



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 337 (2005) 841–848



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géosciences de surface / Surface Geosciences

## L'érosion chimique et l'érosion mécanique à long terme du substrat granitique (Vendée, France)

Jean-Christophe Maurin, Françoise Gilbert\*, Michel Robert, Carine Churlaud

*Centre littoral de géophysique, université de La Rochelle, av. Michel-Crépeau, 17042 La Rochelle, France*

Reçu le 15 décembre 2003 ; accepté après révision le 2 mai 2005

Disponible sur Internet le 14 juin 2005

Présenté par Georges Pédro

---

### Résumé

On calcule le pourcentage d'érosion chimique du substrat granitique par l'analyse du zirconium dans la roche mère et les altérites. En Vendée, cette érosion représente au maximum 26 % de la dénudation totale. Ce pourcentage caractérise les zones tempérées. Il est pratiquement trois fois plus faible que celui rencontré dans des zones tropicales humides. ***Pour citer cet article : J.-C. Maurin et al., C. R. Geoscience 337 (2005).***

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Long-term chemical weathering and physical erosion of the granitic bedrock (Vendée, France).** We calculate the chemical depletion fraction of the granitic bedrock by analysing the rock-soil enrichment of zirconium. In Vendée (France), chemical weathering rates account for 26% of the denudation rates. Such a chemical depletion fraction characterizes temperate regimes. It is three times lower than that of humid tropical regimes. ***To cite this article: J.-C. Maurin et al., C. R. Geoscience 337 (2005).***  
© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* Érosion chimique ; Érosion mécanique ; Granite ; Zirconium ; France

*Keywords:* Chemical weathering; Physical erosion; Granite; Zirconium; France

---

### Abridged English version

#### 1. Introduction

Measuring how rates of natural chemical weathering and physical erosion interrelate is an important goal to estimate soil production, e.g. [9], atmospheric

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [fgilbert@univ-lr.fr](mailto:fgilbert@univ-lr.fr) (F. Gilbert).

CO<sub>2</sub> consumption, e.g. [4] and human over natural erosion rates, e.g. [3]. Conventional measurements of solid and solute fluxes of world major rivers have shown that the modern rates of both chemical weathering and physical erosion are coupled [2]. More recent works illustrated such a coupling on the longer timescales, using cosmogenic <sup>10</sup>Be together with measurements of concentrations of insoluble elements like zirconium [8,9]. For zirconium, removal by weathering should be zero, so enrichments from parent rock into weathered soils, will be balanced solely by outputs from physical erosion:

$$[Zr]_s = [Zr]_r + [Zr]_r \left( \frac{Ec}{Em} \right),$$

where  $[Zr]_s$  and  $[Zr]_r$  are representative zirconium concentrations of the soil and parent rock,  $Ec$  is the chemical weathering rate and  $Em$  is the physical erosion rate.

Since the total denudation rate ( $D$ ) is the sum of  $Ec$  and  $Em$ , then:

$$Ec = D \left( 1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s} \right),$$

where  $(1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s})$  is the fraction of total denudation that is accounted for by chemical weathering, termed the chemical depletion fraction.

In this paper, we apply this mass balance approach to a granitic bedrock in Vendée (France) and we compare our results with data obtained from the same method in different climatic and tectonics regimes [8,9].

## 2. Field site

The study area (Fig. 1) is underlain by biotite granite bedrock [1]. The parent rock is gradually weathered into saprolite, which is mantled by thick arena (about 10 m in thickness). The acid organic soil is a few decimetres thick. Sporadic loess deposits with dreikanter overlie the arena (Fig. 2), attesting to eolian erosion and transport that occurred during the LGM [11]. However, the landscape was mainly dissected by fluvial incision and hillslope diffusion. It is drained northward, in the large catchment basin of the Loire river and south and westward, in small coastal river catchments.

## 3. Sampling and analytical procedure

We have sampled along a weathered profile (Fig. 3) as well as on the region scale (Fig. 1) for statistics. Each sample was crushed at the size of 75 μm. The samples are melted by alkali fusion. Measurements of zirconium concentrations were performed with ICP–AES (Inductively Coupled Plasma–Atomic Emission Spectrometry) by reference to geostandard GS-N.

## 4. Results and discussion

Average zirconium concentrations from analyses of parent rock, saprolite, arena and soils are listed in Table 1. Calculated chemical depletion fractions indicate that the only weathering of saprolite account for 22% of the total mass lost by denudation at the study sites in Vendée. On the contrary, the arena are deficient in chemical depletion fraction, representing they are probably more physically than chemically weathered. Periglacial regime has probably favoured this physical weathering. The maximum chemical weathering of parent rock accounts for 26% of the total mass lost by denudation in Vendée. Comparative maximum chemical depletion fraction, 25% are calculated at temperate granitic sites in the Sierra Nevada, California [8]. This indicates that periglacial regime at our study site did not influence too much this fraction. On the contrary, tropical granitic sites in Puerto Rico provide substantially higher chemical depletion fraction, 62%. Total denudation rates are calculated by cosmogenic <sup>10</sup>Be measurements in the Puerto Rico [9] and in the Sierra Nevada [8] sites, while in Vendée they are extrapolative from cosmogenic <sup>10</sup>Be measurements performed in the Loire River catchment [10] or from numerical modelling of the flexural uplift of the region [5], respectively. The chemical depletion fractions do not vary against total denudation rates at each site, whereas they vary substantially with the climatic regime (Fig. 4A). The weathering rates increase systematically with tectonically controlled denudation rates for each climatic regime (Fig. 4B). Multiple regression provides mean chemical depletion fractions of about 15% for temperate regime (Sierra Nevada, Vendée) against 61% for tropical one (Puerto Rico). The low chemical depletion fraction in Vendée do not postulate for the inheritance of a Palaeocene tropical weathering within the saprolite, as questioned by [7].

## 5. Conclusion

The measurement of the evolution of zirconium concentrations from granitic parent rock into weathered soil is a rather simple but robust method to estimate the climatic influence on the fraction of total denudation that is accounted for by chemical weathering. Then our comparative study suggests that this fraction is almost three times higher for a tropical regime than for a temperate regime, whatever the tectonics.

## 1. Introduction

La quantification du rapport entre les fractions chimique et mécanique de l'érosion, à long terme, est un problème important. Il renvoie, en effet, à des interrogations d'actualité sur la production et le développement des sols (voir, par exemple, [9]), la consommation de CO<sub>2</sub> atmosphérique et la régulation du climat (voir, par exemple, [4]), l'impact anthropique intégré dans les mesures actuelles (voir, par exemple, [3]). À l'échelle des plus grands fleuves mondiaux, les flux de matière dissoute et solide révèlent un fort degré de couplage entre les érosions mécanique et chimique actuelles des silicates [2]. La croissance tectonique des reliefs amplifie l'érosion mécanique, qui s'accompagne d'une augmentation quasi proportionnelle des taux d'érosion chimique [2]. Cette tendance globale se précise à l'échelle régionale, sur plusieurs dizaines et centaines de millénaires, avec un calcul de la dénudation de versants granitiques par le <sup>10</sup>Be cosmogénique. La fraction chimique de la dénudation est, pour sa part, calculée par un bilan de masse d'éléments réputés insolubles comme le zirconium [8,9]. Le principe de ce calcul est basé sur la mesure de l'enrichissement en zirconium dans les profils d'altération. Cet enrichissement vers la surface dépend du rapport entre l'érosion chimique et l'érosion mécanique. Si l'on admet que le zirconium n'est pas exporté en solution, son degré d'enrichissement dans le sol est limité par son prélèvement à l'état solide. La formulation de cet équilibre est la suivante :

$$[Zr]_s = [Zr]_r + [Zr]_r \left( \frac{Ec}{Em} \right),$$

avec  $[Zr]_s$  la concentration de zirconium en surface,  $[Zr]_r$  sa concentration dans la roche saine,  $Ec$  et  $Em$  les taux d'érosion chimique et mécanique.

Comme la dénudation  $D$ , ou érosion totale, est égale à la somme de l'érosion chimique et de l'érosion mécanique, on déduit de l'équation précédente :

$$Ec = D \left( 1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s} \right),$$

avec  $\left( 1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s} \right)$  qui représente donc le pourcentage de l'érosion chimique (pourcentage du taux de dénudation attribuable à l'érosion chimique).

Dans cette note, nous appliquons cette méthodologie au substrat granitique de Vendée. L'objectif est l'évaluation du rapport entre l'érosion chimique et l'érosion mécanique, qui n'est pas connu dans ce type d'environnement, où la tectonique récente demeure modérée. Nous comparons ces résultats avec ceux obtenus par la même méthode, mais dans des environnements tectoniques ou climatiques différents, en Sierra Nevada (Californie) [8] et à Porto Rico [9]. Nous discutons, enfin, la signification paléoclimatique des altérites de Vendée.

## 2. Zone d'étude

Situé à l'extrémité sud du domaine armoricain (Fig. 1), le substrat de la zone d'étude est un granite à biotite, appartenant au complexe granitique de La Roche-sur-Yon [1]. Au nord de la région, le drainage s'effectue vers le large bassin versant de la Loire. À l'ouest et au sud, le drainage est assuré par de petites rivières côtières. À l'est, un seuil topographique (le Seuil du Poitou) marque une rupture tectonique, dont le mouvement principal s'est achevée au plus tard au début du Pliocène [5]. L'érosion contrastée du seuil entre la façade océanique et le domaine continental aurait généré un rebond isostatique flexural de la région [5]. La prise en compte de cette hypothèse isostatique sera discutée avec nos résultats. D'un point de vue climatique, les conditions d'altération et d'érosion de la zone ont été influencées par les alternances glaciaires et interglaciaires du Quaternaire. La présence sporadique de loess peu épais (Fig. 2), déposés sur une surface de corrasion jalonnée de galets éolisés (*drycanter*), témoigne de conditions périglaciaires. La zone est située, en fait, à la limite d'extension du pergélisol du dernier maximum glaciaire [11]. L'érosion éolienne dans ce contexte est un incrémentation de l'érosion mécanique. Mais ce sont, pour

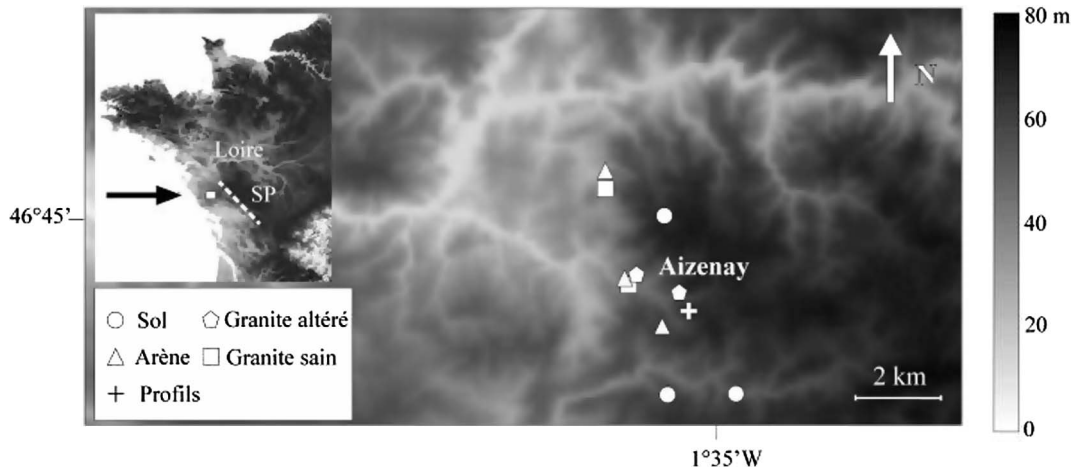


Fig. 1. Localisation et MNT de la zone d'étude : les pointillés soulignent le Seuil du Poitou (SP).

Fig. 1. Location and DEM of the field site: the dashed line marks the tectonic scarp, which is locally termed 'Seuil du Poitou' (SP).

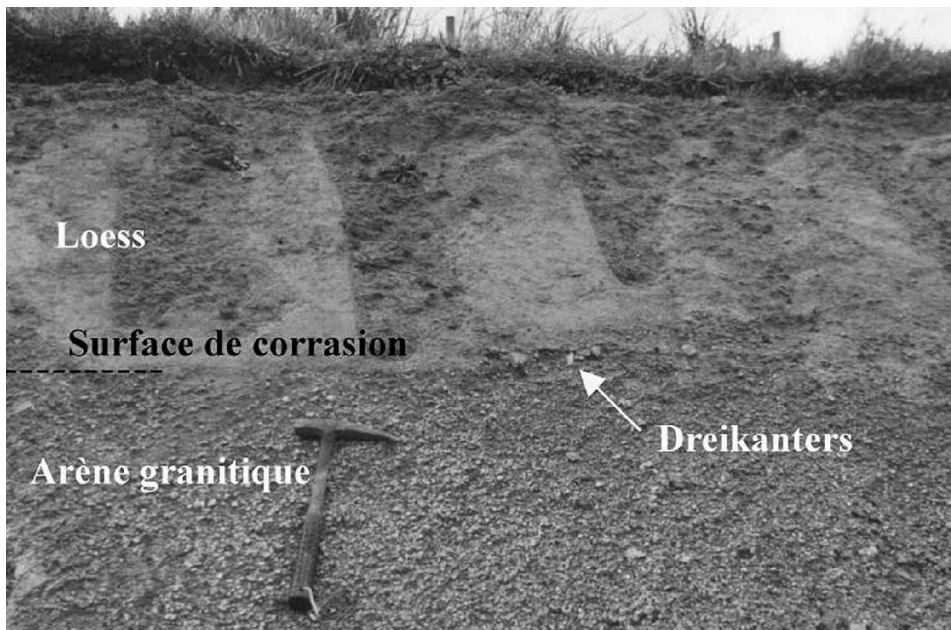


Fig. 2. Vue de la discordance de loess sur les arènes.

Fig. 2. View of the loess unconformity above the arena.

l'essentiel, les transports hydriques sur les versants et dans le réseau hydrographique (Fig. 1) qui ont assuré l'érosion mécanique du substrat granitique, en façonnant le paysage vallonné de la région à long terme. Cette érosion hydrique est principalement causée par le ruissellement et la diffusion lente sur les versants, et

par l'incision dans les cours d'eau. Les pentes (28 % maximum) et leur courbure convexe excluent les transports gravitaires en masse et de grande amplitude. En conséquence, nous considérons que l'érosion mécanique est progressive et sans troncature profonde du profil d'altération. Celui-ci est d'ailleurs assez épais.

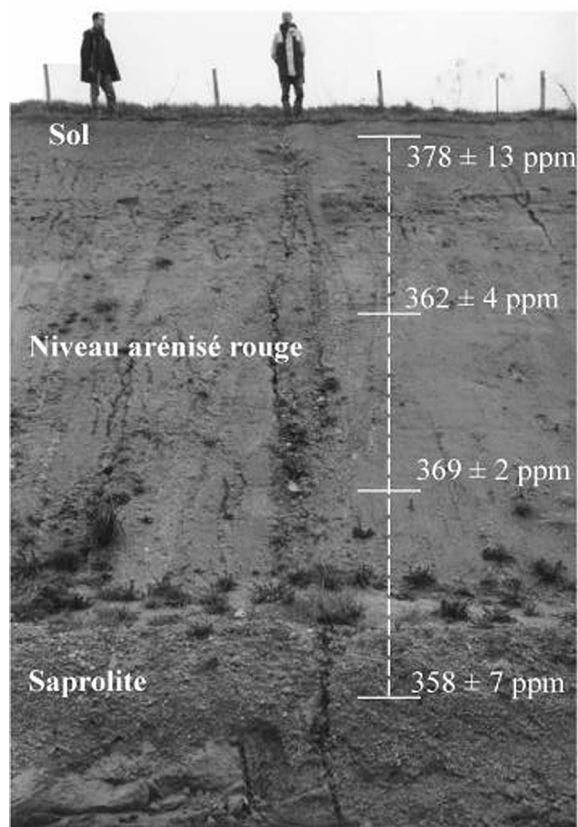


Fig. 3. Vue du profil d'altération en périphérie d'Aizenay et report des concentrations en zirconium (ppm).

Fig. 3. View of the weathered granitic profile in the vicinity of Aizenay and plot of different zirconium concentrations (ppm).

Le déblaiement réalisé pour l'aménagement des accotements d'une rocade à hauteur d'Aizenay (Fig. 1) permet l'observation d'un profil d'altération sur une tranche de près de 10 m d'épaisseur (Fig. 3). En outre, le creusement pour l'installation des buses de drainage de la rocade a dégagé la roche mère vers 12 m de profondeur. Elle est faite d'un granite massif clair. Au-dessus, le granite est altéré, mais conserve toute sa structure. Il devient plus cassant et oxydé, avec une teinte rouille caractéristique. L'affleurement exposé sur l'accotement de la rocade (Fig. 3) permet de reconstituer l'évolution des faciès d'altération vers la surface. Celui-ci est marqué par une décroissance forte de la cohésion du granite oxydé, qui devient une saprolite friable à texture granitique cryptique. Le reste du profil est, pour l'essentiel, constitué d'une arène égale-

ment oxydée, dans laquelle la seule structure préservée est filonienne (pegmatites, quartz d'exsudation). Localement, le terme ultime de l'arène est de teinte blanchâtre. En surface se développe un sol organique peu épais (quelques décimètres), de type brun acide. Les prélèvements ont été effectués sur l'accotement de la rocade (Fig. 3), afin d'estimer la variation des concentrations de zirconium le long du profil d'altération, depuis la saprolite jusqu'au sol. L'échantillonnage a ensuite été étendu sur la zone (Fig. 1), afin de compléter les analyses de tous les faciès d'altération depuis la roche mère et pour leur assurer une représentativité statistique.

### 3. Procédure analytique

Le zirconium est mesuré sur roche totale par ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*) et les échantillons sont préparés par fusion alcaline. Pour limiter l'effet de pépité et les hétérogénéités liés aux zircons, 500 g d'échantillons sont broyés jusqu'à l'obtention d'une matrice inférieure à 75  $\mu\text{m}$ . La fusion est réalisée avec un claisse M4 qui possède des creusets en platine ; il permet le transfert du verre non encore cristallisé dans la solution de  $\text{HNO}_3$  à 20%. Le fondant utilisé est du métaborate de lithium ( $\text{LiBO}_2$ ), le fluidifiant du bromure de lithium ( $\text{LiBr}$ ) et l'utilisation de l'acide borique ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) permet de baisser la température du point de fusion. Quant à la fin de mise en solution, elle se fait sur plaque chauffante magnétique. Pour la mesure par ICP-AES, nous utilisons le scandium comme étalon interne. L'optimisation des conditions opératoires est faite à partir de différents débits de nébulisation. Elle constitue un compromis entre l'optimisation de la robustesse (cf.  $\text{MgII/MgI}$ , [6]) et celle de la sensibilité des raies du zirconium dans ce type de matrice. Les concentrations obtenues sont validées par la mesure d'un géostandard (GS-N). Enfin, l'obtention d'une dispersion minimale (< 5%) des mesures sur un même échantillon a été un critère indispensable pour distinguer des variations de concentration.

### 4. Résultats et discussion

Les prélèvements effectués le long de la rocade (Fig. 3) indiquent un accroissement de la concentra-

Tableau 1

Concentrations moyennes en zirconium et pourcentages d'érosion chimique entre chaque horizon et la roche mère ou entre chaque horizon

Table 1

Mean zirconium concentrations and weathered facies to parent rock or weathered facies to facies chemical depletion fractions, respectively

Horizons	[Zr] en ppm	$(1 - \frac{[Zr]_{\text{y sain}}}{[Zr]_{\text{horizon}}})$	$(1 - \frac{[Zr]_{\text{horizon inf.}}}{[Zr]_{\text{horizon sup.}}})$
Sol	380 ± 22 (5)	26 ± 5%	5 ± 9%
Arène	360 ± 26 (5)	22 ± 6%	0 ± 9%
Saprolite	360 ± 4 (3)	22 ± 2%	10 ± 2%
Granite altéré	326 ± 3 (3)	14 ± 2%	14 ± 2%
Granite sain	282 ± 6(3)		

tion en zirconium dans le sol par rapport à celle de la saprolite ou des arènes. L'écart est ténu, moins de 20 ppm, mais plus large que les marges d'erreur. En revanche, entre les arènes et la saprolite, l'écart n'est pas significatif. Nous n'observons, par ailleurs, aucune évolution des teneurs en zirconium en remontant vers la surface dans les arènes (Fig. 3). Par voie de conséquence, le pourcentage d'érosion chimique  $(1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s})$  entre la saprolite et les arènes est nul. Pour sa part, le rapport des concentrations entre les arènes et le sol fournit un pourcentage d'érosion chimique de l'ordre de 5%. Les prélèvements d'échantillons de sol, d'arène et de saprolite étendus à l'échelle de la zone (Fig. 1) confirment l'enrichissement et les gammes de concentration moyenne en zirconium relevés sur le profil de la rocade, à savoir (Tableau 1) : autour de 380 ppm dans les sols et 360 ppm dans les arènes et les saprolites. Le rapport entre ces teneurs moyennes corrobore donc l'estimation des 5% d'érosion chimique (Tableau 1) établie dans le profil de la rocade (Fig. 3). Les échantillons de roche mère, qui ont été excavés pour le drainage de la rocade (Fig. 1), présentent des teneurs en zirconium significativement plus faibles que celles des horizons d'altération supérieurs (Tableau 1). Ainsi, le faciès granitique cassant et oxydé de teinte rouille présente une concentration moyenne en zirconium de l'ordre de 326 ppm, alors que celle des échantillons de granite massif clair, faciès le plus sain, se situe autour de 282 ppm. Le calcul des pourcentages partiels entre chaque horizon et la roche mère, ou d'un horizon sur l'autre (Tableau 1), indique que l'essentiel de l'érosion chimique, 22%, est réalisé dans les premiers horizons, correspondant

à la transformation de la roche mère en saprolite. Le pourcentage d'érosion chimique résiduel qui n'excède pas 5% (Tableau 1) est attribuable aux processus de transformation des arènes en sol. La constance des teneurs moyennes en zirconium de la saprolite aux arènes, qui se confirme à l'échelle de la zone, indique un pourcentage d'érosion chimique nul à ce niveau (Tableau 1). Cela signifie sans doute que les arènes traduisent ici une altération physique (perte de cohésion des altérites). Le permafrost constituait probablement un niveau favorable à cette altération physique. Pour ce qui concerne l'érosion chimique, son pourcentage maximum, calculé à partir du rapport entre la concentration moyenne des échantillons de roche mère et celle des sols (Tableau 1), atteint 26% dans notre zone d'étude. Une étude menée sur un substrat granitique altéré sous climat tempéré dans la Sierra Nevada [8] fournit un résultat similaire. En effet, le pourcentage maximum d'érosion chimique atteint là-bas 25%. Par comparaison avec Porto Rico, où règne un climat tropical humide, le pourcentage maximum d'érosion chimique atteint 63% [9]. Afin d'étudier les relations entre l'érosion, la tectonique et le climat, les pourcentages et les taux d'érosion chimique des différents sites sont reportés en fonction de leurs taux de dénudation respectifs (Fig. 4). Les taux de dénudation sont calculés à partir des mesures de  $^{10}\text{Be}$  cosmogénique, également effectuées par [8] dans la Sierra Nevada et par [9] à Porto Rico. Pour ce qui concerne notre zone vendéenne, ne disposant pas de données in situ, nous proposons deux hypothèses. La première est basée sur une extrapolation à partir des mesures de  $^{10}\text{Be}$  cosmogénique effectuées plus au nord par [10], dans le bassin versant de la Loire. Cette extrapolation est faite en utilisant la régression linéaire établie par les auteurs entre les taux de dénudation et les altitudes moyennes des versants. Cette régression linéaire est aussi valable pour d'autres bassins versants européens (Meuse, Neckar), assurant la pénéplanation d'un domaine stable ou à tectonique modérée [10]. Dans cette hypothèse « stable », notre zone concorderait avec un taux de dénudation n'excédant pas  $10^{-2} \text{ mm an}^{-1}$ . En multipliant par une densité moyenne de régolite granitique de  $2800 \text{ kg m}^{-3}$ , cela correspond à un taux de  $28 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . La seconde hypothèse est celle du rebond isostatique flexural, lié à l'érosion de l'escarpement tectonique pliocène du Seuil du Poitou [5]. Selon cette hypothèse « tectonique », le taux de dénudation

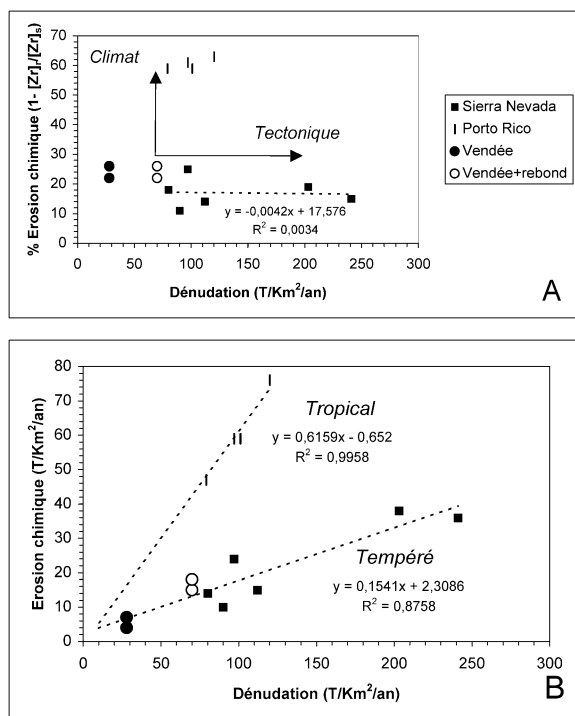


Fig. 4. Pourcentages (A) et taux (B) d'érosion chimique en fonction des taux de dénudation. Vendée + rebound : hypothèse du rebond isostatique (voir texte et [5]). Sierra Nevada : moyenne de chaque site (Tableau 1 in [8]). Porto Rico : échantillons de sol (Tableau 2 in [9]).

Fig. 4. Chemical depletion fraction (A) and weathering rates (B) against denudation rates. Vendée + rebound: with the hypothesis of isostatic rebound (see text and [5]). Sierra Nevada site-to-site average (Table 1 in [8]). Porto Rico: soil samples only (Table 2 in [9]).

devrait s'élever dans notre zone à  $2,5 \times 10^{-2} \text{ mm an}^{-1}$  [5]. Cela correspond à  $70 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Sur la Fig. 4A ou 4B, l'étalement et l'augmentation des taux de dénudation depuis la zone la plus stable représentée par la Vendée jusqu'aux zones actives de la Sierra Nevada ou de Porto Rico traduisent l'influence de la tectonique. Les taux de dénudation les plus élevés correspondant aux sites les plus actifs de la Sierra Nevada [8]. Sur la Fig. 4A, la répartition des pourcentages d'érosion chimique illustre, pour sa part, la différence entre les sites localisés dans une zone tropicale humide (Porto Rico) et ceux localisés dans des zones à climat tempéré (Sierra Nevada, Vendée). Si ce contraste d'ordre climatique est manifeste, il n'apparaît pas, en revanche, de corrélation entre la tectonique et les pour-

centages d'érosion chimique. En effet, à l'instar de la Sierra Nevada, qui présente la plus large gamme de taux de dénudation, la régression négative des pourcentages d'érosion chimique en fonction de ces taux (Fig. 4A) est insignifiante ( $-0,0042$ ). En revanche, pour chaque environnement climatique, tempéré ou tropical, une régression linéaire significative s'établit entre les taux d'érosion chimique et les taux de dénudation (Fig. 4B). Les taux d'érosion chimique augmentent avec les taux de dénudation, confirmant pour le long terme ce que Gaillardet et al. [2] ont montré avec l'analyse des flux de matière dans les fleuves. Sur la Fig. 4B, la pente respective de chaque droite [ $Ec = D(1 - \frac{[Zr]_r}{[Zr]_s})$ ] correspond à la moyenne des pourcentages d'érosion chimique de chaque zone : 61 % en zone tropicale humide (Porto Rico) et 15 % sous climat tempéré (Sierra Nevada et Vendée). Ainsi, au vu de cette méthode, le rapport entre le taux d'érosion chimique et le taux d'érosion mécanique du substrat granitique apparaît comme une constante climatique. En Europe de l'Ouest, une interrogation persiste quant à la signification paléo-climatique des saprolites développées sur le socle cristallin [7]. Certaines pourraient correspondre à des altérites formées dans les conditions chaudes et humides du Paléocène. Nous remarquerons simplement que, par comparaison avec Porto Rico, où le pourcentage d'érosion chimique atteint près de 50 % dans la saprolite (pour un maximum de 62 % dans le sol), il n'excède pas 22 % dans notre zone d'étude au niveau de ce faciès (pour un maximum de 26 % dans le sol). Ce constat ne milite pas en faveur de l'hypothèse d'un héritage d'altération correspondant aux conditions tropicales humides du Paléocène, mais s'inscrivant plutôt dans le cadre des fluctuations entre climat tempéré et climat périglaciaire, subies depuis le Pliocène.

## 5. Conclusion

L'analyse des teneurs en zirconium dans le sol et dans les différents horizons d'altération développés sur un substrat granitique est une méthode simple, mais manifestement efficace pour estimer le rapport entre l'érosion chimique et l'érosion mécanique. Ainsi, en Vendée, le taux d'érosion chimique représente au maximum un quart du taux de dénudation totale. Compte tenu de ce rapport, dans l'hy-

pothèse d'une dénudation faible, de l'ordre de grandeur de celle qui prévaut dans le bassin versant de la Loire [10], les taux d'érosion naturelle n'excéderaient pas  $7 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  pour la fraction chimique et  $21 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  pour la fraction mécanique. Dans l'hypothèse d'une dénudation amplifiée par la tectonique récente du Seuil du Poitou [5], le taux d'érosion chimique s'élèverait à  $17,5 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  et l'érosion mécanique à  $42,5 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Quelle que soit l'hypothèse, la dénudation du substrat est contrôlée par une érosion mécanique progressive, intégrant une abrasion éolienne (corrasion), réalisée en contexte périglaciaire et une bonne part de dissection fluviale, réalisée sous climat tempéré. Quant à l'érosion chimique, notre approche indique qu'elle concerne, pour l'essentiel, un niveau de saprolite qui coiffe la roche mère sous une épaisse couverture d'arènes (une dizaine de mètres). Le rapport entre ce taux d'érosion et celui d'érosion mécanique est pratiquement trois fois plus faible qu'en environnement tropical humide. Il correspond, en revanche, à celui d'autres zones tempérées. Le pourcentage d'érosion chimique du substrat granitique représente un indice paléo-climatique intéressant, dont la fiabilité et la reproductibilité demandent à être testées sur un plus grand nombre d'environnements.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien financier du Programme national de recherche en hydrologie de l'Insu-CNRS (projet 01 PNRH 14).

## Références

- [1] M. Colchen, P. Rolin, La chaîne hercynienne en Vendée, *Géol. France* 1–2 (2001) 53–85.
- [2] J. Gaillardet, B. Dupré, P. Louvat, C.J. Allègre, Global silicate weathering and  $\text{CO}_2$  consumption rates deduced from the chemistry of large rivers, *Chem. Geol.* 159 (1999) 3–30.
- [3] T. Hewawasam, F. von Blanckenburg, M. Schaller, P. Kubik, Increase of human over natural erosion rates in tropical highlands constrained by cosmogenic nuclides, *Geology* 31 (2003) 597–600.
- [4] A.D. Jacobson, J.D. Blum, Relationship between mechanical erosion and atmospheric  $\text{CO}_2$  consumption in the New Zealand Southern Alps, *Geology* 31 (2003) 865–868.
- [5] J.-C. Maurin, K. Renaud, Isostasie flexurale et érosion différentielle : modélisation numérique appliquée au seuil du Poitou, *C. R. Geoscience* 334 (2002) 1149–1155.
- [6] J.-M. Mermet, Use of magnesium as a test element for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry diagnostics, *Anal. Chim. Acta* 250 (1991) 85–94.
- [7] P. Migon, K. Lidmar-Bergström, Deep weathering through time in central and northwestern Europe: problems of dating and interpretation of geological record, *Catena* 49 (2002) 25–40.
- [8] C.S. Riebe, J.W. Kirchner, D.E. Granger, R.C. Finkel, Strong tectonic and weak climatic control of long-term chemical weathering rates, *Geology* 29 (2001) 511–514.
- [9] C.S. Riebe, J.W. Kirchner, R.C. Finkel, Long-term rates of chemical weathering and physical erosion from cosmogenic nuclides and geochemical mass balance, *Geochim. Cosmochim. Acta* 67 (2003) 4411–4427.
- [10] M. Schaller, F. Von Blanckenburg, N. Hovius, P.W. Kubik, Large-scale erosion rates from in-situ-produced cosmogenic nuclides in European river sediments, *Earth Planet. Sci. Lett.* 188 (2001) 441–458.
- [11] B. Van Vliet-Lanoë, Extension du pergélisol en Europe au dernier maximum glaciaire (20 ka BP), *Lettre pigb-pmrc-France* 10 (2000) 38–43.