



HAL
open science

Approche géochimique des bilans de particules fines dans un profil à sol rougeâtre du massif des Maures : la coupe du barrage de Lambert

Claude Martin

► **To cite this version:**

Claude Martin. Approche géochimique des bilans de particules fines dans un profil à sol rougeâtre du massif des Maures : la coupe du barrage de Lambert. *Etudes de Géographie Physique*, 1993, XXII, pp.31-41. hal-00415752

HAL Id: hal-00415752

<https://hal.science/hal-00415752>

Submitted on 10 Sep 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPROCHE GÉOCHIMIQUE DES BILANS DE PARTICULES FINES DANS UN PROFIL A SOL ROUGEÂTRE DU MASSIF DES MAURES : LA COUPE DU BARRAGE DE LAMBERT

par C. MARTIN *

RÉSUMÉ : Le profil étudié présente à sa base un paléosol rougeâtre tronqué (sol ferrugineux désaturé sur gneiss). Le paléosol est enterré sous un colluvium grossier qui correspond aux horizons humifères. La partie supérieure du paléosol est lessivée. La quantification des transferts de particules dans le paléosol repose sur une étude géochimique isoquartz. Les particules fines d'illuviation représentent 10,9 à 15,7 % des matériaux minéraux en Bt₁ et 10,9 à 13,1 % en Bt₂. Dans l'horizon A₂, les particules lessivées provenant de l'altération *in situ* représentent 8,1 % (méthode fer total) ou 16,6 % (méthode alumine) du sol initial avant lessivage.

MOTS CLÉS : Paléosol, sol ferrugineux désaturé, bilan géochimique isoquartz, lessivage, gneiss, massif des Maures.

ABSTRACT : The lower part of the studied profile is constituted by a truncated reddish paleosol (ferruginous desaturated soil on gneiss). It's covered by a stony colluvium corresponding to the humus layers. The upper part of the paleosol is leached. The particles displacements in the profile are showed off by a geochemical isoquartz study. The fine illuvial particles are estimated at 10,9 to 15,7 % of the mineral matter in Bt₁ and 10,9 to 13,1 % in Bt₂. The leached particles resulting of the weathering in the A₂ layer represent 8,1 % (total iron method) to 16,6 % (alumina method) of the soil mineral matter before leaching.

KEY WORDS : Paleosol, ferruginous desaturated soil, isoquartz geochemical budget, leaching, gneiss, massif des Maures.

I - INTRODUCTION

Quatre types de formations superficielles sont développés sur les versants en roches métamorphiques de la partie occidentale du massif des Maures :

- des sols rougeâtres en place,
- des formations rubéfiées déplacées,
- des arènes non rubéfiées en place,
- et des sols apparentés aux rankers.

Les rankers sur roches présentent la plus grande extension, devant les formations rubéfiées déplacées. Les arènes non rubéfiées se réduisent à quelques poches très localisées. Les sols rougeâtres sont plus fréquents. La position de certains profils au fond de vallées très encaissées permet de rapporter au Quaternaire les dernières phases de rubéfaction. Mais l'altération des roches a pu être localement plus ancienne. Les formations rubéfiées déplacées remanient les sols rougeâtres. Elles sont conservées à la faveur de conditions topographiques favorables.

Les paléosols rougeâtres apparaissent toujours à l'état de lambeaux recouverts par des formations remaniées caillouteuses. Les horizons supérieurs ont été partout érodés. Les horizons B sont généralement eux-mêmes discontinus. Les paléosols rougeâtres présentent leur développement maximal sur les niveaux d'érosion fini-miocènes conservés au coeur du massif, sur gneiss, micaschistes et leptynites. Mais, même dans les conditions topographiques les plus favorables à leur préservation, ils ne subsistent le plus souvent qu'à l'état de poches. La présence d'horizons argilliques faiblement rubéfiés où les argillanes sont visibles à l'oeil nu,

l'abondance des kaolinites et la valeur modeste du taux de saturation du complexe adsorbant autorisent à les classer parmi les sols fersiallitiques acides ou les sols ferrugineux désaturés (oligotrophes) de la classification française (C. MARTIN, 1986). Ils s'apparentent à bien des sols sur granites et roches métamorphiques de la zone intertropicale, mais aussi de Kabylie (M.J. PENVEN, 1988), ainsi que de la région de Madrid (J. VAUDOUR, 1977) ou de Galice (F. MACIAS et R. CALVO DE ANTA, 1992).

Sur le plan géochimique, les racines de sols rougeâtres en place témoignent d'une altération de type monosiallitique (Y. CHEVALIER, 1984 ; C. MARTIN, 1986 - pour la définition des types géochimiques de l'altération, voir Y. TARDY, 1969). Dans la fraction < 2 μm des horizons Bt sur gneiss, micaschistes et leptynites, on trouve essentiellement, à côté de la kaolinite, des illites et des vermiculites plus ou moins hydroxyalumineuses. La gibbsite est souvent présente, mais en quantité très faible. Sur gneiss, à une altitude proche de celle de la topographie fini-tertiaire, les roches altérées sont surtout marquées par une évolution monosiallitique. Les rankers montrent, au contraire, une évolution nettement bisiallitique. Enfin, les poches d'arènes non rubéfiées en place résultent d'une altération monosiallitique depuis les roches saines, et bisiallitique depuis les roches altérées (C. MARTIN, 1986, 1989). L'altération a donc évolué de la monosiallisation à la bisiallisation.

La coupe qui sert de base à cette étude présente un sol polycyclique dont la partie profonde correspond à un paléosol tronqué et faiblement enterré sous un colluvium grossier. Sa description a pour objectifs de rappeler les principaux caractères des sols rougeâtres du massif des Maures et de préciser certaines relations entre les paléosols et la pédogenèse récente, notamment sur le plan des transferts de particules. L'évolution actuelle se produit sous un climat méditerranéen humide. Les précipitations annuelles moyennes avoisinent 1100 mm et la température moyenne, 13 °C.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

La coupe étudiée se trouve immédiatement en aval du niveau d'érosion fini-tertiaire du Val Lambert, en rive droite du ruisseau de La Verne (X = 926,25 ; Y = 3110,8 (quadrillage kilométrique Lambert zone III) ; Z = 455 m - Fig. 1). Contrairement aux autres coupes étudiées dans le massif des Maures, elle permet l'observation de roches relativement saines, des gneiss de Bormes, pouvant être assimilés aux roches mères des sols. Mais son intérêt est encore accru par les traces d'appauvrissement en particules fines que présentent localement les horizons argilliques au contact des matériaux superficiels.

Les analyses portent sur les roches et le paléosol. Elles concernent :

- Les caractères physiques des matériaux meubles : séparation de la terre fine, granulométrie (tamisage à sec après destruction de la matière organique par H_2O_2) et microgranulométrie (analyse à la pipette après dispersion sur un appareil rotatif pendant 12 h en présence d'ammoniaque).

- Les caractères agronomiques : pH-eau et pH-KCl N, carbone organique (méthode ANNE), azote total (méthode KJELDAHL), cations basiques échangeables extraits par l'acétate d'ammonium, capacité d'échange de bases (méthode METSON), aluminium échangeable extrait par KCl N.

- La composition minéralogique de la fraction < 2 μm : déterminations qualitatives et interprétations semi-quantitatives à partir de diffractogrammes de rayons X, en appliquant aux échantillons les tests de comportement classiques (saturation par Mg^{2+} , chauffage à 400-550 °C, glycolage et saturation à l'hydrazine).

- La composition chimique totale. Sur les échantillons tout-venant, les éléments majeurs ont été dosés par gravimétrie, colorimétrie, photométrie de flamme et absorption atomique, après dissolution en milieu alcalin (borax) et en milieu acide contenant de l'acide fluorhydrique. Pour la fraction < 2 μm , la silice et l'alumine ont été dosées par fluorescence X après fusion et préparation de perles, les autres éléments par absorption atomique sur le produit d'une attaque à l'acide fluorhydrique. L'eau d'imbibition a été déterminée par séchage à 105 °C et la perte au feu par passage au four à 1000 ou 1100 °C. Le fer libre correspond à la méthode DEB.

L'interprétation des analyses chimiques totales nécessite de se référer à un élément stable. Le quartz

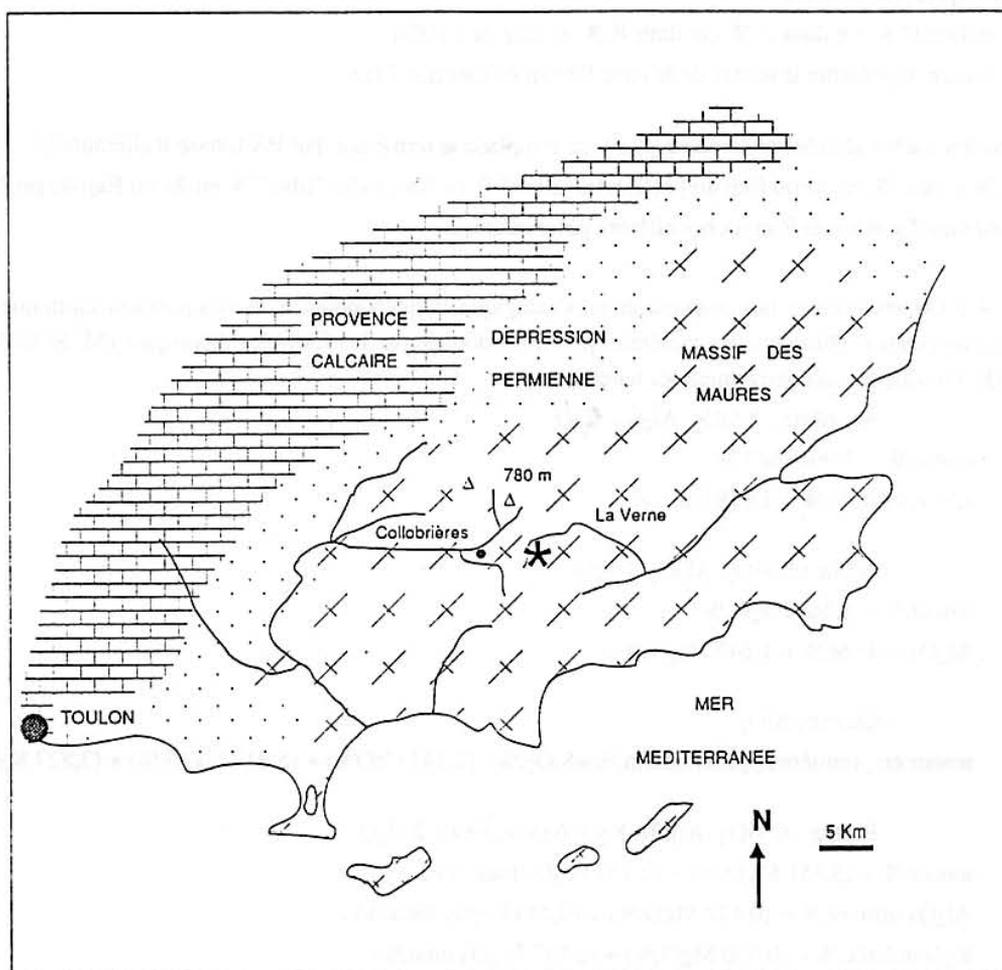


Figure 1 - Localisation de la coupe (*).

offre, à cet égard, les meilleures garanties dès que les formations superficielles sont trop évoluées pour que l'on puisse avoir recours au raisonnement isovolumétrique.

Plusieurs méthodes analytiques, chimiques ou physiques, peuvent servir à déterminer la teneur en quartz (J. DEJOU *et al.*, 1977). Toutefois, la plupart des auteurs estiment cette teneur à partir de la composition chimique totale, en reconstituant la composition minéralogique globale selon les méthodes pétrochimiques classiques. Dans le cas des formations superficielles, la présence d'une phase d'altération accroît considérablement les difficultés.

La teneur pondérale en quartz des formations superficielles du massif des Maures est calculée de la manière suivante (C. MARTIN, 1986) :

1 / Pour l'échantillon total, on ramène la somme des éléments à 100 % après lui avoir retiré l'eau d'imbibition, la matière organique et les cations basiques échangeables. On a ainsi la composition chimique A.

2 / Pour la fraction < 2 μm , on ramène la somme des éléments à 100 % après lui avoir retiré l'eau d'imbibition. On obtient ainsi la composition chimique B. Pour les échantillons de roches altérées encore cohérentes, la composition chimique B est empruntée aux formations meubles sus-jacentes.

3 / On enlève à la composition chimique A, la part revenant aux minéraux argileux. On obtient ainsi la composition chimique C. De fait, pour connaître la part de la teneur en un élément (e) due à la phase peu altérée,

on effectue l'opération suivante :

$$e \text{ dans } C, \% = e \text{ dans } A, \% - [e \text{ dans } B, \% \times (\text{arg.}, \% / 100)]$$

où arg. représente la teneur de la terre fine en éléments < 2 μm .

Dans le cas des roches altérées cohérentes (Rac), on remplace le terme arg. par PA (phase d'altération) :

$$PA, \% = [\text{arg. } \% \text{ en Ar ou Rap du profil} \times \text{fer "libre" } \% \text{ en Rac}] / (\text{fer "libre" } \% \text{ en Ar ou Rap du profil})$$

où Ar signifie arène et Rap roches altérées pulvérulentes.

4 / On reconstitue la composition minéralogique correspondant à la composition chimique C, en utilisant la composition chimique des minéraux primaires donnée par les formules théoriques (M. ROUBAULT *et al.*, 1963). On calcule successivement les teneurs en :

- Anorthite ; $2 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ CaO}$.

$$\text{. teneur, \%} = 4,961 \text{ CaO, \%} .$$

$$\text{. Al}_2\text{O}_3 \text{ utilisée, \%} = 1,818 \text{ CaO, \%} .$$

- Albite ; $6 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ Na}_2\text{O}$.

$$\text{. teneur, \%} = 8,463 \text{ Na}_2\text{O, \%} .$$

$$\text{. Al}_2\text{O}_3 \text{ utilisée, \%} = 1,645 \text{ Na}_2\text{O, \%} .$$

- Quartz ; SiO_2 .

$$\text{. teneur en première approximation, \%} = \text{SiO}_2, \% - [2,143 \text{ CaO}(\%) + (5,817 \text{ Na}_2\text{O}(\%)) + (3,827 \text{ K}_2\text{O}(\%))$$

- Biotite ; $6 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ K}_2\text{O} \text{ 6 (Mg, Fe)O} \text{ 2 H}_2\text{O}$.

$$\text{. teneur, \%} = (3,451 \text{ MgO}(\%)) + (2,137 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ total}(\%)) .$$

$$\text{. Al}_2\text{O}_3 \text{ utilisée, \%} = (0,422 \text{ MgO}(\%)) + (0,213 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ total}(\%)) .$$

$$\text{. K}_2\text{O} \text{ utilisée, \%} = (0,390 \text{ MgO}(\%)) + (0,197 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ total}(\%)) .$$

- Muscovite ; $6 \text{ SiO}_2 \text{ 3 Al}_2\text{O}_3 \text{ K}_2\text{O} \text{ 2 H}_2\text{O}$

$$\text{. teneur, \%} = [(\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ restant}(\%) - \text{K}_2\text{O} \text{ restant}(\%)) / 2] \times 3,983 .$$

Cette équation préconisée par J. LAMEYRE (1966) est notamment utilisée par F. SEDDOH (1973).

Lorsque K_2O restant est insuffisant pour que l'on puisse procéder de la sorte, on utilise l'équation suivante :

$$\text{. teneur, \%} = (\text{K}_2\text{O} \text{ restant}(\%)) / 0,0982 .$$

Par ailleurs, on a évidemment :

$$\text{. Al}_2\text{O}_3 \text{ utilisée, \%} = 0,384 \text{ (teneur en muscovite, \%)} .$$

$$\text{. K}_2\text{O} \text{ utilisée, \%} = 0,0982 \text{ (teneur en muscovite, \%)} .$$

- Feldspaths potassiques ; $6 \text{ SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ K}_2\text{O}$.

$$\text{. teneur, \%} = 5,910 \text{ (K}_2\text{O} \text{ restant}(\%)) .$$

$$\text{. Al}_2\text{O}_3 \text{ utilisée, \%} = 0,183 \text{ (teneur en feldspaths potassiques, \%)} .$$

- Quartz, valeur corrigée .

$$\text{. teneur définitive, \%} = [\text{teneur en première approximation, \%} - (1,179 \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ restant}(\%))] .$$

Le coefficient 1,179 est fixé de manière approximative. Il correspond à un rapport moléculaire $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ égal à 2.

La fraction < 2 μm étant toujours très pauvre en quartz, la teneur calculée représente en fait celle de l'échantillon total de composition chimique A. Afin de juger des mérites éventuels de la méthode adoptée, nous avons comparé, pour 11 échantillons témoins du massif des Maures, les teneurs en quartz calculées avec celles

mesurées, par le Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg. Les mesures ont été effectuées suivant la méthode de F. WEBER et Ph. LARQUE (1973) fondée sur la diffraction des rayons X. Les deux approches fournissent à la fois des moyennes et des médianes très proches (moyennes : 30,2 % par calcul et 27,4 % par mesure ; médianes : respectivement 29,0 et 25 %). Les valeurs calculées surpassent généralement les valeurs mesurées, surtout lorsque les matériaux sont très évolués. Mais cette différence correspond à ce que l'on sait des limites de la méthode diffractométrique qui dose par défaut les particules de petites tailles (Y. TARDY, 1969).

III - LES OBSERVATIONS

La coupe se trouve dans un secteur où les racines des paléosols rougeâtres sont assez largement conservées. Elle présente les caractères suivants :

- . Situation topographique : Bas de versant ; exposition N-NE ; pente de 20 %.
- . Roches mères : Gneiss de Bormes à phénocristaux de feldspath potassique. Très fort pendage vers le NW.
- . Végétation : Maquis haut associé à des chênes-liège, de jeunes pins et quelques châtaigniers.

. Morphologie du profil P (Fig. 2) :

- A₁₁ :

Epaisseur : 2 cm (0-2 cm).

Horizon brun-gris foncé, riche en matière organique.

Texture sableuse. Structure particulière à grumeleuse.

Chevelu radiculaire abondant.

- A₁₂ :

Epaisseur : 28 cm (2-30 cm).

Horizon humifère, brun.

Texture sableuse. Structure particulière à submoteuse. Nombreux cailloux.

Racines et radicelles abondantes.

Transition brutale avec l'horizon sous-jacent.

- II-A₂ :

Epaisseur : 20 cm (30-50 cm).

Couleur : jaune pâle (2,5 Y 7/3 du code MUNSELL), à sec.

Texture sableuse (S sur le triangle INRA).

Structure polyédrique. Peu d'éléments supérieurs à 2 mm (fragments de feldspaths potassiques). Cet horizon, parcouru par un filonnet de quartz, est manifestement en place.

Enracinement très faible.

Transition assez brutale avec l'horizon sous-jacent.

- II-Bt₁ :

Epaisseur : 30 cm (50-80 cm).

Couleur : rouge jaune (5 YR 5/8), à sec.

Texture fine (1A sur le triangle INRA).

Structure polyédrique à tendance massive. Argillanes visibles à l'oeil nu. Peu d'éléments grossiers.

Enracinement très faible.

Transition diffuse avec l'horizon sous-jacent.

- II-Bt₂ :

Epaisseur : la limite inférieure de l'horizon n'est pas visible à la base du profil.

Couleur : jaune brun (10 YR 6/6), à sec.

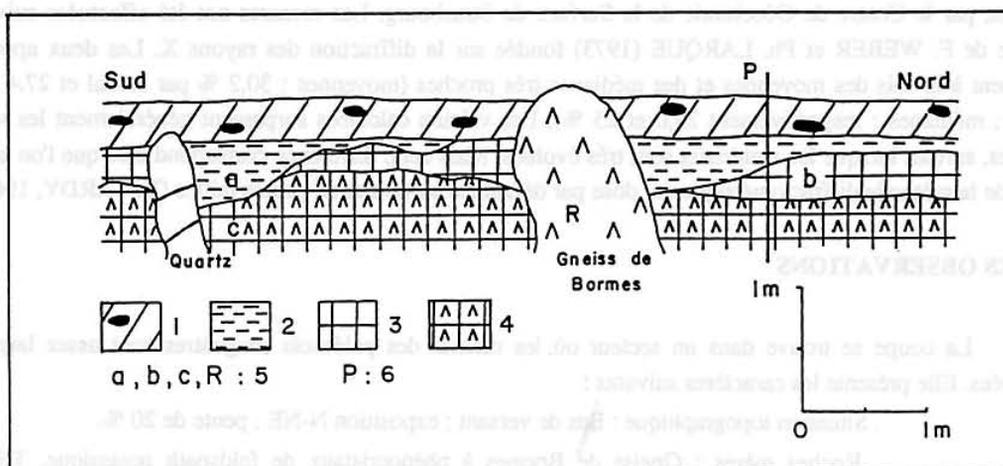


Figure 2 - Présentation de la coupe.

1 : horizon humifère caillouteux (I-A). 2 : horizon lessivé et dérubéfié (II-A₂). 3 : horizon argileux rubéfié (II-Bt₁). 4 : horizon argileux rubéfié avec architecture originelle des gneiss conservée (II-Bt₂). 5 : points de prélèvement. 6 : profil décrit dans le texte.

Texture fine (IA sur le triangle INRA).

Structure polyédrique à tendance massive. Architecture originelle conservée. Les fissures sont envahies de dépôts argileux rougeâtres. Peu d'éléments grossiers.

Enracinement extrêmement faible.

Les données analytiques sont portées dans les tableaux 1 à 5. La localisation des points de prélèvement est indiquée sur la figure 2.

Tableau I - Analyses mécaniques.

Ech.	Frac.	> 2 mm	Terre fine	Analyse de la terre fine					
				A.	Lf	Lg	Sf	Sm	Sg
1, A ₂		17,8	82,2	9,6	19,2	5,2	21,7	14,8	29,4
2, Bt ₁		0,4	99,6	27,3	29,6	5,2	15,5	7,9	14,5
3, Bt ₂		12,5	87,5	21,7	21,7	6,9	15,1	11,1	23,6

Résultats en % du poids de la terre séchée à l'air.
 Ech. : échantillons. Frac. : fractions dosées. > 2 mm : refus à 2 mm. Terre fine: < 2 mm. A. : argile (< 2 μm).
 Lf. : limons fins (2 à 20 μm). Lg. : limons grossiers (20 à 50 μm). Sf. : sables fins (0,05 à 0,2 mm). Sm. : sables moyens (0,2 à 0,5 mm). Sg. : sables grossiers (0,5 à 2 mm).
 Analyses par l'URA 141 du CNRS.

Tableau II - Analyses à caractère agronomique sur des échantillons tout-venant séchés à l'air.

- A -	pH-eau	pH-KCl	C %	N %	C/N	M.O. %
éch. 1, A ₂	5,3	4,4	0,32	0,02	17,5	0,54
éch. 3, Bt ₂	5,1	4,1	0,29	0,02	14,6	0,50

- B -	Complexe absorbant (meq/100 g de sol)							
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T	S/T	AP ⁺
éch. 1, A ₂	1,6	0,47	0,14	0,06	2,27	7,7	0,29	2,0
éch. 3, Bt ₂	1,8	0,87	0,13	0,15	2,94	11,4	0,26	3,6

éch. échantillon. C : carbone organique (méthode ANNE). N : azote total (méthode KJELDAHL). M.O. matière organique (C x 1,72). S : somme des cations basiques échangeables. T : capacité d'échange cationique (méthode METSON).

Analyses par le laboratoire de l'INRA d'Arras.

Tableau III - Analyses chimiques totales des matériaux tout-venant.

	Roches	éch. 3, Bt ₂	éch. 2, Bt ₁	éch. 1, A ₂
SiO ₂	66,59	58,62	57,83	65,93
Al ₂ O ₃	16,80	21,37	20,93	17,67
Fe ₂ O ₃ total	3,63	5,55	5,79	3,99
CaO	0,13	0,00	0,00	0,02
MgO	1,01	0,75	0,85	0,88
K ₂ O	5,29	3,16	2,67	3,67
Na ₂ O	2,19	0,45	0,51	0,48
TiO ₂	0,51	0,61	1,38	0,62
MnO	0,46	0,47	0,27	0,32
P ₂ O ₅	0,00	0,02	0,01	0,00
H ₂ O 105°C	0,22	1,57	1,62	0,65
P.F.	2,37	6,81	8,02	5,34
Total	99,20	99,38	99,88	99,57
Quartz (calculé)	28,80	31,10	30,35	40,49
Fe ₂ O ₃ "libre"	1,62	3,99	3,47	1,98
Fl/Ft	0,45	0,72	0,60	0,50

Résultats en % du poids de la terre séchée à l'air.
P.F. : perte au feu à 1000°C, après séchage à 105°C. FL / Ft : fer libre (méthode DEB) / fer total.
Analyses par l'URA 141 du CNRS.

Tableau IV - Composition minéralogique semi-quantitative des fractions argileuses < 2 µm.

	K	I	V	C	i (10-14)
éch. 1, A ₂	7	1 5	1,5	0	0
éch. 2, Bt ₁	8	1	1	tr	0
éch. 3, Bt ₂	8	1	1	0	tr

Résultats en dixièmes de la somme des minéraux argileux.
éch. échantillon. K : kaolinites. I : illites. V : vermiculites *sensu lato*. C : chlorites. i(10-14) : interstratifiés illite-vermiculite et illite-chlorite. tr : traces.
Diffractionnogrammes de rayons X par le Laboratoire de Géologie de l'E.N.S. Ulm.

Tableau V - Composition chimique totale des éléments < 2 µm.

	éch. 2, Bt ₁	
SiO ₂	38,07	Teneurs pondérales en % de la somme des éléments dosés, exception faite de l'eau d'imbibition. P.F. : perte au feu à 1100°C. Fl / Ft : fer libre (méthode DEB) / fer total. Ki : rapport moléculaire SiO ₂ / Al ₂ O ₃ . SiO ₂ / R ₂ O ₃ : rapport moléculaire, avec R ₂ O ₃ = Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ . Cap.éch. : capacité d'échange (méthode METSON) en meq/100g d'argile séchée à l'air. Analyses par le Laboratoire de l'INRA d'Arras.
Al ₂ O ₃	30,39	
Fe ₂ O ₃	12,84	
CaO	0,06	
MgO	0,77	
K ₂ O	1,66	
Na ₂ O	0,16	
TiO ₂	0,79	
MnO	0,02	
P ₂ O ₅	0,40	
P.F.	14,86	
Fe ₂ O ₃ "libre"	10,76	
Fl / Ft	0,84	
Ki	2,13	
SiO ₂ /R ₂ O ₃	1,67	
Cap. éch.	16,69	

IV - INTERPRÉTATION

Par la valeur élevée du rapport fer "libre" / fer total dans les horizons argilliques (0,72 en Bt₁) et l'abondance des kaolinites dans les fractions < 2 µm (leur teneur atteint 8/10 environ en Bt₁ et Bt₂), le paléosol enterré du barrage de Lambert est l'un des plus évolués des sols rougeâtres du massif des Maures (Y. CHEVALIER, 1984 ; C. MARTIN, 1986). Manifestement, il s'agit d'un sol ferrugineux désaturé. Mais il est impossible de déterminer dans quelle mesure il doit ses caractéristiques chimiques et minéralogiques à une évolution extrêmement poussée plutôt qu'à la nature de ses roches mères. En effet, d'une part, le profil, qui se trouve dans un secteur non affecté par les cycles d'érosion régressive plio-quadernaires et à une altitude voisine de celle du niveau d'érosion fini-miocène du Val Lambert, situé à proximité immédiate, a peut-être subi une évolution pédologique particulièrement longue, et, d'autre part, il est développé sur des gneiss, pauvres en fer et riches en plagioclases susceptibles d'alimenter des néoformations de kaolinite.

En outre, la partie supérieure du paléosol apparaît nettement lessivée, puisque, sur une même verticale, la teneur en argile passe de 9,6 % en A₂ à 21,7 % en Bt₂. L'indice d'entraînement de l'argile (argile % en Bt₂ / argile % en A₂) atteint ici 2,3 et celui du fer "libre" (fer "libre" % en Bt₂ / fer "libre" % en A₂) avoisine 2. Or l'horizon A₂ surmonte indistinctement les horizons Bt₁ et Bt₂. Son individualisation est donc postérieure à la phase de rubéfaction et, sans doute également, à la troncature du paléosol lors de son recouvrement par le colluvium caillouteux. Dans cette hypothèse, le profil observé est celui d'un sol polycyclique complexe. Notons que le lessivage affecte également les limons fins, le rapport Lf/Sf passant de 0,9 en A₂ à 1,4 en Bt₂.

Par ailleurs, le bilan isoquartz de l'évolution géochimique des matériaux minéraux depuis les roches altérées cohérentes jusqu'aux horizons argilliques du paléosol (Tab. VI) se caractérise par :

- un enrichissement sensible en alumine et en fer ;
- des pertes, assez modérées, en silice combinée et en magnésium ;
- et un appauvrissement très marqué en potassium et, plus encore, en sodium.

Tableaux VI - Bilans géochimiques isoquartz.

	Roches a	éch. 3, Bt ₂	éch. 2, Bt ₁	éch. 1, A ₂
SiO ₂	67,33	54,90 (-18,5)	55,48 (-17,6)	47,42 (-29,6)
Al ₂ O ₃	16,99	20,01 (+17,8)	20,08 (+18,2)	12,71 (-25,2)
Fe ₂ O ₃ t.	3,67	5,20 (+41,7)	5,56 (+51,5)	2,87 (-21,8)
CaO - b	0,08	0,00 (-100,0)	0,00 (-100,0)	0,00 (-100,0)
MgO - b	1,00	0,66 (-34,0)	0,77 (-23,0)	0,63 (-37,0)
K ₂ O - b	5,34	2,94 (-44,9)	2,56 (-52,1)	2,64 (-50,6)
Na ₂ O - b	2,21	0,42 (-81,0)	0,49 (-77,8)	0,35 (-84,2)
TiO ₂	0,52	0,57	1,32	0,45
MnO	0,47	0,44	0,26	0,23
P ₂ O ₅	0,00	0,02	0,01	0,00
P.F. - c	2,40	5,91 (+146,3)	7,22 (+200,8)	3,45 (+43,8)
Total	100,00	91,06	93,72	70,73
SiO ₂ co.	38,21	25,78 (-32,5)	26,36 (-31,0)	18,30 (-52,1)
Quartz	29,12	29,12 *	29,12 *	29,12 *

Teneurs en g/100g de roches mères séchées à 105°C. Le taux de variation des éléments, en % de la teneur des roches mères, est indiqué entre parenthèses.

Fe₂O₃ t. : Fe₂O₃ total. SiO₂ co. : SiO₂ combinée. éch. : échantillon. a : roches altérées cohérentes. b : exception faite des cations échangeables. c : perte au feu à 1000°C, exception faite de l'eau d'imbibition et de la matière organique.

* : la reconstitution de la composition minéralogique des horizons Bt ne rend pas compte de la présence de feldspaths potassiques, pourtant visibles dans les échantillons analysés. Les teneurs en quartz sont donc surestimées et les compositions chimiques isoquartz, sous-estimées.

La diminution des teneurs isoquartz en cations alcalins résulte évidemment d'une altération poussée des plagioclases et des biotites, alors que les feldspaths potassiques et les micas blancs subsistent encore dans les horizons argilliques. Les teneurs très faibles en calcium proviennent certainement d'une décalcification quasi totale des plagioclases dès le niveau des roches altérées.

Au point de vue minéralogique, l'altération a surtout permis la formation de kaolinites (Tab. IV). En conséquence, le maintien à un niveau relativement élevé de la teneur isoquartz en silice combinée ne peut s'expliquer que par un apport important de particules fines. Une équation inspirée d'Y. TARDY (1969, p. 126) fournit des arguments à cet égard :

Pertes de silice par altération (en g/100 g de roches mères) = $[(6 K_2O + 6 Na_2O + 2 CaO) - K_i (K_2O + Na_2O + CaO)] \times 60,08$

où K_2O , Na_2O et CaO représentent les pertes absolues exprimées en valeurs moléculaires, K_i le rapport moléculaire SiO_2/Al_2O_3 dans la fraction $< 2 \mu m$ et 60,08 le poids moléculaire de la silice.

Selon cette méthode de calcul les pertes de silice devraient atteindre 14,2 g/100 g de roches mères au niveau de Bt_2 (contre 12,4 g en réalité) et 16,2 g/100 g de roches mères au niveau de Bt_1 (contre 11,9 g en réalité).

L'apport de particules fines a non seulement compensé en partie les effets de la lixiviation de la silice et du magnésium, mais aussi provoqué une augmentation des teneurs en alumine et en fer. On peut d'ailleurs estimer grossièrement la quantité de particules fines fournies par les processus d'illuviation, à partir de l'augmentation des teneurs isoquartz en ces éléments et de la composition chimique de la fraction $< 2 \mu m$, en appliquant les équations ci-dessous :

Bilan des migrations de particules (illuviation ou éluviation) en g/100 g de roches mères =

d. Al_2O_3 % \times (100 / Al_2O_3 % de l'argile)

ou d. Fe_2O_3 % \times (100 / Fe_2O_3 % de l'argile)

avec : d. Al_2O_3 = différence entre les teneurs isoquartz en alumine de l'horizon Bt et des roches mères,

et d. Fe_2O_3 = différence entre les teneurs isoquartz en fer total de l'horizon Bt et des roches mères.

Il est ensuite possible de calculer les transferts en % du poids du sol actuel (par référence à la somme isoquartz des éléments), ou en % du poids du sol avant illuviation ou lessivage (par référence à la somme isoquartz des éléments diminuée ou augmentée des apports ou des pertes de particules fines).

Le recours au fer et à l'alumine comme indicateurs des migrations de particules est légitime lorsque les matériaux n'ont subi que des altérations hydrolytiques en milieu faiblement acide. Dans le massif des Maures, les échelles d'exportation des éléments minéraux témoignent en ce sens pour tous les types de formations superficielles (C. MARTIN, 1986).

Les valeurs obtenues pour les horizons Bt de la coupe du barrage de Lambert sont portées dans le tableau VII. L'enrichissement en particules fines est ici extrêmement sensible, avec des taux d'illuviation supérieurs à 10 % du poids du sol actuel.

Tableau VII - Illuviation de particules fines dans les horizons Bt.

Méthode	éch. 2, Bt_1		éch. 3, Bt_2	
	Al_2O_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3
Particules fines d'illuviation, en g/100g de roches mères	10,2	14,7	9,9	11,9
Particules fines d'illuviation, en % du poids du sol actuel	10,9	15,7	10,9	13,1

Dans le cas de l'horizon A₂, l'appauvrissement en particules fines se traduit, à partir des horizons Bt, par une diminution considérable des valeurs isoquartz de la somme des éléments et des teneurs en silice combinée, en alumine, en fer et en magnésium (Tab. VI). Le tableau VIII met en évidence un lessivage extrêmement efficace de la partie supérieure des horizons argilliques. Les exportations de particules fines ont nettement surpassé les apports enregistrés lors de la phase d'illuviation antérieure : les pertes subies par l'horizon A₂ représentent 19,9 % (méthode fer total) à 26,4 % (méthode alumine) des matériaux de l'horizon Bt₂ avant lessivage.

Tableau VIII - Lessivage de particules fines formées *in situ* dans l'horizon A₂

Méthode	éch. 1, A ₂	
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Particules fines lessivées provenant de l'altération <i>in situ</i> , en g/100 g de roches mères	14,1	6,2
Particules fines lessivées provenant de l'altération <i>in situ</i> , en % du poids du sol avant lessivage	16,6	8,1

Les valeurs calculées du lessivage des particules fines formées *in situ* diffèrent sensiblement selon la méthode d'estimation (alumine ou fer total). Plusieurs explications sont possibles : l'influence du lessivage des limons fins (voir *supra*) ; l'entraînement sélectif de certains éléments fins ; une certaine hétérogénéité de la composition chimique des roches et de la fraction < 2 µm ; et les imprécisions analytiques. Les résultats obtenus permettent cependant d'affirmer que la diminution des teneurs isoquartz en silice, magnésium, potassium et sodium entre les roches altérées cohérentes et l'horizon A₂ du paléosol, est la conséquence de la lixiviation des éléments minéraux libérés par l'altération des matériaux autochtones beaucoup plus que du lessivage des particules fines formées *in situ*. Avec la valeur maximale du lessivage, fournie par la méthode alumine, les pertes de particules formées *in situ* représentent 1,2 % des pertes isoquartz pour Na₂O, 8,9 % pour K₂O, 27,5 % pour SiO₂ et 29,7 % pour MgO.

V - CONCLUSION

L'étude de la coupe du barrage de Lambert précise l'importance des processus d'illuviation de particules solides dans la formation des horizons argilliques des sols rougeâtres. En effet, les particules d'illuviation, inférieures à 2 µm, y représentent plus de 10 % du poids des matériaux minéraux. Ainsi, sur la question longtemps controversée de l'enrichissement de la fraction argileuse des horizons Bt par illuviation (Ph. DUCHAUFOR, *in* Ph. DUCHAUFOR et B. SOUCHIER, 1977), les observations effectuées dans le massif des Maures s'accordent avec celles de R. BOULET (1974) concernant les sols tropicaux de Haute-Volta ou celles, effectuées plus récemment par E. FRITSCH *et al.* (1989) en Côte d'Ivoire, pour ne citer que deux exemples.

Les horizons Bt des paléosols du massif des Maures doivent leurs caractères granulométriques et chimico-minéralogiques essentiels à une évolution pédogénétique ancienne. Ils sont néanmoins parfois nettement affectés par la pédogenèse récente, sous la forme d'un appauvrissement en particules < 20 µm de la partie supérieure des horizons argilliques. Le lessivage des horizons Bt du sol de la coupe de Lambert s'est développé au détriment d'un lambeau de paléosol assez étendu, recouvert d'un colluvium peu épais et situé sur une pente forte. Ces conditions, ajoutées à la perméabilité médiocre des horizons argilliques, permettent en effet un drainage oblique abondant au niveau du contact entre le colluvium et le paléosol.

Remerciements : Nous sommes reconnaissant à l'URA 141, au Centre de Géomorphologie de Caen, au Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg et à M.D. LOÏYE-PILOT (ENS Montrouge) de l'aide qu'ils nous ont apportée dans la réalisation de ce travail.

Article reçu le 6 mars 1993, accepté après révision le 6 juillet 1993

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOULET G. - 1974. *Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimat*. Thèse de Doctorat d'Etat, Strasbourg. Mém. ORSTOM n° 85, Paris, 272 p.
- CHEVALIER Y. - 1984. *Altération météorique actuelle, et paléaltérations du socle provençal (France), évolution comparée des roches et des eaux de lessivage correspondantes. Etude physico-chimique, mécanique et hydrochimique*. Thèse de Doctorat d'Etat, Nice, 691 p.
- DEJOU J., GUYOT J. et ROBERT M. - 1977. *Evolution superficielle des roches cristallines et cristallophylliennes dans les régions tempérées*. Ed. INRA, Paris, 464 p.
- DUCHAUFOUR Ph., SOUCHIER B. (sous la direction de) - 1977. *Pédologie : pédogenèse et classification ; constituants et propriétés du sol*. Ed. Masson, Paris, 2 tomes, 477 et 459 p.
- FRITSCH E., HERBILLON A.J., JEANROY E., PILLON P. et BARRES O. - 1989. Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage "sols rouges - sols jaunes" dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt-savane de l'Afrique occidentale (Booro Borotou, Côte d'Ivoire). *Sci. Géol. Bull.*, vol. 42, n° 2, p. 65-89.
- LAMEYRE J. - 1966. Leucogranites et muscovitisation dans le Massif Central Français. Thèse de Doctorat d'Etat, Clermon-Ferrand. *Géologie et Minéralogie*, n° 29, fasc. 12, 264 p.
- MACIAS F. et CALVO DE ANTA R. - 1992. Caractérisation pédogéochimique (NW Espagne) en relation avec la diversification lithologique. Mise en évidence d'un milieu de transition entre les domaines tempérés et subtropicaux humides. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 315, série II, p. 1803-1810.
- 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'Etat, Paris I, 935 p.
- MARTIN C. - 1989. Erosion et altération chimiques actuelles sur roches métamorphiques dans le massif des Maures (Var, France). *Sci. Géol. Bull.*, vol. 42, n° 2, p. 91-106.
- PENVEN M.J. - 1988. *Altérations et formes de relief dans les ensembles cristallins tardifs. L'exemple de la Kabylie de Collo*. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris I,
- ROUBAULT M., FABRIES J., TOURET J. et WEISBROD A. - 1963. *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*. Ed. Lamarre-Poinat, Paris, 365 p.
- SEDDOH F. - 1973. *Altération des roches cristallines du Morvan*. Thèse de Doctorat d'Etat, Dijon. Ed. Doin, Paris, 377 p.
- TARDY Y. - 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique*. Thèse de Doctorat d'Etat, Strasbourg. Mém. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, n° 31, Strasbourg, 199 p.
- VAUDOUR J. - 1977. *La région de Madrid - altérations, sols et paléosols*. Thèse de Doctorat d'Etat, Aix-en-Provence. Ed. Ophrys, Paris, 1979, 390 p.
- WEBER F. et LARQUE Ph. - 1973. Mise au point d'une méthode d'analyse minéralogique quantitative par diffraction des rayons X. *Analysis*, vol. 2, n° 1, p. 15-29.