologiques, de calculer d'abord les exportations mensuelles pendant la durée des observations potamologiques, ensuite les exportations annuelles pendant la durée des observations pluviométriques à Collobrières (cf. Martin, 1981).

Détermination des apports Elle exige de connaître les teneurs moyennes des eaux d'infiltration en produits importés. Pour le calcium, élément fortement retenu dans les bassins versants, nous adoptons la teneur moyenne des eaux recueillies par deux collecteurs installés dans la région de septembre 1976 à août 1980, soit 1.283 mg l^{-1} . Pour le magnésium et le potassium, nous adoptons la teneur moyenne des eaux d'infiltration sur la même période, calculée à partir des exportations d'ions Cl^- et des indications fournies par les collecteurs (exception faite, pour le potassium, des premières

eaux précipitées en septembre 1978), soit 0.313 et 0.129 mg l⁻¹. Enfin, pour le sodium, la teneur moyenne des eaux d'infiltration est déduite de la valeur des exportations d'ions Cl⁻ sur la période étendue:

$$\left[0.6327 \frac{\text{Cl}^- \text{ (t km}^{-2} \text{ an}^{-1})}{\text{P (m an}^{-1})} - 0.6115 \right] \times 0.9621 = 1.617 \text{ mg l}^{-1}$$

où 0.6327 et -0.6115 sont les moyennes, pondérées par les précipitations près du collecteur du Rimbaud, des termes des équations annuelles fournies par les deux collecteurs de septembre 1976 à août 1979; et 0.9621, le coefficient correcteur de l'écart entre les teneurs moyennes mesurée et calculée sur la période de référence.

Le bilan hydrogéochimique moyen D'en estimer les intervalles de confiance oblige à considérer tous les facteurs d'erreur, mais souvent de façon arbitraire. Ils concernent:

(a) Pour les exportations: les analyses chimiques ($\pm 1.5\%$); les mesures hydrométriques ($\pm 2\%$); et l'extension des données potamologiques et hydrochimiques.

(b) Pour les entrées: la composition chimique moyenne des eaux recueillies ($\pm 1.5\%$); l'extension des données hydrochimiques; l'extension des données pluviométriques ($\pm 2\%$, pour Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺); la teneur moyenne en ions Cl⁻ des eaux d'infiltration pendant la durée des mesures ($\pm 3.5\%$ pour Mg²⁺ et Na⁺; $\pm 1.5\%$ pour K⁺); et les variations spatiales éventuelles des équations idéales permettant le calcul des apports ($\pm 3\%$).

Les risques d'erreur sur l'extension temporelle des données, puis les intervalles de confiance sont grossièrement estimés à partir de l'équation suivante:

$$\text{Valeur maximale du rapport entre les erreurs de sens opposés} = (n + N)/N$$

où n désigne le nombre des valeurs recueillies et N l'expression empirique: $[(0.25 n^2 + 0.5 n) - n]/2$.

Le bilan hydrogéochimique annuel moyen, établi sur la période étendue de 53 ans, ainsi que les intervalles de confiance sont portés dans le Tableau 8. Au total, l'érosion chimique annuelle moyenne représente 7.9 t d'oxydes km⁻². D'autre part, les valeurs les plus sûres concernent la silice et le sodium. De fait, pour ce

TABLEAU 8 Bilan hydrogéochimique annuel moyen sur 53 ans

Termes	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
Entrées (t km ⁻² an ⁻¹)	0.00	1.57 $\pm 11.4\%$	0.382 $\pm 19.8\%$	0.158 $\pm 10.5\%$	1.98 $\pm 9.8\%$
Sorties (t km ⁻² an ⁻¹)	4.17	2.27 $\pm 6.7\%$	0.795 $\pm 11.9\%$	0.350 $\pm 5.9\%$	3.32 $\pm 6.2\%$
Erosion (t km ⁻² an ⁻¹)	-4.17	-0.701 $\pm 6.7\%$	-0.413 $\pm 50.4\%$	-0.192 $\pm 41.3\%$	-1.35 $\pm 19.4\%$
					$\pm 16.4\%$

dernier, une partie des erreurs sur les entrées et les sorties n'a pas de répercussion sur l'évaluation de l'érosion, puisque l'on estime les apports à partir de la valeur des exportations des ions Cl^- .

INTERPRETATION DES RESULTATS

L'ordre de départ des éléments minéraux

Les bilans hydrogéochimiques et géochimiques permettent de déterminer les indices de mobilité (I.) des éléments minéraux, en comparant les pertes enregistrées avec la composition chimique des matériaux parentaux, puis avec le comportement du sodium, dont l'indice est fixé conventionnellement à 1000 (cf. Tardy, 1969). Les résultats obtenus par cette méthode figurent dans le Tableau 9.

TABLEAU 9 Ordres de départ des éléments minéraux

ORDRE D'EVACUATION (matériaux altérés; roches saines):							
$\text{Fe}, \text{Al}^{3+} < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{SiO}_2 \text{ combinée} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$							
I.e:	16	19	91	187	386	1000	1876
ORDRE DE LIXIVIATION APPARENT (eaux; matériaux altérés):							
$\text{Fe}, \text{Al}^{3+} < \text{K}^+ < \text{SiO}_2 \text{ combinée} < \text{Mg}^{2+} < \text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+}$							
I.l:			71	156	727	1000	1615

Ces deux séquences correspondent chacune à une altération hydrolytique en milieu faiblement acide (cf. Pedro, 1968). Elles n'en diffèrent pas moins sensiblement. A cet égard, notons qu'il est possible de calculer le taux d'évacuation (Te) de certains éléments (i) libérés par l'altération des gneiss, avec l'équation suivante:

$$\text{Te}_i \text{ (t km}^{-2}\text{an}^{-1}\text{)} = \frac{\text{I.e}_i \times \text{teneur i matériaux altérés (\%)} \times \text{Te Na}^+}{1000 \times \text{teneur Na}^+ \text{ matériaux altérés (\%)}}$$

La comparaison des séquences entraîne plusieurs remarques: (a) Pour le potassium, l'indice de lixiviation se révèle nettement plus faible que l'indice d'évacuation. Cet élément subit certainement une fixation nette dans la biomasse pérenne, que l'on peut estimer à $0.05 \text{ t km}^{-2}\text{an}^{-1}$. (b) La végétation fixe aussi du calcium: le déficit de lixiviation atteint $0.10 \text{ t km}^{-2}\text{an}^{-1}$. A ce propos, signalons que d'après l'évolution de la composition chimique des eaux souterraines (voir Tableau 6), et compte tenu de la dissolution des roches entre les deux niveaux considérés, la végétation absorberait 2.1 fois plus de calcium que de potassium. (c) La lixiviation du magnésium est, par contre excessive: les quantités exportées dépassent les quantités libérées par l'altération des gneiss de $0.31 \text{ t km}^{-2}\text{an}^{-1}$. Ce résultat témoigne indubitablement de la présence occulte de roches sédimentaires, pincées le long des accidents tectoniques majeurs. Ces roches, qui ne fournissent ni

chlorures ni sulfates, sont manifestement carbonatées. (d) Enfin, pour la silice, l'indice de lixiviation apparaît nettement inférieur à l'indice d'évacuation. Le type géochimique de l'altération actuelle est donc bien moins favorable à l'entraînement de la silice "libérée" que ne l'était celui des altérations subies par les matériaux minéraux dans le passé.

En définitive, il s'avère indispensable d'évaluer l'érosion chimique annuelle moyenne des gneiss sur la période étendue de 53 ans (Tableau 10).

TABLEAU 10 Erosion chimique annuelle moyenne des gneiss

SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Total ($\text{t km}^{-2}\text{an}^{-1}$)
4.17	1.12	0.18	0.30	1.82	7.59

Le type géochimique des altérations

Le rapport moléculaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ des minéraux secondaires en cours de formation est déterminé à partir des valeurs de l'érosion chimique exprimées en moles, suivant une méthode empruntée à Tardy (1969):

$$\text{RE} = (6 \text{ K}_2\text{O} + 6 \text{ Na}_2\text{O} + 2 \text{ CaO} - \text{SiO}_2) / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$$

RE atteint 3.2. L'altération actuelle est donc nettement bisiallitique. Elle s'accompagne de la formation de vermiculites, qui sont nombreuses dans la fraction $< 2 \mu\text{m}$ des rankers et des arènes. De leur côté, les pertes de matière révélées par les bilans géochimiques (voir Tableau 1) servent à calculer, de la même façon, un indice RA représentatif de la somme des altérations chimiques subies par les matériaux parentaux. Il s'élève à 1.4 pour l'évolution entre les roches saines et les roches très altérées, et à 2.2 pour celle entre les roches saines et les rankers. L'ensemble de ces résultats confirme l'existence de deux phases d'altération successives: une phase ancienne de type monosiallitique, responsable des kaolinites, et une phase actuelle de type bisiallitique.

La vitesse de l'altération actuelle

Le rapport entre l'érosion chimique totale (en tonnes d'oxydes $\text{km}^{-2}\text{an}^{-1}$) et la densité des gneiss (en dg cm^{-3}) indique une vitesse de dissolution de 2.8 mm kan^{-1} . Toutefois le passage des roches ($\rho = 2.7 \text{ g cm}^{-3}$) aux rankers ($\rho = 1.15 \text{ g cm}^{-3}$; somme des éléments selon la méthode isoquartz = 96.4 g pour 100 g de roches) provoque, en fait, une élévation de la surface topographique. Par ailleurs, une équation imaginée par Barth (1961) et mise au point par Buol *et al.* (1973) permet d'estimer la vitesse de transformation des roches en sols:

$$V_t = 100 D_i / [(c_i - s_i) \times \rho]$$

où D_i représente le taux d'érosion spécifique de l'élément i (en $t \text{ km}^{-2} \text{ an}^{-1}$), c_i et s_i les teneurs en l'élément i des roches et des sols (en g pour 100 g de roches) et ρ la densité des roches (en g cm^{-3}). A cet égard, nous avons effectivement mesuré l'érosion du sodium et de la silice. Malheureusement, les rankers résultent en partie d'une altération passée dont le type géochimique diffère de celui de l'altération actuelle. Il faut donc calculer V_t avec les seules données concernant le sodium, lequel n'est pas retenu au niveau du complexe d'altération. En définitive, nous évaluons la vitesse de transformation à 96 mm kan^{-1} . Elle équivaut théoriquement à la formation de 21.7 m de rankers en 100 000 ans (cf. Haseman & Marshall, 1945). Mais, dans l'état actuel de l'évolution des matériaux, le front d'altération (situé au contact des roches saines) progresse certainement plus vite que celui d'arénisation. V_t surestime donc la transformation des gneiss en rankers.

D'autre part, l'érosion du sodium renseigne sur l'efficacité globale de l'altération. En effet, la vitesse de désodisation correspond à la moyenne des vitesses de descente de tous les fronts de l'altération, en allant du front d'altération à celui de désodisation totale (lequel est encore virtuel):

$$V_d \text{ (mm kan}^{-1}\text{)} = \frac{\text{érosion Na}^+ \text{ (t km}^{-2} \text{ an}^{-1}\text{)} \times 100}{\text{teneur Na}^+ \text{ roches (\%)} \times \rho \text{ roches (g cm}^{-3}\text{)}} = 26$$

Pour finir, le Tableau 11 amorce une comparaison, à l'échelle mondiale, entre les vitesses de l'altération mesurées dans des

TABLEAU 11 Vitesses de l'altération des roches dans le monde

Bassins versants	P (mm)	D (mm)	T (°C)	V_t (mm kan ⁻¹)	V_d (mm kan ⁻¹)
Rimbaud, gneiss	1222	647	12.2	96	26
Ouham (Tchad), granites et gneiss ⁽¹⁾	1410	246	26.0	11	11
Bassin amont du lac Tchad, granites et gneiss ⁽²⁾	1210	121	26.1	6	6
Juliasdale (Rhodésie), granites ⁽³⁾	1220	400	13.8	14	14
Rusape (Rhodésie), granites ⁽³⁾	922	88	17.1	4	4
Pond Branch (Maryland), micaschistes ⁽⁴⁾	981	157	-	-	14
Hubbard Brook (New Hampshire), gneiss ⁽⁵⁾	1230	710	<9	19	10

D'après les données recueillies par: ⁽¹⁾ Gac & Pinta (1973) et Gac & Tardy (1980); ⁽²⁾ Gac (1979) et Gac & Tardy (1980); ⁽³⁾ Owens & Watson (1979); ⁽⁴⁾ Cleaves et al. (1970); ⁽⁵⁾ Johnson et al. (1968).

bassins versants de roches cristallines. En vérité, dans le bassin versant du Rimbaud, la vitesse de transformation des gneiss en sols est considérable. Cela tient évidemment au faible degré d'évolution des rankers. Cependant la vitesse de désodisation est également très forte. Sur ce point, sans même envisager le comportement potentiel des roches à l'altération chimique, on peut justement souligner que le bassin versant reçoit des précipitations abondantes, subit un drainage important et connaît des températures assez élevées.

ACKNOWLEDGEMENTS Nous sommes très reconnaissant au Groupement du CEMAGREF d'Aix-en-Provence, d'avoir fourni les données hydrologiques et participé à la collecte des échantillons d'eau. Nous remercions également le Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen, qui a traité une partie des échantillons de terre.

REFERENCES

- Barth, T.F.W. (1961) Abundance of the elements, areal averages and geochemical cycles. *Geochim. Cosmochim. Acta* 23, 1-18.
- Buol, S.W.F., Hole, F.D. & McCracken, R.J. (1973) *Soil Genesis and Classification*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Claridge, G.G.C. (1970) Studies in element balances in a small catchment of Taïta, New Zealand. Dans: *Résultats de Recherches sur les Bassins Représentatifs et Expérimentaux* (Proc. Wellington Symp.), 523-540. IAHS Publ. no. 96.
- Cleaves, E.T., Godfrey, A.E. & Bricker, O.P. (1970) Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. *Geol. Soc. Am. Bull.* 81, 3015-3032.
- Erickson, E. (1960) The yearly circulation of chloride and sulphur in nature: meteorological, geochemical and pedological implications. Part 2. *Tellus* 12, 63-109.
- Gac, J.Y. (1979) *Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation*. Thèse sc., Strasbourg. *Travaux et Documents ORSTOM, Paris*, no. 123.
- Gac, J.Y. & Pinta (1973) Bilan de l'érosion et de l'altération en climat tropical humide. Estimation de la vitesse d'approfondissement des profils. Etude du bassin versant de l'Ouham (République centrafricaine). *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* V (1), 83-96.
- Gac, J.Y. & Tardy, Y. (1980) *Géochimie d'un paysage tropical, le bassin du lac Tchad*. Dans: *Géochimie des Interactions entre les Eaux, les Minéraux et les Roches* (éd. par Y. Tardy). Editions Elements, Tarbes, France.
- Haseman, J.F. & Marshall, C.E. (1945) The use of heavy minerals in studies of the origin and development of soils. *Missouri Agricultural Experiment Station Research Bulletin*, no. 387.
- Johnson, N.M., Likens, G.E., Bormann, F.H. & Pierce, R.S. (1968) Rate of chemical weathering in silicate minerals in New Hampshire. *Geochim. Cosmochim. Acta* 32, 531-545.
- Martin, C. (1981) L'établissement de bilans hydrogéochimiques dans la partie occidentale du massif des Maures. Approche

- méthodologique. *Physio-Géo* 2, 39-58.
- Mathieu, P. (1972) Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous forêt. Influence du milieu forestier inter-tropical sur la migration des ions et sur les transports solides (Bassin de l'Amitoro, Côte d'Ivoire). Thèse sc., Nice, France.
- Owens, L.B. & Watson, J.P. (1979) Landscape reduction by weathering in small Rhodesian watersheds. *Geology* 7, 281-284
- Pédro, G. (1968) Distribution des principaux types d'altération à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* 10 (5), 457-470
- Roche, M. (1963) *Hydrologie de Surface*. ORSTOM, Editions Gauthier-Villars, Paris.
- Tardy, Y. (1969) Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallines d'Europe et d'Afrique. Thèse sc. Strasbourg. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr. Strasbourg*, no. 31
- Walling, D.E. (1978) Reliability considerations in the evaluation and analysis of river loads. *Z. Geomorph.* 29, 29-42.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1980) The spatial dimension in the interpretation of stream solute behaviour. *J. Hydrol.* 47, 129-149.