

Signification pédologique et paléoclimatique de la présence de gypse dans des vertisols de la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu)

Pascal Podwojewski

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 319, série II,
p. 111 à 117,
1994

ORSTOM, Institut de Géologie,
1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex,
France.

Résumé La présence de vertisols riches en smectites sur la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu) suppose la présence d'un climat sec et contrasté durant le Quaternaire récent. La néoformation de gypse dans ces vertisols a eu lieu durant la phase la plus sèche et la plus venteuse de la dernière période glaciaire.

Mots-clés : Gypse, Vertisol, Paléoclimat, Quaternaire récent, Vanuatu, Pacifique sud.

Abstract **Pedological and paleogeographical significance of gypsum occurrence in vertisols in Western Malekula Island (Vanuatu)**

The presence of smectite-rich vertisols on the western coast of Malekula Island (Vanuatu) attest to the presence of a dry and contrasted climate during the later Quaternary period. The neoformation of gypsum in these vertisols occurred during the drier and windier period of the last glaciation.

Keywords : Gypsum, Vertisol, Paleoclimate, Recent Quaternary, Vanuatu, South Pacific.

**Abridged
English
Version**

I. INTRODUCTION

MALEKULA Island (16°10'S, 167°20'E) in the Vanuatu Archipelago is located on the western ridge of the New Hebrides Island Arc. The Malekula Island substratum is composed of submarine volcanic rocks of Mio-Pliocene age. On its western rim, stepped uplifted coral terraces testify to the recent uplift of this island (Mitchell, 1968). Ash ejected by active volcanoes of the central ridge was deposited to leeward, in the ENE direction, and covers the uplifted coral terraces (figure 1) (Quantin, 1977, 1992).

The western coast of Malekula is on the leeward side; annual rainfall ranges from 1,200 to 1,500 mm/yr on average, mainly from December to April. A marked dry season occurs from August until October. In the Lambubu Bay area, the most extensive of the uplifted coral and alluvial terraces has an altitude ranging from 30 to 50 m.

II. THE SOILS

Soils on uplifted coral and alluvial terraces of the Lambubu area are composed of silty and

very porous andic brunisols (Référentiel Pédologique, 1992) (table I). In the central part of these plateaus, vertisols occur as isolated units (figure 2). The transition between brunisols and vertisols is rapid. This suggests a change in the origin and the age of the deposit. Clayey smectite-rich horizons with slickensides appear between 40 and 100 cm depth. At the base of the smectitic horizons, at 1 m depth, crystals of gypsum appear in a silty-sandy horizon. The crystals, less than 1 cm long, are arranged in rosette shape around pores (Jafarzadeh, 1992) (figures 3 and 4). The presence of smectites in areas with a very slow external drainage limits the internal drainage and promotes the stability of smectites and gypsum.

III. FORMATION AND AGE OF THE SOIL COMPONENTS

A high coral terrace located near Lambubu Bay at +60 m has been dated 75,000 yrs BP (Jouânnic, 1982; Taylor, 1992) and the levels between 50 and 30 m could be younger (60,000 yrs BP).

10 SEPT. 1994

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 40 571 ex. 1
Cote : B

Note

présentée par
Georges Pédro.
remise le 8 novembre 1993,
acceptée après révision
le 23 mars 1994.

Ash deposited on the emerged terrace. The time necessary to alter the ash and to form 1 m of vertisol could range from 15,000 to 30,000 years in a seasonal climate (Quantin, 1992). This suggests that the studied vertisols were formed between 60,000 and 20,000 yrs BP.

Gypsum occurs only at the base of vertisols. The presence of gypsum around tubular voids suggests precipitation from a saturated soil-solution. Gypsum crystallizes down to the limit of penetration of rainwater which is about 1 m in vertisols (Watson, 1983; Sonnenfeld, 1984). The gypsum must have formed after the formation of at least 1 m of vertisols in which the smectites limit the internal drainage of the soil solution.

The values of $\delta^{34}\text{S}$ of the gypsum contained in vertisols range from +7.5 to +12.1 (table II). This indicates that the sulfur is derived from two sources (Podwojewski, 1992): the weathering of volcanic ash rich in isotopically light sulfur ($\delta^{34}\text{S} \approx 0\%$ on Hunter volcano) and the deposition of marine salts from rainwater and seaspray, rich in heavy isotopes ($\delta^{34}\text{S} \approx +21\%$).

IV. DISCUSSION

The presence of gypsum-bearing vertisols at this latitude suggests a strongly seasonal paleoclimate, drier than present. The

neof ormation of smectites from volcanic ash is favoured by a seasonal climate (Paquet, 1970; Dudal, 1988) which must have occurred during the period of formation of the vertisols. Gypsum formed during the maximum of the glacial period, at around 18,000 yrs BP during which this tropical area was drier and windier than today (Kershaw, 1974; Bowler, 1976). During this period a better transportation of ash and sea-spray, a reduced rainfall and a greater evapo-transpiration contributed to the precipitation of gypsum.

V. CONCLUSION

The presence of gypsum in vertisols on the western coast of Malekula Island, with an average rainfall greater than 1,200 mm/yr, is very surprising. Gypsum-bearing soils are generally located in arid zones (Jafarzadeh, 1992). The formation of the vertisols required first a seasonal climate between 60,000 and 20,000 yrs BP, which favoured the neof ormation of smectite. This was then followed by the crystallization of gypsum during the windier and drier period of the last glaciation at around 18,000 yrs BP. At the present time, vertisols are stable under high rainfall because of their permanent rejuvenation by fresh volcanic ash deposit. The gypsum crystals, are however, very corroded (figures 5 and 6).

I. INTRODUCTION

L'île de Malekula (ou Malikolo) (16°10'S, 167°20'E) dans l'archipel du Vanuatu est située sur la bordure occidentale de l'arc insulaire des Nouvelles Hébrides. Cette île est constituée d'un substrat de roches volcaniques sous-marines du Mio-Pliocène. Sur sa périphérie ouest, une série de terrasses coralliennes surélevées attestent l'érection récente de cette île (Mitchell, 1968). Des cendres volcaniques en provenance des volcans actifs de la période actuelle, et qui sont situés sur la chaîne centrale de l'arc insulaire, se déposent sous le vent des alizés en direction de l'ENE et ont recouvert ces terrasses coralliennes (figure 1) (Quantin, 1977, 1992).

La côte ouest de Malekula est située sous le vent des alizés; la pluviométrie annuelle est comprise entre 1 200 et 1 500 mm/an et se répartit principalement durant les mois chauds de décembre à avril. Une saison sèche marquée s'écoule d'août à octobre. Au niveau de Lambubu Bay, le paysage est constitué de terrasses coralliennes et alluviales surélevées et étagées; celle située entre 30 et 50 m d'altitude couvre la surface la plus importante.

II. LES SOLS

Les terrasses coralliennes surélevées entre 30 et 50 m d'altitude sont couvertes par des brunisols andiques (Référentiel Pédologique,

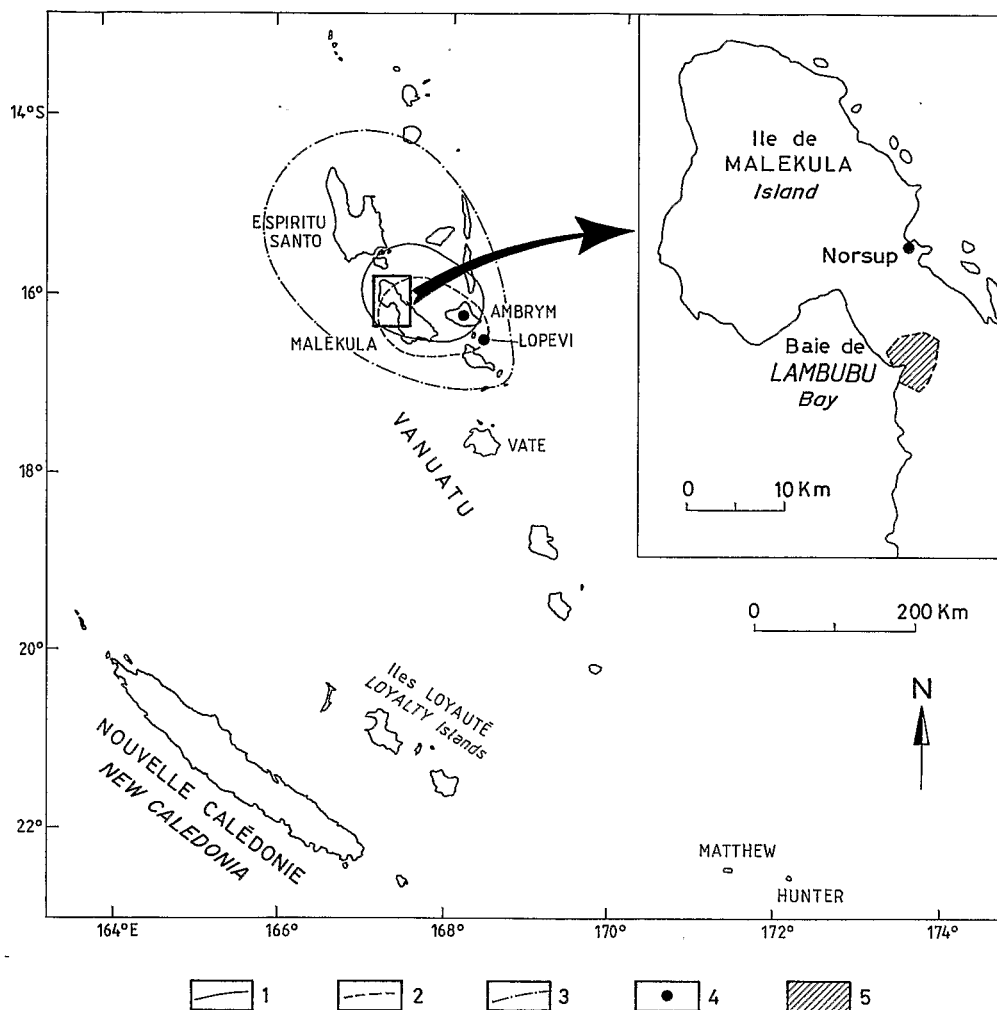


Figure 1 Carte de localisation. 1 : dépôts récents abondants de cendres à proximité du foyer du volcan d'Ambrym, 2 : dépôts récents abondants de cendres à proximité du foyer du volcan Lopevi, 3 : dépôts récents, peu épais, longue distance, des volcans de la région proche, 4 : volcans actifs à proximité de la zone étudiée, 5 : localisation de la zone étudiée. 1 à 4 : d'après P. Quantin (1992).

Location map. 1: recent deposits near the crater of the Ambrym Volcano, 2: recent deposits near the crater of the Lopevi Volcano, 3: recent deposits, in thin layers, at long distances from the volcanoes near the studied area, 4: active volcanoes near the studied area, 5: location of the studied area. 1 to 4: after P. Quantin (1992).

1992), limoneux, à faible densité, d'une épaisseur généralement comprise entre 1 et 1,50 m (tableau I), reposant soit sur des niveaux stratifiés alluviaux arrière récifaux, soit directement sur le calcaire corallien. Ces sols, issus de l'altération de cendres volcaniques, ont été sans cesse rajeunis par les apports éoliens de cendres (Quantin, 1992).

Au milieu de ces brunisols andiques, se distinguent des unités isolées de vertisols. Ceux-ci présentent des horizons smectitiques à « slickensides » entre 40 cm et 1 m de profondeur (figure 2). La cristallinité des smectites augmente en profondeur. A la base de ces niveaux, vers 1 m de profondeur dans un horizon limono-sableux, apparaissent des cristaux de gypse altérés de taille inférieure

à 1 cm et souvent assemblés en rosettes autour de pores tubulaires (Jafarzadeh, 1992) (figures 3 et 4).

Le passage des brunisols andiques aux vertisols s'opère brusquement. Ceci suggère un changement dans l'origine et l'âge des dépôts; les vertisols seraient plus anciens (Quantin, 1977). L'accumulation de smectites dans des zones à très faible drainage externe a pour effet d'auto-entretenir le confinement et la stabilité de ces smectites par la réduction du drainage interne. Ainsi, contrairement aux brunisols qui leur sont voisins, ces vertisols retiennent des éléments comme le sodium ou les sulfates nécessaires à la formation de gypse.

Tableau I Caractérisation physico-chimique des sols étudiés.

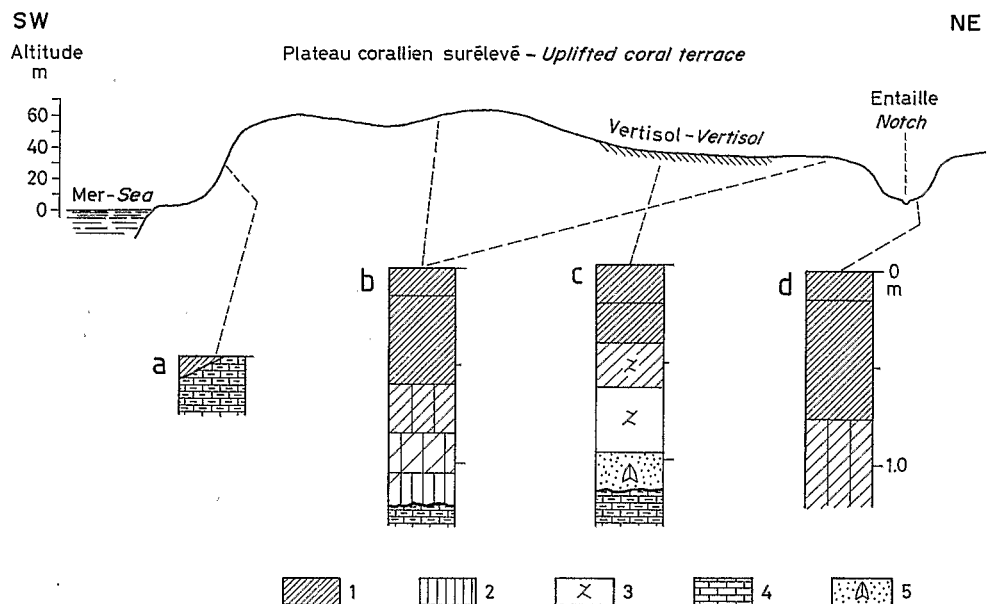
Some physical and chemical characteristics of the soils studied.

Echantil. Réf. KKO	Hz	Pro-fon-deur (cm)	pH	Texture			C orga-nique (g.kg ⁻¹)	CEC	Cations échangeables				
				Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)			Ca (cmol (*) kg ⁻¹)	Mg (cmol (*) kg ⁻¹)	K (cmol (*) kg ⁻¹)	Na (cmol (*) kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹)
Brunisol andique													
111-1...	A ₁	0-10	7,1	17	50	33	79,5	46,0	34,8	7,5	4,4	0,10	3,98
111-2...	A _p	10-30	6,7	13	62	25	23,1	39,0	24,3	5,4	5,1	0,24	2,55
111-3...	A ₃	30-50	7,0	29	62	9	21,4	59,8	38,1	12,1	4,5	0,31	1,95
111-4...	A ₄	50-85	6,8	56	37	7		62,5	36,0	16,1	3,4	0,40	
111-5...	S	85-120	6,9	32	51	17		57,4	32,6	14,7	3,4	0,39	
Vertisol à gypse													
176-1...	A ₁	0-15	6,8	9	51	40	33,3	39,0	26,2	9,8	2,6	0,18	2,39
176-3...	A ₃	20-40	6,8	66	28	6	20,0	60,1	38,8	17,2	1,0	0,87	0,71
176-4...	V ₁	40-60	5,2	90	7	3		65,4	38,7	19,2	0,59	1,80	
176-5...	V ₂	60-95	4,5	88	11	1		63,8	34,5	17,9	0,43	3,20	
176-6...	S _{Gy}	95-120	5,5	47	48	5		64,9	41,5	20,6	0,45	3,80	

Echantil. : Échantillon. Hz : Horizon.
 CEC : Capacité d'échange cationique.
 Hz : Horizon. CEC : Cation Exchange Capacity.
 Analyses effectuées par le laboratoire de Chimie de l'ORSTOM à Nouméa par J. Pétard, série KKO.

Figure 2 Coupe pédologique schématique. a : sol érodé, falaise calcaire, b : brunisol andique, c : vertisol à gypse, d : brunisol andique sur alluvions récentes, 1 : horizon humifère, 2 : horizon structural, 3 : horizon vertique, 4 : calcaire corallien, 5 : horizon limono-sableux à gypse.

Schematic pedological section :
 a : eroded soil, limestone cliff,
 b : andic brunisol, c : gypsum-bearing vertisol, d : andic brunisol on recent alluvium, 1 : humiferous horizon, 2 : structural horizon, 3 : vertic horizon, 4 : corallian limestone, 5 : gypsum-bearing loamy-sandy horizon.



III. FORMATION ET ÂGE DES CONSTITUANTS DU SOL

Une haute terrasse corallienne située près de Lambubu Bay à +60 m a été datée 75 000 ans BP; les niveaux situés entre 50 et 30 m serait plus récents (60 000 BP) (Jouanic, 1982). Des mouvements tectoniques ont

surélevé ces terrasses à une vitesse moyenne comprise entre 1 et 2 mm/an (Taylor, 1992), et les ont maintenues bien au-dessus du niveau de la mer (Bloom, 1974; Miller, 1992).

Des cendres volcaniques se sont ensuite déposées sur ces terrasses exondées. L'altération de 1 m de cendres en smectites nécessiterait entre 10 000 et 20 000 ans, compte tenu du drainage climatique. La période néces-

Tableau II Valeurs comparatives de $\delta^{34}\text{S}$ (‰) sur des échantillons de gypse provenant de vertisols dans la région de Lambubu, de vertisols de Nouvelle Calédonie, et de gypse autour de solfatares du volcan Hunter.

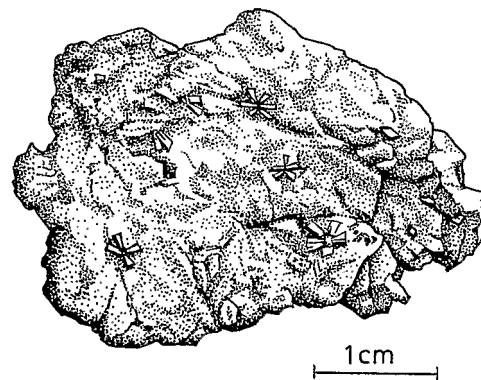
Comparative values of $\delta^{34}\text{S}$ (‰) from gypsum samples providing from vertisols from the Lambubu Area, vertisols from New Caledonia, and gypsum around solfatares from Hunter Volcano.

Vertisol Lambubu	Vertisols, Nouvelle Calédonie (1)	Volcan Hunter (2)	Sulfates de l'eau de mer
+ 12,10	maxi: + 20,79	- 3,81	≈ + 21
+ 7,57	mini: + 12,11	- 4,34	
+ 9,28			
+ 11,12			
+ 9,51			

saire à la formation de 1 m de vertisols, compte tenu de l'augmentation de la densité de ces sols peut être estimée entre 15 000 et 30 000 ans (Quantin, 1992). Les vertisols étudiés se seraient ainsi formés entre 60 000 et 20 000 ans BP.

La présence de gypse est strictement limitée aux vertisols. La présence de cristaux de gypse autour de pores tubulaires indique que leur précipitation s'est produite lors de la saturation de la solution du sol. La formation de gypse serait donc postérieure à celle des vertisols dont la richesse en minéraux argileux smectitiques a limité le drainage des solutions du sol. Le gypse précipite généralement sous la limite de pénétration de l'eau de pluie (Watson, 1983; Sonnenfeld, 1984). Si la limite de pénétration de l'eau de pluie dans un vertisol est d'environ 1 m, des vertisols ayant au moins cette épaisseur existaient lors de la précipitation du gypse.

L'analyse de la composition isotopique du soufre constituant le gypse de cette zone montre que le $\delta^{34}\text{S}$ oscille entre + 7,5 et + 12,1 (tableau II). Comme pour le gypse des vertisols de Nouvelle Calédonie, on peut en déduire une double origine, (Podwojewski, 1992) : une origine continentale riche en isotopes légers ($\delta^{34}\text{S} \approx 0\text{‰}$, gypse du volcan Hunter) qui provient du soufre contenu dans les cendres volcaniques et une origine marine riche en isotopes lourds ($\delta^{34}\text{S} \approx +21\text{‰}$) qui proviendrait des embruns et des aérosols.



Analyses effectuées au CRPG de Nancy sous la direction de M. Arnold.

(1) Podwojewski, 1992.

(2) Échantillonné par M. Lardy et M. Monzier, équipe de géologie-géophysique, ORSTOM-Nouméa.

(3) Sampled by M. Lardy and M. Monzier, geology-geophysics team, ORSTOM, Noumea.

Figure 3

Légende figures 3 et 4 :

Cristaux de gypse associés en rosette.

Gypsum crystals arranged in rosette shape.

Figure 4

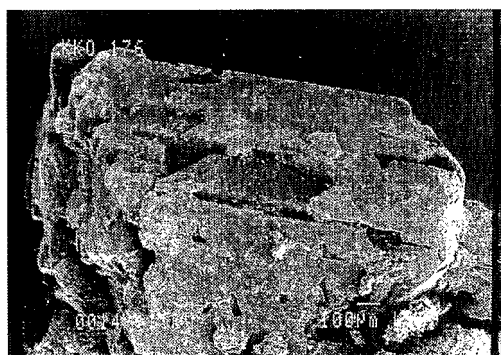
IV. DISCUSSION

La présence de vertisols et surtout de gypse sous de telles latitudes témoigne de la présence d'un paléoclimat plus sec que l'actuel. Les smectites qui caractérisent ce type de sol nécessitent un climat à saisons alternées (Paquet, 1970; Dudal, 1988) durant toute la période de formation des vertisols, suite à l'émersion de la terrasse (Kershaw, 1974). Le gypse se serait ensuite formé durant

Figure 5

Légende figures 5 et 6 :
Cristaux de gypse très altérés.

Deeply weathered gypsum crystals.

**Figure 6**

la période proche du dernier maximum glaciaire, vers 18 000 ans BP, durant laquelle cette région tropicale aurait été beaucoup plus sèche (Bowler, 1976) et plus venteuse qu'actuellement. Cette période était donc particulièrement favorable à un transport accru de cendres et d'embruns, à une pluviosité

plus réduite et à une évaporation plus forte, notamment par les pores planaires des vertisols, évaporation nécessaire à la précipitation de sels.

V. CONCLUSION

La présence de gypse dans des vertisols de la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu) sous une pluviosité actuelle moyenne supérieure à 1 200 mm/an en moyenne est inattendue. En effet, la plupart des sols à gypse répertoriés dans le monde caractérisent les zones sub-arides (Fernandez Caldas, 1981 ; Jafarzadeh, 1992). Les vertisols à gypse témoignent, au Quaternaire récent, d'un paléoclimat nettement plus sec que le climat actuel. En effet, la formation des vertisols riches en smectites a nécessité un climat à saisons alternées sur une période s'étalant de 60 000 à 20 000 ans BP. Celle-ci a précédé la cristallisation du gypse lors des épisodes les plus secs et les plus venteux de la dernière période glaciaire vers 18 000 BP. Malgré la forte pluviosité, les vertisols sont stables, car ils sont constamment rajeunis à partir de leur surface par des apports de cendres volcaniques ; en revanche le gypse est instable, comme le prouvent les nombreuses figures de dissolution observées (figures 5 et 6).

Remerciements : L'auteur remercie vivement P. Quantin (ORSTOM, Bondy) pour son aide et ses conseils.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BLOOM, A. L., BROECKER, W. S., CHAPPEL, J. M. A., MATTHEWS, R. K. et MESOLELLA, K. J., 1974. Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast: New $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates from the Huon peninsula, New Guinea, *Quaternary Research*, 4, p. 185-205.
- BOWLER, J. M., HOPE, G. S., JENNINGS, J. N., SINGH, G. et WALKER, D., 1976. Late Quaternary climates of Australia and New Guinea, *Quaternary Research*, 6, p. 359-374.
- DUDAL, R. et ESWARAN, H., 1988. Distribution, properties, and classification of vertisols, In: *Vertisols: their distribution, properties, classification and management*, WILDING, L. P. et PUENTES, R., éd., SMSS, Texas A&M, College Station, 193 p.
- FERNANDEZ CALDAS, E., QUANTIN, P. et TEJEDOR SALGUERO, M. L., 1981. Séquences climatiques de sols dérivés de roches volcaniques aux îles Canaries, *Geoderma*, 26, p. 47-62.
- JAFARZADEH, A. et BURNHAM, C. P., 1992. Gypsum crystals in soils, *Journal of Soil Science*, 43, p. 409-420.
- JOUANNIC, C., TAYLOR, F. W. et BLOOM, A. L., 1982. Sur la surrection et la déformation d'un arc jeune : l'arc des Nouvelles Hébrides, *Trav. et Doc. ORSTOM*, 147, p. 223-246.
- KERSHAW, A. P., 1974. A long continuous pollen sequence from north eastern Australia, *Nature*, 251, p. 222-223.
- MILLER, G. H. et DE VERNAL, A., 1992. Will greenhouse warming lead to northern hemisphere ice-sheet growth? *Nature*, 355, p. 244-246.
- MITCHELL, A. H. J. et WARDEN, A. J., 1971. Geological evolution of the New Hebrides island arc, *J. Geol. Soc. London*, 127, p. 501-529.
- PAQUET, H., 1970. Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saisons contrastées, *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 30, 210 p.

- PODWOJEWSKI, P., 1992. Les vertisols à gypse de Nouvelle Calédonie dans leur environnement pédologique, *Thèse*, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 261 p., déposée à la Société géologique de France.
- QUANTIN, P., 1977. *Archipel des Nouvelles Hébrides (Vanuatu)*; Atlas des sols et quelques données du milieu naturel, fascicule V, Malikolo, ORSTOM, Paris, Notice 30 p., et trois planches en couleur.
- QUANTIN, P., 1992. Les sols de l'archipel volcanique des Nouvelles Hébrides (Vanuatu). Étude de la pédogenèse initiale en milieu tropical, *Études et thèses ORSTOM*, Paris, 498 p.
- SONNENFELD, P., 1984. *Brines and evaporites*, Academic Press Inc., London, 613 p.
- TAYLOR, F. W., 1992. Quaternary vertical tectonics of the central New Hebrides Island Arc, In: COLLOT, J. Y. et al., éd., *Proc. ODP, Init. Repts*, College Station, TX, 134, p. 33-42.
- WATSON, A., 1983. Gypsum crusts. In *Chemical sediments and geomorphology: precipitates and residua in the near-surface environment*, GOUDIE, A. S. et PYE, K., éd., Academic Press Inc., London, p. 133-161.