

Distribution d'un élément trace (Cr) dans un sol développé sur roches métamorphiques : variabilité à l'échelle d'un versant

Sébastien Salvador-Blanes^{a,b,*}, Sophie Cornu^a, Dominique King^a

^a Inra, Unité de science du sol, centre de recherches d'Orléans, av. de la Pomme-de-Pin, BP 20619, 45166 Olivet cedex, France

^b Laboratoire de géologie des environnements aquatiques continentaux, faculté des sciences et techniques, Parc de Grandmont, 37200 Tours, France

Reçu le 3 mai 2001 ; accepté le 2 octobre 2001

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Distribution of chromium in soils developed into metamorphic rocks: variability at the hillslope scale. The influence of pedogenetic factors onto spatial variability of chromium in soil surface horizon was studied in a metamorphic area (Massif Central, France) at the hillside scale. A grid survey was performed. Surface soil horizons were sampled at each point and analysed in Cr. Results show the determinant influence of the rock type on Cr content distribution along the slope. However, surface horizons of these soils exhibit a lower Cr content heterogeneity than the deeper horizons. This was explained by soils' material erosion and deposition along the slope. Tillage and hedges also influence the Cr distribution in surface horizon along the slope. To cite this article: S. Salvador-Blanes et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 51–58. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

chromium / soils / spatial variability / metamorphism / parent material / erosion / farming practices

Résumé – Afin d'étudier l'influence des facteurs pédogénétiques sur la variabilité spatiale des teneurs en chrome le long d'un versant, sur terrain métamorphique (Massif central, France), un échantillonnage systématique de l'horizon de surface a été réalisé et le chrome analysé en chaque point. Le facteur déterminant, dans cette région, est la nature du substrat. Toutefois, si le substrat présente des teneurs en chrome très hétérogènes, les horizons de surface ne présentent pas cette hétérogénéité. Cette homogénéisation en surface est interprétée comme le reflet de redistributions par l'érosion liée aux fortes pentes, par le labour et par les haies à l'origine des banquettes agricoles. Pour citer cet article : S. Salvador-Blanes et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 51–58. © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

chrome / sols / variabilité spatiale / métamorphisme / matériau parental / érosion / pratiques agricoles

Abridged version

1. Introduction

Human activities produce wastes rich in trace elements (TE) that can pollute soils and be potentially toxic to living organisms. TE are naturally present in soils and rocks at various concentrations. Assessment of anthropogenic inputs requires a good knowledge of natural TE contents in soils (pedogeochemical background) [4]. In many countries, TE background level has been assessed on large areas using low-density sampling grids [11, 20, 27]. These works

produce maps of trace elements distribution in soils using statistical approaches only. The complex processes affecting TE variability in soils are generally not assessed at this scale. Other studies on smaller areas attempted to identify these processes:

- (i) TE contents were mapped using geostatistical tools, and their variability a posteriori interpreted [2, 3, 12, 19, 25, 26, 28];
- (ii) detailed studies on soil profiles [7, 13, 16, 21] evidenced some of the processes responsible for the trace element variability in soils.

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : salvador@orleans.inra.fr (S. Salvador-Blanes).

Studies coupling these two approaches along toposequences [6, 22] are rarely attempted, despite their interest in terms of trace element mapping.

Such a study was attempted in order to determine the pedological factors influencing the spatial variability in Cr contents along a hillside located in a metamorphic area in Massif Central (France). According to a previous study [24], the studied soils were developed in two rock types (amphibolite and gneiss) having contrasted Cr contents. In the present study a geostatistical analysis of the Cr content in the soil surface horizons was performed in order to: (i) quantify the spatial variability, (ii) determine the role of erosion and agricultural practices onto Cr distribution into soil surface horizons along a hillslope.

2. Materials and methods

2.1. Study area and previous results

The study area is located in the Aigurande plateau in the northern part of the Massif Central. The study plot (*figure 1*) is a pasture of 2.7 ha located along a convex hillslope with some steep slopes. Soils are:

- on the top of the slope, Rankosols [1] or eutric Leptosols [14] developed into amphibolite (area A) [9, 15];
- in the middle part of the slope, Brunisols–Redoxisols [1] or gleyic Cambisols [14] developed in a complex system of amphibolite and gneiss alterites (area B);
- at the foot of the slope, Rankosols [1] or eutric Leptosols [14] developed into gneiss (area C) [9, 15].

A previous study [24] showed that amphibolite is Ca-rich and gneiss K-rich. These two rocks are sometimes intimately mixed within the B area. Soil Cr content is mainly linked to the parent material and to redistribution processes, one of the main Cr mineral bearers being biotite.

2.2. Methods

47 surface horizon samples were randomly collected according to a 25 × 25 m grid (*figure 1*). The alterites were also described at each sampling point. Soil samples were dried at 40 °C and sieved at 2 mm. Fe, Ca, Mg, K and Cr contents were analysed by ICP–AES after tri-acidic dissolution.

The Cr content map was obtained by kriging using the semivariogram fitted to the experimental data. The parent material nature was plotted on the map. In addition, a digital elevation model (DEM) was established using data collected in field with a laser tacheometer (*figure 1*). Limits of the parcels were reported on the map. A former hedge, visible on a cadastral map of 1842 [8] and on an aerial photograph taken in 1967, was uprooted in 1975, according to the farmer.

3. Results and discussion

3.1. Mapping of the Cr contents in surface horizon

Semivariogram of the Cr content (*figure 2*) does not exhibit any nugget effect indicating that the sampling density is sufficient and that the Cr content heterogeneity

observed for deeper horizons does not exist in surface horizons. In addition, the semivariogram was unbounded. It was fitted to the experimental data combining spherical and power models. The Cr content map (*figure 3*) is obtained using ordinary kriging.

3.2. Influence of the parent material on the Cr content spatial distribution

Figure 3 shows the link between the Cr content and the parent material nature. Soils of area A developed into amphibolite are Cr-poor (30–70 mg·kg⁻¹), while soils of area C developed into gneiss are richer in Cr (70–110 mg·kg⁻¹). The richest soils in Cr (> 110 mg·kg⁻¹) are encountered in the B area, as amphibolite and gneiss mixture is observed within the alterite.

Table 1 shows that Ca and K contents are inversely linked, as already observed in a previous work [24]. These two elements are considered as indicators of the nature of parent material in surface horizons. K and Cr are strongly linked ($r = 0.73$ at 1 % of significance), as already seen by Salvador-Blanes et al. [24]. *Figure 4* shows that areas A and C cover amphibolite and gneiss parent materials respectively. Area B appears to be composed by a complex mixture of parent materials.

3.3. Redistribution of soil material

Within the B area, K and Cr contents in some soil surface horizons are low despite gneissic parent material (*figure 4*). These samples are all located in a flatter area located above a former hedge (*figure 5*). Thus soil material originating from amphibolitic eroded material was accumulated along the former hedge, covering the gneiss alterite. Importance of tillage erosion has already been evidenced [17].

In addition, the highest Cr contents are linked to areas where amphibolite and gneiss material are observed in association (*figure 4*). These sampling points are located slightly below the area of observed parent material mixture (*figure 3*). This was interpreted as the result of erosion due to steep slopes as already observed elsewhere [5]. This hypothesis should be confirmed by more detailed field observations.

3.4. Cr-bearing minerals

3.4.1. Soils developed into amphibolite

Low Cr contents are linked to Mg contents and to K contents secondarily (*table II*). Sand fraction observation of the soil surface horizons indicated that the higher K contents observed at some points of this area are linked to the presence of orthoclase and sericite. These two minerals are due to leptynite associated to amphibolite at the top of the B area. As orthoclase is not a Cr mineral bearer [23, 24], Cr could be beard by sericite.

3.4.2. Soils developed into gneiss or gneiss and amphibolite mixture

Cr contents are negatively linked to K content but positively linked to Ca, Mg and Fe contents (*table II*). Amphibole observed in the studied area is hornblende [15], i.e.

rich in Ca, Mg and Fe [18]. Amphibole [10, 18, 23] as well as biotite [24] seems thus to bear Cr.

4. Conclusion

The spatial analysis of Cr contents in surface horizons along a hillslope developed on metamorphic rocks evidences the determining influence of geology onto the Cr

content variability. This is due to steep slopes and induced erosion observed in the area. However, Cr content in surface horizons is less variable than in deeper horizons. This was explained by redistribution along the slope due to erosion and tillage. Hedges were also responsible for Cr content redistribution features. Impact of hedges on Cr content could not be evidenced in the previous work [24], due to the lack of spatial analysis.

1. Introduction

L'homme, par ses activités, agricoles, minières et industrielles, produit des déchets riches en éléments traces (ET), potentiellement toxiques pour les organismes vivants. Cependant, les éléments traces se rencontrent aussi à l'état naturel dans les roches et les sols. Ainsi, la détermination de la quantité d'ET apportés par l'homme sur un sol donné nécessite de connaître les stocks d'ET naturellement présents dans les sols : le fond pédogéochimique [4]. Dans plusieurs pays, l'évaluation de ce fond pédogéochimique a été effectuée sur de très larges étendues, avec un échantillonnage systématique de la variable à cartographier, à densité faible pour la surface considérée [11, 20, 27]. Ces travaux d'inventaire visent à fournir une image de la variabilité des teneurs en ET, et utilisent exclusivement une approche statistique. Les processus à l'origine de la variabilité des teneurs en ET dans les sols sont souvent très complexes et ne sont pas étudiés sur des surfaces d'investigation aussi vastes.

D'autres études sur des surfaces plus réduites ont tenté de mettre en évidence ces processus en utilisant deux types d'approche différents :

(i) les teneurs en ET ont été cartographiées sur de petites étendues, en utilisant les outils géostatistiques ; une tentative d'explication de la variabilité des teneurs observées est effectuée a posteriori [2, 3, 12, 19, 25, 26, 28] ;

(ii) des études détaillées sur profils pédologiques ont permis d'appréhender les processus à l'origine de la variabilité des teneurs en ET [7, 13, 16, 21].

Les travaux couplant ces deux types d'approche le long de toposéquences [6, 22] sont rares, malgré l'intérêt qu'ils présentent pour un objectif de cartographie des teneurs en ET.

Une telle étude a été tentée afin d'analyser l'influence des facteurs pédogénétiques sur la variabilité spatiale des teneurs en chrome (Cr) d'un versant situé sur un terrain métamorphique, dans le Massif central. Une première analyse [24] de quatre fosses pédologiques placées le long d'une toposéquence a permis de distinguer deux types de matériaux parentaux (amphibolites et gneiss), reflétant des teneurs en Cr différentes. Toutefois, on constate une forte variabilité des

teneurs en Cr au sein des horizons de certaines fosses. La recherche de minéraux porteurs de Cr et l'étude de l'évolution des teneurs au sein de chacune des fosses ont permis d'établir des hypothèses sur l'origine géogène de Cr et sur l'importance des remaniements le long du versant.

Cette note fait suite à la première partie de cette étude. L'objectif est ici de procéder à une analyse spatiale des teneurs en Cr dans l'horizon de surface afin : (i) de quantifier cette variabilité spatiale au regard des résultats sur fosses et (ii) d'approfondir les hypothèses de redistribution des matériaux le long du versant, en lien notamment avec les pratiques agricoles.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site d'étude et rappel des résultats obtenus sur fosses

La zone étudiée est située au sein du plateau d'Aigurande, à l'extrémité nord du Massif central. Elle est constituée d'une seule parcelle de 2,7 ha, actuellement utilisée en prairie permanente. Elle fait partie d'un versant dont la pente générale est convexe et parfois très forte (*figure 1*). Les sols sont développés sur une association d'amphibolites en amont et de gneiss en aval [9, 15]. Trois zones ont été distinguées lors de l'étude sur fosses :

– en amont, les Rankosols d'érosion [1] ou Leptosols eutriques [14], développés dans des amphibolites (zone A) ;

– au milieu du versant, les Brunisols–Rédoxisols [1] ou Cambisols gleyiques [14], développés dans un mélange complexe d'amphibolites et gneiss (zone B) ;

– en aval, les Rankosols [1] ou Leptosols eutriques [14], développés dans le gneiss (zone C).

L'analyse chimique des roches et altérites [24] a montré que le pôle amphibolite est riche en Ca et que le pôle gneiss est riche en K. Ces deux pôles sont parfois intimement mêlés au sein même d'une fosse, notamment dans la zone intermédiaire B. La reconnaissance d'une relation entre K et Cr, combinée à une analyse minéralogique, a mis en évidence le fait que l'un des principaux porteurs de Cr est la biotite.

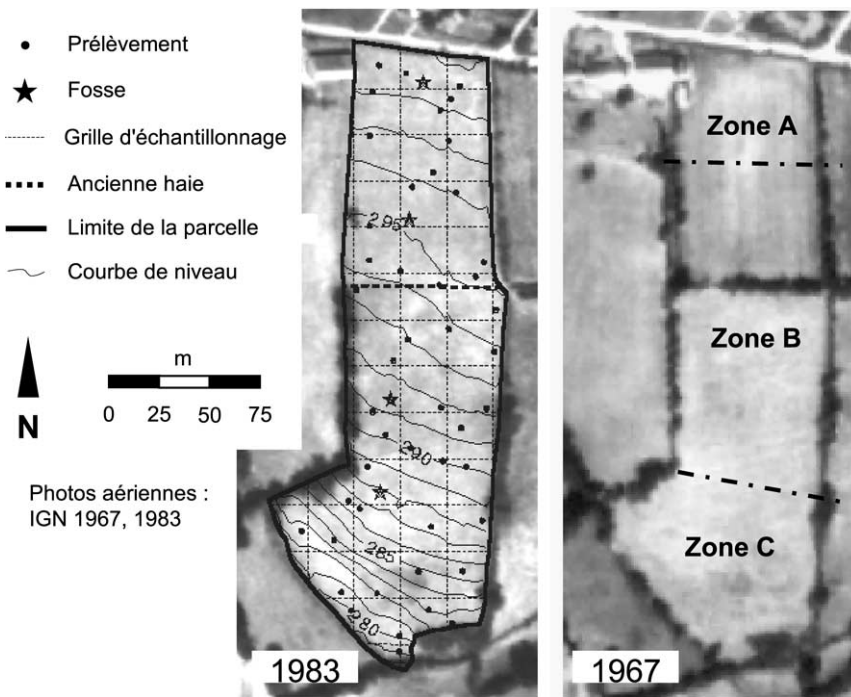


Figure 1. Limites parcellaires, topographie et échantillonnage.

Figure 1. Parcel limits, topography and sampling strategy.

Par ailleurs, l'étude de l'évolution des teneurs en Cr au sein de chacune des fosses a permis d'évaluer l'impact des autres facteurs de la pédogenèse. Les fortes pentes observées le long de la toposéquence sont à l'origine d'un décapage en amont et d'un apport en aval de minéraux non altérés dans les horizons pédologiques. Ainsi, les remaniements semblent être un facteur important de la distribution spatiale des teneurs en Cr et être à l'origine d'un découplage partiel entre le sol et la roche sous-jacente. Compte tenu de la forte variabilité des matériaux d'origine, il est difficile de confirmer cette dernière hypothèse à partir du seul examen de quatre fosses.

2.2. Méthodes d'étude

L'échantillonnage a été réalisé de façon systématique au sein d'une grille dont la résolution est 25 m × 25 m (*figure 1*), avec un prélèvement aléatoire au sein de chaque maille. Ainsi, 47 prélèvements ont été effectués en surface (0–0,20 m) et l'altérite a été observée jusqu'à une profondeur maximum de 1,20 m (ou moins en cas d'arrêt sur un obstacle). Trois types d'altérite ont été notés selon des critères simples déduits de l'observation des fosses : couleur verte pour les amphibolites, présence de micas pour les gneiss et altérites complexes lorsque les deux indicateurs sont observés simultanément.

Les prélèvements de sol ont été séchés à 40 °C, puis tamisés à 2 mm. Fe, Ca, Mg, K, et Cr ont été dosés par spectroscopie d'émission atomique (ICP–AES), après mise en solution par attaque acide (acides fluorhydrique, perchlorique et chlorhydrique) de la

fraction inférieure à 2 mm. La fraction supérieure à 2 mm, peu abondante, a été éliminée. Les éléments majeurs retenus pour cette étude sont utilisés comme indicateurs de l'abondance des minéraux rencontrés (hornblende et biotite notamment [24]).

La cartographie de la teneur en Cr a été réalisée par krigeage, après ajustement du semi-variogramme. La nature du substrat a été simplement reportée point à point sur une carte. Par ailleurs, un modèle numérique d'altitude (MNA) a été établi à partir d'une topographie fine du terrain, réalisée à l'aide d'un tachéomètre laser. Courbes de niveaux et pentes ont été dérivées de ce MNA (*figure 1*). Le parcellaire a été reporté sur ces cartes, y compris une ancienne haie, perpendiculaire à la pente au niveau de la zone B, présente au moins depuis le milieu du XIX^e siècle d'après les relevés cadastraux de 1842 [8] et encore présente sur une photographie aérienne de 1967. D'après l'exploitant, cette haie a été arrachée en 1975.

3. Résultats et discussion

3.1. Cartographie de la teneur en chrome en surface

Le semi-variogramme de la teneur en Cr (*figure 2*) ne présente pas d'effet de pépite. Cela signifie que :

- la densité d'échantillonnage est suffisante ;
- la forte hétérogénéité des teneurs en Cr, observée en fond de fosse [24] du fait d'une extrême variabilité des faciès d'altérite, n'existe pas en surface.

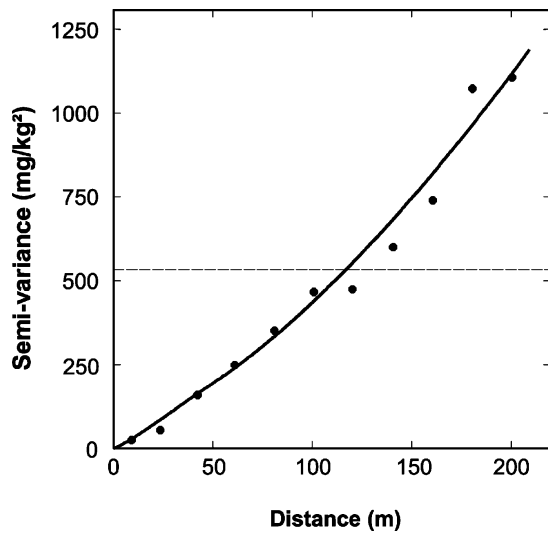


Figure 2. Semi-variogramme expérimental et modélisé de la teneur en Cr.

Figure 2. Semivariogram of Cr contents fitted to the experimental data.

Par ailleurs, le semi-variogramme ne présente pas non plus de palier, ce qui est dû à la présence d'une tendance générale entre deux pôles de teneurs faibles et fortes en Cr. Le semi-variogramme expérimental est modélisé par une structure gigogne (modèle sphérique + modèle puissance). La carte des teneurs en Cr (figure 3) est obtenue par krigeage ordinaire. On observe effectivement sur celle-ci la présence d'un gradient régulier le long du versant, avec, cependant, des variations dans la zone B. Ces variations sont toutefois insuffisantes pour perturber la structure spatiale générale orientée est-ouest, parallèle à la structure géologique observée.

3.2. Influence du substrat sur la distribution spatiale de Cr

La figure 3 montre le lien existant entre la structure spatiale des teneurs en Cr et la nature du substrat. La zone A, sur amphibolites, présente des teneurs faibles (35–70 mg·kg⁻¹), alors que la zone C, sur gneiss, présente des teneurs intermédiaires à élevées (70 à 110 mg·kg⁻¹). Les teneurs les plus élevées (> 110 mg·kg⁻¹) sont observées au sein de la zone B, lorsque sont observées conjointement l'amphibolite et le gneiss. La forme allongée des teneurs en Cr supérieures à 110 mg·kg⁻¹ au sein de cette zone pourrait confirmer l'hypothèse de la présence de filons, suspectée lors de l'observation de la fosse correspondant à cette zone. D'une manière générale, la zone B présente des teneurs très variables en Cr, comprises entre 50 et 130 mg·kg⁻¹.

L'analyse des corrélations entre les différents éléments étudiés confirme l'opposition forte entre K

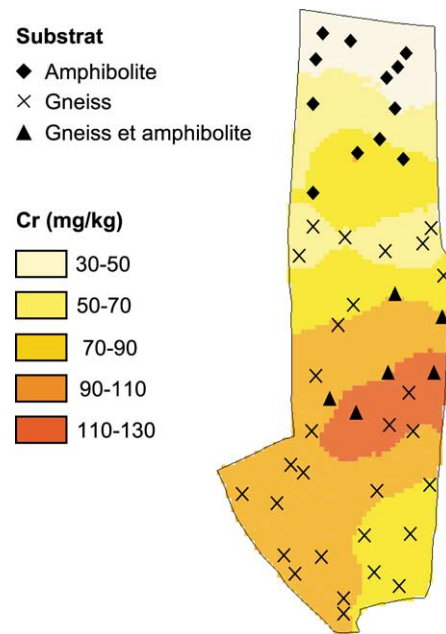


Figure 3. Cartographie de la teneur en Cr avec superposition des types de substrat observé.

Figure 3. Cr content map and observed parent material.

Tableau I. Matrice des corrélations ($n = 47$, * : significatif au seuil de 1%).

Table I. Correlation matrix ($n = 47$, *: significant at 1 % level).

	Ca	Mg	K	Fe	Cr
Ca	1,00				
Mg	0,63*	1,00			
K	-0,95*	-0,47*	1,00		
Fe	0,85*	0,61*	-0,86*	1,00	
Cr	-0,64*	0,08	0,73*	-0,47*	1,00

et Ca (tableau I), opposition déjà observée lors de l'étude précédente [24]. Ces deux éléments peuvent donc être considérés comme de bons indicateurs des matériaux à l'origine des horizons de surface. La relation entre Cr et K est hautement significative ($r = 0,73$, significatif au seuil de 1 %), confirmant également les résultats obtenus lors des travaux sur fosses. Toutefois, une part importante de la variance reste inexpliquée, avec en plus une très forte structuration des résidus. La projection du type de substrat observé sur le diagramme K–Cr (figure 4) met en évidence la présence de deux pôles, correspondant aux zones A et C, sur amphibolite et sur gneiss respectivement. La zone B chevauche ces deux pôles et apparaît donc comme une association complexe de matériaux d'origines différentes et présente une très forte variabilité des teneurs en Cr. C'est donc au sein de cette zone que l'on cherche l'influence de facteurs autres que la nature du substrat.

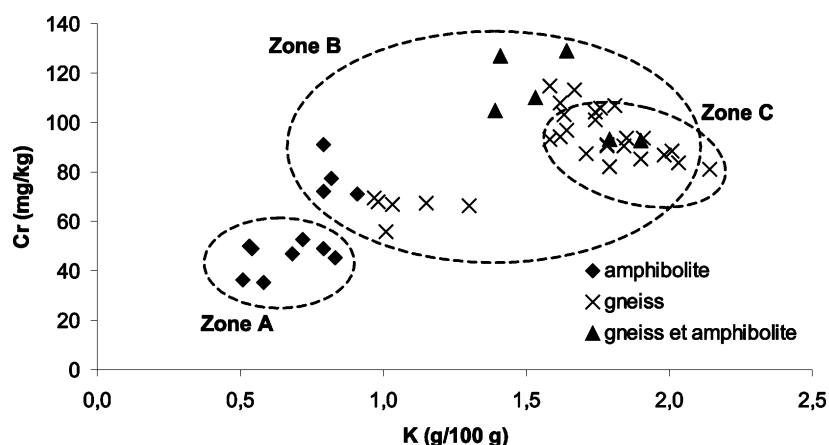


Figure 4. Relation K–Cr et nature du substrat.

Figure 4. K–Cr plot and parent material type.

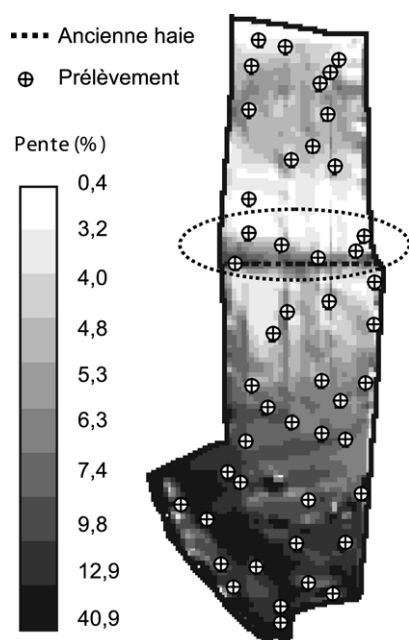


Figure 5. Pentés observées sur la parcelle d'étude et recouvrement du gneiss en amont de l'ancienne haie.

Figure 5. Slopes within the study plot and soil material deposition onto gneiss horizons above the former hedge.

3.3. Redistribution des matériaux

Au sein de la zone intermédiaire B, on observe des teneurs faibles en K et en Cr, malgré un substrat de gneiss (points à la base de l'ellipse B de la figure 4). Ces points sont tous situés à l'amont de l'ancienne haie, dans une zone de replat visible sur la carte des pentes (figure 5, en pointillés). On en déduit que les matériaux d'érosion issus de la zone amphibolite amont sont venus s'accumuler le long de cette ancienne haie et ont recouvert, au moins en partie, le substrat gneissique. Le rôle direct du labour dans la redistribution de matière au sein des

Tableau II. Corrélation Cr–élément majeur pour les échantillons de sols issus (A) d'amphibolite et (G/G + A) de gneiss et gneiss + amphibolite (* : significatif au seuil de 1 %).

Table II. Correlation between Cr and major elements for samples developed into amphibolite (A) or gneiss and gneiss + amphibolite (G/G + A) (*: significant at 1 % level).

	<i>n</i>	Ca	Mg	K	Fe
A	12	0,43	0,83*	0,64	−0,53
G/G + A	29	0,89*	0,85*	−0,70*	0,86*

parcelles est sans doute très important, comme cela a été récemment montré [17].

Par ailleurs, les teneurs les plus élevées en Cr semblent correspondre à des zones où amphibolite et gneiss sont observés en association (points au sommet de l'ellipse de la figure 4). Ces fortes teneurs en Cr sont légèrement décalées vers l'aval des dits substrats (figure 3). Ce décalage spatial est interprété comme la descente de cette zone vers l'aval par gravité, phénomène déjà observé dans d'autres contextes d'étude [5]. Des observations plus détaillées de profondeur seraient cependant nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

3.4. Recherche des minéraux porteurs dans les différentes zones

3.4.1. Zone de sols développés sur amphibolite

La teneur en Cr, bien que faible dans la zone amphibolite, présente une corrélation significative avec la teneur en Mg et dans une moindre mesure avec la teneur en K (tableau II). L'étude des sables des horizons de surface de cette zone montre que les teneurs les plus élevées en K seraient liées à la présence d'orthose et de séricite, du fait de la présence ponctuelle de lentilles de leptynite au sein des amphibolites en position amont de la zone B. L'orthose n'étant pas un minéral porteur de Cr [23, 24], la séricite pourrait être à l'ori-

gine de l'élévation modérée des teneurs en Cr au sein de cette zone amphibolite.

3.4.2. Zone de sols développés sur gneiss et sur un mélange complexe de gneiss et d'amphibolite

Les teneurs en Cr sont corrélées négativement avec les teneurs en K, alors qu'elles sont corrélées positivement avec les teneurs en Ca, Mg et Fe (*tableau II*). Or, l'amphibole de la zone étudiée est de type hornblende [15], riche à la fois en Ca, Mg, et Fe [18]. L'observation macroscopique d'amphibolite en mélange avec les gneiss sur certains échantillons implique que les teneurs en Ca, Mg et Fe plus élevées sont liées à la présence ponctuelle d'amphibole au sein des gneiss. Une analyse chimique de gneiss à amphibole de cette zone indique de très fortes teneurs en Cr (248 mg·kg⁻¹). Par ailleurs, des phénomènes de minéralisation sont suspectés (les teneurs en Zn, As et P de la roche sont élevées). Il semble donc que, dans cette zone, le Cr soit porté par au moins deux minéraux : la biotite, mise en évidence lors de l'étude précédente [24], et également l'amphibole, comme cela a déjà été montré par ailleurs sur le versant [10]. Le chrome est en effet un élément classiquement contenu dans les amphiboles [18, 23].

4. Conclusion

L'étude de la variabilité des teneurs en Cr dans les horizons de surface d'un versant sur roches métamorphiques montre l'influence déterminante de la nature du substrat. Ce facteur est dominant dans cette région, car les fortes pentes permettent un rajeunissement régulier du sol. Toutefois, malgré un substrat et des teneurs en éléments traces très hétérogènes,

les sols développés sur roches métamorphiques en contexte vallonné ne présentent pas cette hétérogénéité de surface. Cette homogénéisation de surface est interprétée comme le reflet de redistributions par les flux de versant, liées aux fortes pentes. Cette érosion est accentuée par le labour. D'autre part, la présence d'aménagements créés par l'homme, tels que les haies, est à l'origine de la formation de banquettes agricoles et ont, elles aussi, un impact sur la redistribution du Cr le long du versant. Ce dernier phénomène, non observé lors de l'étude précédente [24], n'a pu être mis en évidence que grâce à une analyse spatiale des teneurs en Cr dans les horizons de surface. Ainsi, si les facteurs géologiques semblent jouer un rôle décisif sur la teneur en Cr des horizons de surface des sols considérés, la « distribution spatiale d'origine géologique » est largement modifiée par l'érosion et les facteurs anthropiques liés à l'occupation des sols (labour, haies...).

L'analyse spatiale permet également une évaluation quantitative de la variabilité des teneurs en Cr dans l'horizon de surface. La comparaison des structures spatiales observées entre les teneurs en Cr et les différents facteurs en cause confirme des hypothèses établies à partir de l'étude locale des fosses. De nouvelles pistes sont prospectées, notamment avec un ré-examen des minéraux porteurs de Cr, selon la stratification cartographique mise en évidence.

La spatialisation apparaît ici comme un outil d'analyse contribuant à la connaissance des processus en cause. Une recherche des poids respectifs des différents facteurs (géologie, érosion, effet anthropique) est toutefois difficile à estimer, du fait de la coïncidence spatiale entre ceux-ci. Cette coïncidence n'est peut-être pas fortuite, car ces facteurs ont certainement agi (ou interagi) entre eux au cours du passé.

Références

- [1] Afes, in: Baize D., Girard M.-C. (Eds.), *Référentiel pédologique 1995*, Inra Éditions, Paris, 1995.
- [2] Arrouays D., Martin S., Lepretre A., Bourennane H., Short-range spatial variability of metal contents in soil on a one hectare agricultural plot, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31 (3–4) (2000) 387–400.
- [3] Atteia O., Dubois J.-P., Webster R., Geostatistical analysis of soil contamination in the Swiss Jura, *Environ. Pollut.* 86 (1994) 315–327.
- [4] Baize D., *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*, Inra Éditions, Paris, 1997.
- [5] Barbier J., La répartition naturelle des métaux dans les sols. Les gradients de teneurs, *Les Techniques de l'Industrie Minérale* 3 (1999) 19–23.
- [6] Becquer T., Bourdon E., Pétard J., Disponibilité du nickel le long d'une toposéquence de sols développés sur roches ultramafiques

de Nouvelle-Calédonie, C. R. Acad. Sci. Paris, série Ila 321 (1995) 585–592.

- [7] Bédard P., Postglacial and pre-Last-Glacial weathering of till on the high plateaus of central Gaspésie, Quebec, Canada, *Can. J. Earth Sci.* 30 (1993) 1853–1860.

- [8] Préfecture de l'Indre, Cadastre de la commune de Chassignolles au 1/2 000^e, 1842.

- [9] Cohen-Julien M., Quenardel J.-M., Lerouge G., Lorenz J., Macaire J.-J., Freydet P., Maget P., Debrand-Passard S., Notice explicative, in: *Carte géol. France (1:50 000)*, feuille Argenton-sur-Creuse (593), *Carte géologique*, par J.M. Quenardel et al., BRGM, Orléans, 1998, 168 p.

- [10] Cornu S., Hardy M., Clozel B., Crouzet C., Advantages of a method combining physical fractionation and sequential extraction for trace element speciation in non polluted soils, in: 6^e congrès ICOBTE, Guelph (Canada), 28 juillet–2 août 2001.

- [11] Curlík J., Šefčík P., *Geochemical atlas of the Slovak Republic. Part V: Soils*, Ministry of the Environment of the Slovak Republic, 1999.

- [12] De Simone C., Lorenzoni P., Spadoni M., Raspa G., Hoxha I., Use of geostatistics for characterization of heavy metals distribution in calcareous soil of Central Italy, in: 16^e Congrès mondial de science du sol, Montpellier, 20–26 août 1998.
- [13] Esser K.B., Bockheim J.G., Helmke P.A., Trace element distribution in soils formed in the Indiana dunes, USA, *Soil Sci.* 152 (5) (1991) 340–350.
- [14] FAO–Unesco–Isric, Carte mondiale des sols, légende révisée, 1989.
- [15] Fraise C., Lorenz C., Lorenz J., Prost A., Carte géol. France (1/50 000), feuille La Châtre (594), BRGM, Orléans, 1986, Notice explicative par C. Fraise et al. (1987).
- [16] Gasser U.G., Juchler S.J., Hobson W.A., Sticher H., The fate of chromium and nickel in subalpine soils derived from serpentinite, *Can. J. Soil Sci.* 75 (1995) 187–195.
- [17] Govers G., Lobb D.A., Quine T.A., Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research, *Soil Till. Res.* 51 (1999) 167–174.
- [18] Leake B.E., Wooley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kish H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Shumacher J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G., Nomenclature of amphiboles. Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on new minerals and mineral names, *Eur. J. Mineral.* 9 (1997) 623–651.
- [19] Mc Bratney A.B., Webster R., Mc Laren R.G., Spiers R.B., Regional variation of extractable copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland, *Agronomie* 2 (10) (1982) 969–982.
- [20] McGrath S.P., Loveland P.J., The soil geochemical atlas of England and Wales, Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1992.
- [21] Middelburg, J.J., Van Der Weijden C.H., Woittiez J.R.W., Chemical processes affecting the mobility of major, minor, and trace elements during weathering of granitic rocks, *Chem. Geol.* 68 (1988) 253–273.
- [22] Poupet P., Contribution à la connaissance du comportement des métaux dans les sols (cas des sols développés sur les amphibolites du massif de Blanchefort, Corrèze), thèse, université d'Orléans, 1976.
- [23] Ruppert H., Schmidt F., Natürliche grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns, GLA-Fachberichte, Bayer. Geol. Landesamt, München, 1987.
- [24] Salvador-Blanes S., Cornu S., Hardy M., Gay-Ovejero I., Deschatrettes V., Baize D., King D., Influence des substrats et des formations de versant sur la variabilité spatiale des teneurs naturelles en chrome de sols issus de roches métamorphiques, *C. R. Acad. Sci. Paris, série IIA* 332 (2001) 681–687.
- [25] Vieira R.S., Taboada T., Paz A., An assessment of heavy metal variability in a one hectare plot under natural vegetation in a serpentine area, in: 16^e Congrès mondial de science du sol, Montpellier, 20–26 août 1998.
- [26] Webster R., Atteia O., Dubois J.-P., Coregionalisation of trace metals in the soil in the Swiss Jura, *Eur. J. Soil Sci.* 45 (1994) 205–218.
- [27] White J.G., Welch R.M., Norvell W.A., Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographical information systems, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 (1997) 185–194.
- [28] Wopereis M.-C., Gascuel-Oudou C., Bourrié G., Soignet G., Spatial variability of heavy metals in soil in a one-hectare scale, *Soil Sci.* 146 (2) (1988) 113–118.