

Les minéraux argileux des altérites et des sédiments pliocènes et quaternaires du Pays Nantais (France). Essai de bilan géomorphodynamique et paléoclimatique

L. BARBAROUX *, D. SELLIER **

Mots-clés : Altérites, Arénites, Cuvettes, Dynamique, Indices d'altération, Morphologie, Paléoclimats,
Phyllites, Sédimentologie.

Résumé

Selon les travaux de P. Birot nous avons pu distinguer dans le secteur étudié une arénisation, génératrice de quartzo-altérites et une argilisation, génératrice d'argilo-altérites, en fonction de la nature et de la granularité de la roche-mère.

Les quartzo-altérites les plus récentes sont quartzo-feldspathiques. Les plus anciennes, évoluées, sont quartzo-argileuses (avec un pôle hydromorphe à smectites illite, un pôle drainé à kaolinite gibbsite).

Les argilo-altérites récentes sont riches en minéraux phylliteux primaires ou peu évolués (biotite, hydrobiotite). Les plus anciennes accumulent les argiles évoluées (avec les deux pôles précédents).

Sur le terrain, les spectres RX des échantillons confirmant ces subdivisions, nous distinguons six groupes morpho-sédimentologiques :

— Cuvettes reliques, ou altérites piégées, où l'altération est pratiquement bloquée dans les profils fossilisés sous sédiments. Ces horizons anté-pliocènes (oligo-miocènes ?) sont à divers stades, généralement poussés, d'altération.

— Surface « fondamentale ». Cette surface, façonnée depuis le Tertiaire au moins, continue de subir des effets météoriques. On doit y distinguer deux domaines : l'un, occidental (« plateau nantais ») surélevé par la tectonique cénozoïque ne présente en général que des « racines » d'altérites peu évoluées ; l'autre, oriental (« plateau du Cellier, plate-forme de Carquefou ») en partie effondré, présente des témoins d'altération poussée.

— Sables rouges et formations associées pliocènes. Leur mise en place résulte de la mobilisation des matériaux d'altération arrachés à la surface fondamentale par ruissellement, redistribués mécaniquement par action marine en milieu littoral et bloquant le fer issu du lessivage continental. L'accumulation préférentielle de ces dépôts a lieu dans des fossés tectoniques, actifs jusqu'au Quaternaire inclus.

— Replats-glacis, glacis et nappes caillouteuses. Au Plio-Quaternaire et Quaternaire « ancien », des phénomènes de glaciplanation retouchent la couverture de sables rouges et refaçonnent les bordures de la surface fondamentale. Ceci est net à proximité des zones de néotectonique active et de paléoreliefs exhumés. Il s'ensuit un dépôt en nappes dont les matériaux phylliteux proviennent d'un mélange des phases précédentes et de l'attaque du glacis lui-même.

— Altérites de replats et de versants. Au Quaternaire moyen, l'altération continue sur les versants, suivant des modalités comparables.

— Altérites des vallées récentes et limons éoliens würmiens. L'altération récente, qui se poursuit, est discrète. Essentiellement linéaire, elle s'exerce surtout sur la partie inférieure des vallées récentes. Elle s'est accompagnée d'une importante déflation par vent dominant de secteur sud-sud-ouest, accumulant localement des limons dont le matériel a été surtout arraché à la surface fondamentale.

L'étude des spectres RX nous conduit à proposer, pour les altérites, dans le sens des travaux de Tardy :

— Un indice d'altération totale :

$$\frac{\text{Kaolinite} + \text{Complexe Gonflant}}{\text{Biotite} + \text{Illite} + \text{Chlorite}}$$

— Un indice d'altération polyphasée :

$$\frac{\text{Gibbsite}}{\text{Kaolinite}}$$

— Un indice d'hydromorphie :

$$\frac{\text{Complexe Gonflant}}{\text{Kaolinite}}$$

* Laboratoire de Biosédimentologie Dynamique - Université de Provence - 13331 Marseille Cedex 03.

** Laboratoire de Géographie Physique - IGARUN - Université de Nantes - 44036 NANTES Cedex 01.

• Manuscrit déposé le 27 mai 1986.

L'ensemble des résultats obtenus sur la région nantaise, plate-forme ancienne, de stabilité tectonique relative, révèle un continuum fait de phases d'altérations entrecoupées de phénomènes rhexistasiques, de pulsations eustatiques et de ruptures néotectoniques. Il en résulte une mosaïque de formes et de formations, imbriquées, avec des retouches successives multiples et différentielles dans l'espace et le temps.

L'évolution du modelé et des dépôts s'intègre dans un schéma général réglé par les interactions continent-océan, elles-mêmes sous la dépendance des pulsations climatiques.

Abstract

This study is enhanced by a new methodology, dealing with a constant fit of geomorphologic and sedimentologic datas. The Nantes old igneous peneplaned basement appears to be a good model for this purpose. Southern Brittany shows a continuous landlevelling process with — alteration-erosion phases, eustatic pulsations and tectonic events — their results give a patchwork of imbricated forms and formations with space and time control of correlative sedimentation in neighbouring marine platform. The mineralogical record leads us to use three indexes : the whole alteration index (kaolinite + smectites versus Primary phyllites) ; the polyphased alteration index (gibbsite/kaolinite) and the hydromorphic index (smectites/kaolinite). Through sedimentologic and geomorphodynamic datas we can distinguish six main units :

- Relict antepliocene forms as little basins, with deep kaolinization and trapped alteration mantle fossilized under sediments.
- Fundamental surface, peneplaned, before and along Cenozoic times, with alteration roots and/or more or less deep alteration mantle at quite different stages of evolution.
- Pliocene red sand deposits, as a result of the alteration products mobilization throughout runoff and shallowing sea margin actions.
- Plioquaternary and old quaternary roughly clastic sheets and glacia reworking pliocene formations and fundamental surface borders.
- Middle quaternary valley walls, decayed rock formations and associated glaciplanation sheets.
- Recent (Würm to actual) quaternary weathered rocks formations and loams with a development of linear erosion and a discrete kaolinization.

Yet, all these different alteration formations, could be gathered in two families. The quartzo-alteration family with abundant residual quartz grains, resting on granular basement subsidiary divided in recent formations, where feldspars are abundant or common and more clayed ancient formations (with illite-smectites or kaolinite as drainage function). The clay-alteration family without residual formation keep some untransformed primary minerals (i.e. biotite) but old formations show neofomed mineral (illite, smectite or kaolinite as above).

The general framework through these geomorphologic and sedimentologic observations appears mainly as a continent-ocean interaction result under general climatic control ; with stop and go and feed-back actions, such as successive alteration erosion cycles could take place in space and time.

Introduction

Le Pays nantais appartient aux marges sud-orientales du Massif armoricain et correspond au secteur compris entre l'estuaire de la Loire, la Grande Brière, la vallée de l'Isac et le bassin d'Ancenis. Ses paysages s'apparentent à ceux des régions cristallines et métamorphiques du domaine océanique. Son relief est un des plus bas du Massif armoricain (35 m d'altitude moyenne). Il se compose de plates-formes horizontales ou faiblement inclinées, d'une étendue de 1 000 km² environ, dont les altitudes n'atteignent nulle part 100 m et dont les contours sont jalonnés de dépressions (bassins cénozoïques de Brière, Campbon, Saffré, Nort, Petit-Mars). Il se scinde en deux plateaux triangulaires également inclinés au nord vers les bassins de Saffré et de Nort, bordés au sud par la Loire, et séparés par l'Erdre (fig. 1 et 2).

A l'ouest, le Plateau nantais culmine à 91 mètres. Il est limité au sud par le Sillon de Bretagne, escarpement de direction armoricaine N 125°, qui borde les granites

hercyniens de la zone broyée sud-armoricaine et qui sépare le Domaine Ligérien, auquel s'intègre l'ensemble du Pays nantais, du Domaine de l'Anticlinal de Cornouaille. Sa surface, apparemment uniforme est disséquée par des vallées courtes (15 à 25 km) et encaissées (25 à 50 m), tributaires de l'Isac, de l'Erdre (Hocmard, Gesvres, Cens), ou de la Loire (Chézine). Le substratum comprend les granites hercyniens du batholite de Vigneux et leur enveloppe de micaschistes albitiques (séries de Mauves).

A l'est, le Plateau du Cellier culmine à 84 m et présente un paysage analogue. Il est traversé par la Vallée du Gobert à l'ouest et par celle du Havre à l'est. Il est bordé par le Coteau de Mauves au sud et par celui du Chemin Nantais à l'ouest ; ce dernier s'aligne sur un accident N 160° qui témoigne, comme les talus précités, du rôle d'une tectonique récente dans la création des volumes topographiques locaux. L'espace compris entre ce coteau et la basse vallée de l'Erdre est occupé par la plate-forme de Carquefou, d'altitude 20-35 m, également inclinée vers le nord, en direction des Marais de Petit-Mars. La partie orientale du Plateau du Cellier correspond aux séries cristallophylliennes de Champto-

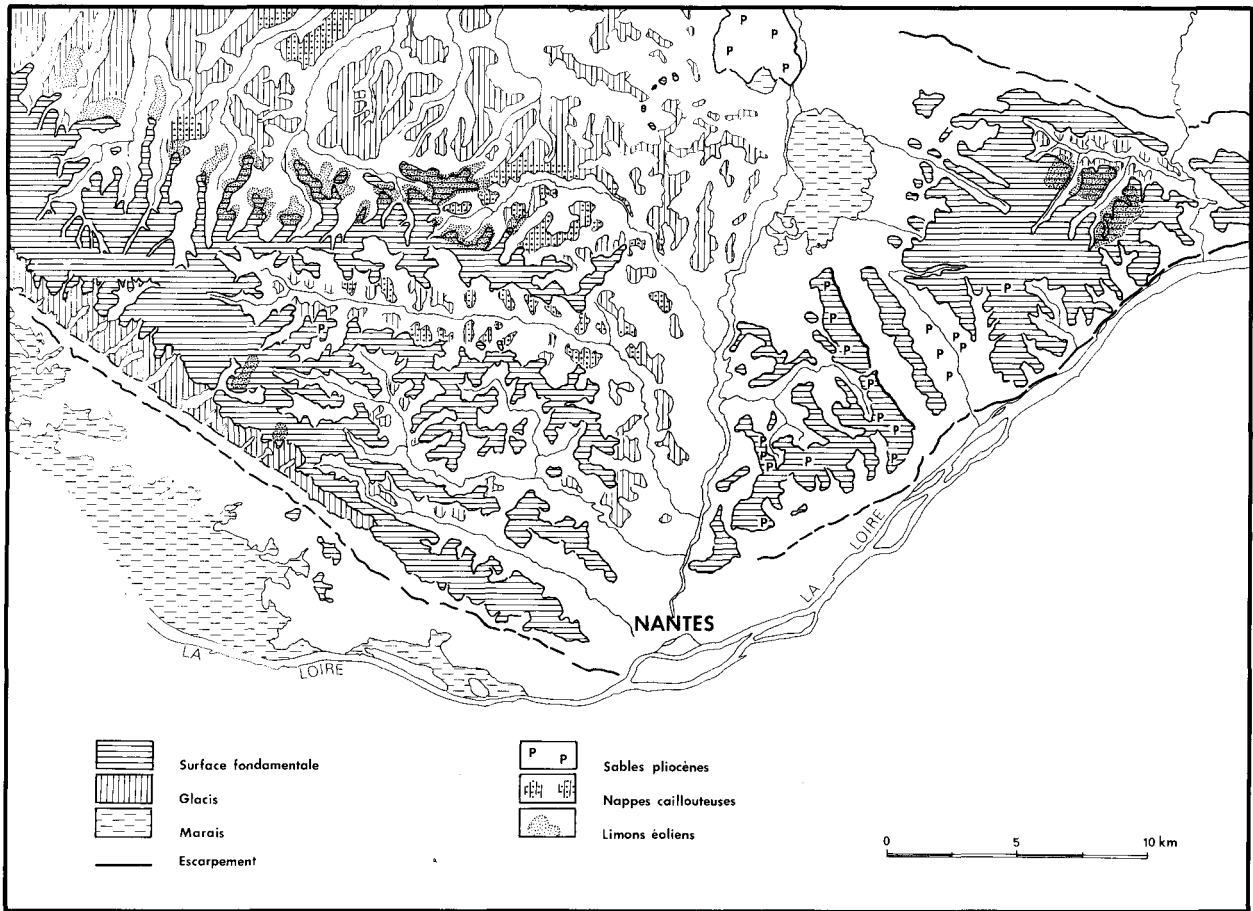


Fig. 1. - Cadre géomorphologique et carte des formations superficielles du pays nantais (Bretagne-France).
Geomorphologic frame and superficial formations map in Nantes Region (Brittany-France).

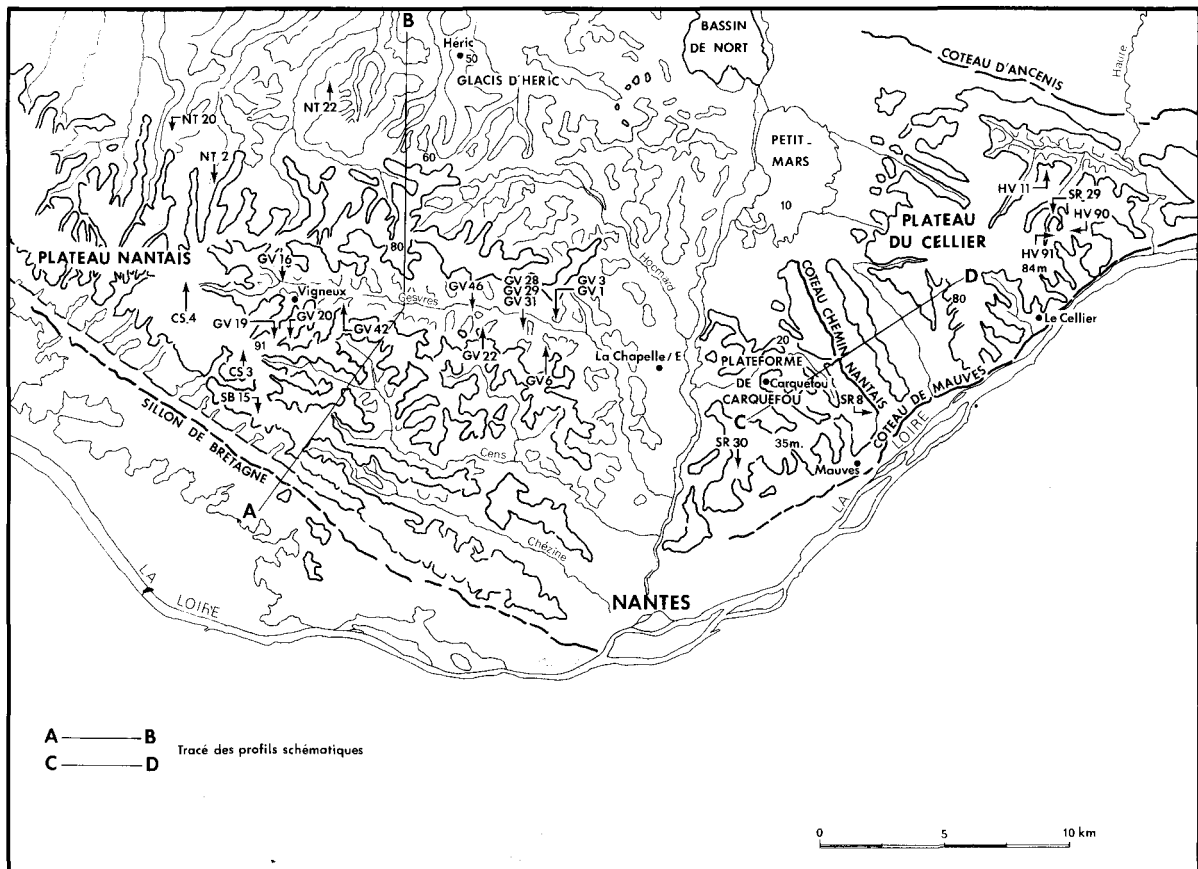


Fig. 2. - Localisation des prélèvements types et des coupes morphologiques.
Main sample-types and cross-sections location.

ceaux (gneiss et micaschistes principalement). Sa partie occidentale, ainsi que la plate-forme de Carquefou ne comprennent que des micaschistes (série de Mauves).

Le Pays nantais est d'abord un pays de surfaces, dont dérivent les autres reliefs, par incision, emboîtement ou dislocation. La surface des plateaux peut être considérée comme une topographie fondamentale, assimilable à la « Pénéplaine de l'Ouest de la France » définie par Klein (1973). Cette surface comporte des placages de sables rapportés au Pliocène par analogie de faciès avec les « sables rouges » du Massif armoricain (Durand, 1960). De ce fait, elle pourrait être considérée comme pré-pliocène ; cependant des dépôts de même type se rencontrent à d'autres altitudes, jusqu'aux bassins d'effondrement périphériques. Par contre, elle se distingue par des formations d'altération qui en représentent les véritables formations signalétiques.

L'observation détaillée du relief montre que cette surface fondamentale se réduit à l'état d'interfluves et de lambeaux qui ne concernent qu'une partie du Plateau nantais et du Plateau du Cellier (60 % de leur superficie environ). Elle est, en effet, entamée par un niveau d'aplanissement périphérique qui répond à la définition d'un glacis, par ses formes et par ses pentes, s'étend surtout au nord et à l'est du Plateau nantais (Glacis d'Héric et de la Chapelle-sur-Erdre) et se poursuit en bordure des vallées secondaires par des replats-glacis (Hocnard, Gesvres, Cens, Chézine).

Ce niveau s'emboîte de 10 à 25 m dans la surface fondamentale. Il procède d'une érosion aréolaire, sorte de glaciplanation, réalisée à partir des bassins de Saffré, de Nort, de Petit-Mars et de la plate-forme de Carquefou, exercée ou amorcée aux dépens des altérites de la surface fondamentale. Il ne comporte lui-même que des formations d'altération minces et inachevées, et se caractérise par des nappes caillouteuses rouges, confondues jusqu'ici sur les cartes avec les sables rouges pliocènes, mais complètement distinctes de ces derniers tant par leurs conditions de gisement que de dépôt. Ces nappes associent les produits de la destruction partielle des altérites de la surface fondamentale à ceux du remaniement de matériaux tertiaires. Du fait de leur emboîtement dans la surface fondamentale, les glacis et replats-glacis, rapportés à un même niveau topographique, peuvent être considérés comme postérieurs à la sédimentation pliocène, et placés au Plio-Quaternaire ou au Quaternaire Ancien.

Des limons éoliens affleurent actuellement sur la surface fondamentale et les glacis environnants ; leurs principaux dépôts soulignent les pentes de raccorde-ment entre ces deux niveaux topographiques.

Les glacis et replats-glacis sont découpés et défoncés par les vallées encaissées au cours du Quaternaire ; leurs versants comportent des altérites minces et discontinues, localement colluvionnées.

Chaque élément du relief — surface fondamentale, glacis, versant — se caractérise donc par des formations spécifiques, *in situ* (altérites) ou transportées (sables rouges, nappes caillouteuses, limons éoliens), dont les caractères sédimentologiques seront progressivement précisés.

La problématique essentielle qui nous a guidés consiste à insérer dans une chronologie relative déjà connue (Barbaroux *et al.*, 1975-1983) des événements qui ont conduit à la mise en place des altérations et des

dépôts sédimentaires. A notre avis, les cycles sédimentaires devaient être resitués en fonction des cycles altérants. A travers les variations minéralogiques, ce sont donc, à la fois, des évolutions sédimentodynamiques et paléoclimatiques qui seront établies. Ces variations minéralogiques nous permettront de mettre en évidence les liens existants entre morphogenèse, altération et géodynamique sédimentaire et leur évolution au cours du temps.

Méthodologie

La morphologie et la morphogenèse du Pays nantais, telles qu'elles ont été analysées par l'un de nous (Sellier) permet de définir sept formes et formations.

Le prélèvement des échantillons tient compte des différentes conditions de gisement, tant pour les formations sédimentées que pour les « altérites découvertes » (dont la surface est librement exposée aux agents météoriques) et les « altérites enfouies » (dont la surface est protégée par une formation sédimentaire). Ceci a permis de rationaliser les études de laboratoire en retenant 24 échantillons significatifs de la problématique exposée précédemment. Cet échantillonnage, suffisant pour une première approche, a été réalisé en dessous des horizons pédologiques actuels, actifs.

Les échantillons ainsi sélectionnés ont fait l'objet d'une étude texturale classique et d'analyses minéralogiques par diffraction des Rayons X sur poudres ($FF \varnothing \leq 44$ microns) et sur pâtes lissées ($FF \varnothing \leq 2$ microns) (Techniques *).

Dans l'expression des résultats des analyses minéralogiques, les pourcentages sont fournis à plus ou moins 5 % près (tabl. IV a et b). Les indices mesurés sur diagrammes de pâtes, cristallinité de l'illite, rapport feldspath/quartz (na, F/Q), sont ceux définis par Chamley (1971). Ils ont une signification climatique en ce qui concerne les altérites et une signification mixte, climatique et dynamique, pour les sédiments (Barbaroux, 1980).

Trois indices définis essentiellement à partir des observations de Tardy (1969), Winckel (1971), Dejou (1972) et Klein (1975) seront utilisés pour examiner de façon plus rigoureuse le problème des degrés d'évolution des altérations :

— Rapport Gibbsite/Kaolinite (G/K, Tardy, 1969)

Sa signification paraît polyvalente et l'abondance relative de gibbsite dépendrait des facteurs climatiques (chauds), de vitesse d'altération (précocité), de rochemère (leucogranites sodiques), de drainage (secteurs bien drainés). Ces critères sont encore discutés, certains auteurs n'admettant la présence de gibbsite que dans les tout premiers stades d'altération (Chestworth, 1972).

Néanmoins, Tardy (*op. cit.*) admet la possibilité de genèse polyphasée jusqu'au Quaternaire récent inclus et même en ambiance tempérée. Ce rapport pourrait donc être, globalement, considéré comme un indicateur du caractère polyphasé de l'altération, dans la mesure où

* Techniques granulométriques et exoscopiques standards du Laboratoire de Stratigraphie et de Paléoécologie de Marseille (Barbaroux). Techniques RX du Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface de Strasbourg.

une succession de phases altérantes brèves, sur un domaine bien drainé, favorise la formation de gibbsite (Gac et Tardy, 1980).

— Rapport CA =

Minéraux phylliteux d'altération
Minéraux phylliteux « primaires »

= Kaolinite + Complexe gonflant
= Chlorite + Micas + Hydrobiotite

Ce rapport traduit un indice — ou degré — d'altération (CA) qui sera maximum pour une altérite évoluée à son terme.

— Rapport CH =

Minéraux argileux stables en contexte hydromorphe
Minéraux argileux stables en contexte drainé

= Complexe gonflant
= Kandites *
(CH = CG/K)

Ce rapport exprime essentiellement le contexte de drainage, il pourrait correspondre à un indice d'hydromorphie. Pour une altérite évoluée, les milieux saturés hydromorphes favorisent le complexe gonflant, les milieux drainés favorisent la kanditisation (Gac et Tardy, 1980).

I. Formes et formations (fig. 1 à 4) (tabl. I, II, III)

A. Surface fondamentale et altérations profondes

1) Caractéristiques générales (tabl. I et II, groupe 1)

Les éléments de la surface fondamentale sont cernés par les isohypses 80-70 m au sud et 65-60 m au nord ;

* Par kandites nous désignons le groupe des argiles kaoliniques (kaolinites, halloysites...).

ceci rend compte de leur faible inclinaison dans cette dernière direction. L'originalité de leurs paysages tient à une humidité prolongée des sols qui s'explique elle-même par un drainage déficient et par une omniprésence d'altérites d'origine météorique.

Nous distinguerons, d'après les données du terrain, cinq types d'altérites correspondant à trois degrés d'altération (tabl. I) ; cette typologie servira également de référence pour définir l'état des altérites spécifiques des autres reliefs (§ C et F).

Les coupes démontrent l'étroite coïncidence qui existe entre l'extension de la surface fondamentale et celle du manteau d'altérites, quasi continu, auquel se rapportent les formations précédemment décrites. Elles témoignent d'altérations communément développées sur 6 à 10 m, parfois plus, certains sondages pratiqués sur le Plateau nantais n'ayant atteint les altérites de type 2-3 qu'à une quinzaine de mètres de profondeur. Les altérites de type 5 sont les plus largement répandues en surface, souvent sur 3 à 5 m d'épaisseur (tabl. I). Elles représentent le stade ultime de l'altération et correspondent à des formations meubles où toute texture a disparu :

— formations argileuses blanches ou jaunes, plastiques en saison humide, à l'emplacement des micaschistes, avec individualisation et dislocation des quartz d'exsudation ;

— arènes, avec disparition ponctuelle de la biotite, raréfaction et fragilisation de la plupart des feldspaths et maintien de la muscovite, à l'emplacement des granites ; les grains de quartz représentent toujours 70 à 80 % des arènes ; l'altération s'y marque à l'échelle microscopique par l'abondance des figures de dissolution à la surface des grains.

Les coupes les plus complètes révèlent l'organisation « *per descensum* » classique, des altérations météoriques. Toutefois beaucoup d'autres profils témoignent d'une grande irrégularité d'épaisseur et de multiples variations latérales de faciès, responsables d'une juxtaposition d'altérites de différents types à l'affleurement. Ces variations tiennent à divers facteurs signalés par ailleurs (Paquet, 1969 ; Millot, 1971) et que nous

Degré	n°	Caractéristiques		
Altération atténuée	1	Roche résistante, cohérente, plus ou moins décolorée, avec mise en évidence des joints		
Altération Différentielle	2	Roche décolorée, élargissement des plans de schistosité, blocs et plaques (roches cristallophylliennes), boules (granites).		
	3	Roche fragmentée avec alternance de passées débitées ou profondément altérées (argilisation des feldspaths en cours) et de passées plus cohérentes.		
Altération Généralisée	4	Texture visible, effritement, argilisation poussée (feuilletage, arénisation)		
	5	Pas de texture visible - Argilisation quasi totale des feldspaths	a	Roche mère micaschisteuse = argiles et quartz d'exsudation individualisés
			b	Roche mère granitique : arène

Tabl. I. - Typologie des altérites en fonction du degré d'altération.
Alteritis typology according to their alteration degree.

N° de Groupe Morphosédimentologique	N° Echantillons	Localisation	Roche mère	Cote m (0 surf.)	Degré d'Altération	Dénomination et Age approximatif
1	GV 20	Bas Vernay Plateau Nantais	Granite	- 1	4	Altérites de la surface fondamentale enfouie sous pliocène (Post-Crétacé Anté-Pliocène)
	SR 30	La Madeleine Plate-forme de Carquefou	Micaschiste	- 1,5	4	
	CS 3	La Billiais Deniau Plateau Nantais	Granite	- 1	4	
	CS 4	Le Temple Plateau Nantais	Micaschiste	- 1	4	
	SR 29	Le Bois Macé N Plateau du Cellier	Gneiss	- 1,5	4	
	HV 90	Le Bois Macé S Plateau du Cellier	Gneiss	- 1	5	
	HV 91	La Maladrerie Plateau du Cellier	Gneiss	- 1	5	
3	NT 22	La Primaïs Glacis d'Héric	Micaschiste	- 1	4	Altérites de glacis et replats (Pliouaternaire et héritage post Crétacé)
	GV 42	Valais Replat du Gesvres	Micaschiste	- 0,5	3	
	GV 22	Garambeau Replat du Gesvres	Micaschiste	- 1	5	
5	GV 28	La Ménardais Plateau Nantais	Micaschiste	- 1	4	Altérites des cuvettes prépliocènes enfouies sous sables pliocènes
	GV 1	La Barre Replat du Gesvres	Micaschiste	- 2,5	5	
6	GV 16	Vigneux Vallée du Gesvres (Amont)	Micaschiste	- 1,2	3	Altérite de tête de vallon récent (Post Mindel)
	GV 46	Le Tertre Vallée du Gesvres (Aval)	Micaschiste	- 1,2	3	Altérite de fond de vallon récent (Holocène)

Tabl. II. - Caractéristiques générales des échantillons types d'altérites.
Alteritis typical samples, general characters.

N° de Groupe Morphosédimentologique	N° Echant.	Localisation	Substrat	Cote m (0 surface)	Dénomination et age approximatif
2	GV 29	La Ménardais	Micaschiste	- 1	Formation de transition Altérite - Sable rouge
	GV 31	La Ménardais	Micaschiste	- 1	
	GV 19	Bas Vernay	Granite	- 1	
	SR 8	Chemin Nantais	Micaschistes	- 2	
4	GV 3	La Barre	Micaschistes	- 2	Nappes caillouteuses détritiques très grossières Continentales (Pleistocène)
	GV 6	La Fronnière	Micaschistes	- 3	
	NT 20	L'Alnay	Micaschistes	- 1	
7	SB 15	La Petite Pouillonais	Granite	- 0,5	Limonis éoliens (Würm)
	NT 2	Malabry	Micaschistes	- 0,5	
	HV 11	Brianterie	Micaschistes	- 0,5	

Tabl. III. - Caractéristiques générales des échantillons types de sédiments.
Sediments typical samples, general characters.

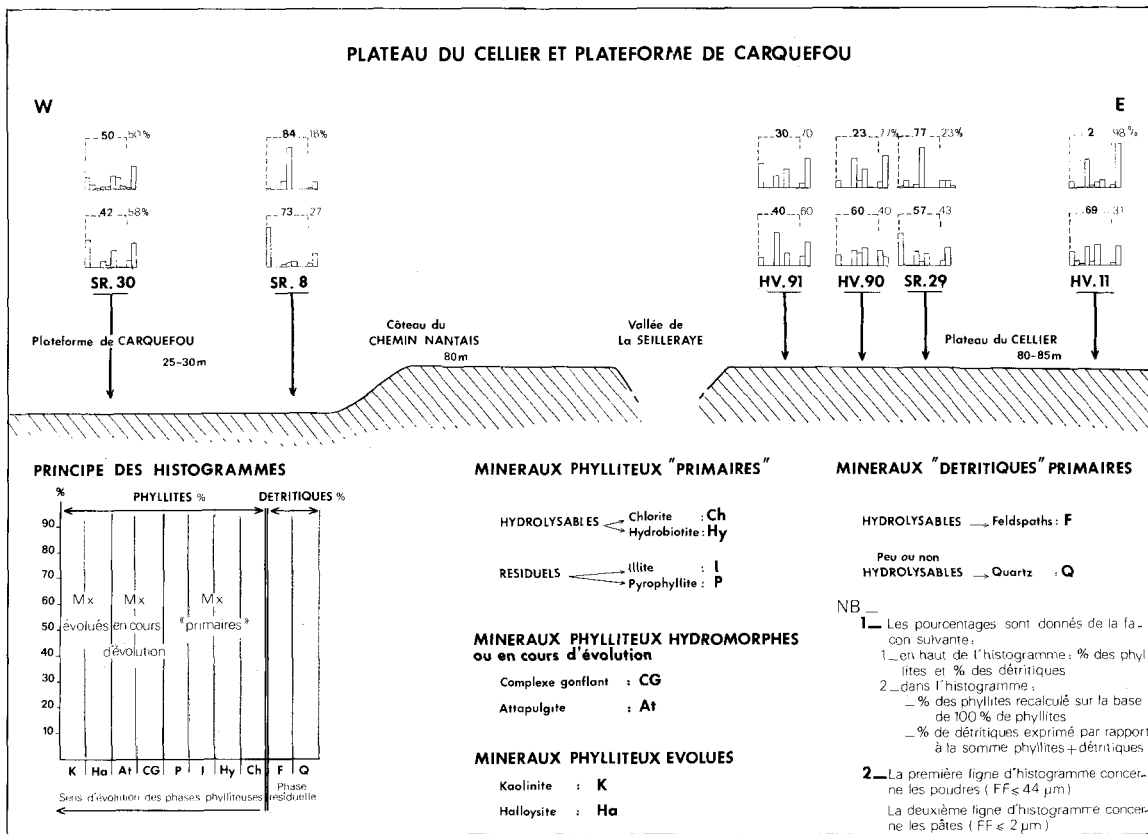


Fig. 3. - Profil topographique, localisation des échantillons types et histogrammes minéralogiques (Région du Cellier - Carquefou - Coupe C.D., fig. 2).
 Topographic cross-section with sample types location within their mineralogical histograms (Cellier - Carquefou area - C.D. Cross section, fig. 2).

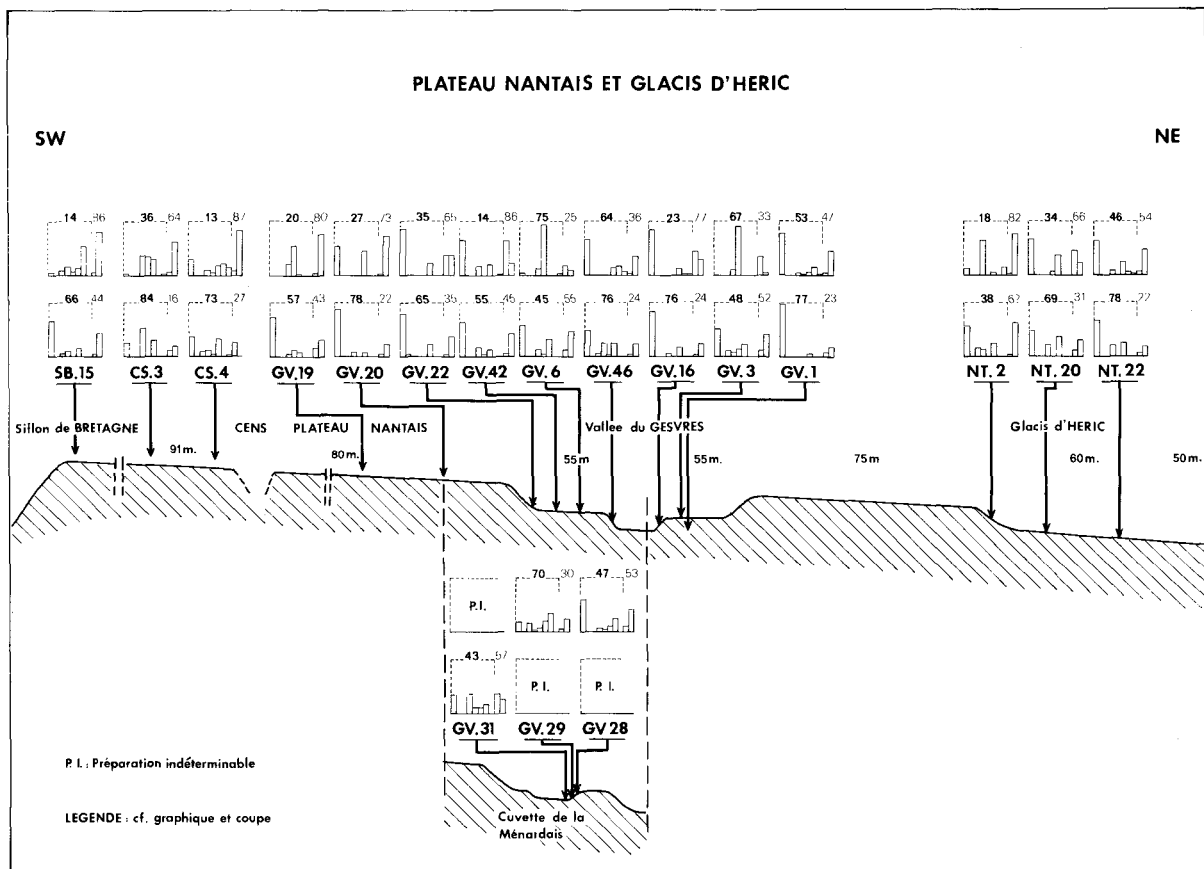


Fig. 4. - Profil topographique, localisation des échantillons types et histogrammes minéralogiques (Région du plateau nantais - Héric - Coupe A.B., fig. 2).
 Topographic cross-section with sample types location within their mineralogical histograms (Plateau Nantais - Héric area - A.B. Cross section, fig. 2).

retrouvons ici. A la lithologie tout d'abord : l'altération est plus profonde et plus générale dans les micaschistes, plus accomplie mais plus superficielle dans les granites. Elles tiennent aussi à la tectonique : le socle du Pays nantais a enregistré une longue et complexe suite d'événements tectoniques responsable de fracturations, d'inégale densité, où les plans de fractures constituent des axes de pénétration pour l'altération préférentielle. La combinaison d'une altération hydrothermale à l'altération météorique se manifeste très fortement près des accidents majeurs, comme la Zone Broyée Sud-Armoricaine. Ces variations tiennent enfin à l'évolution paléogéographique de la surface fondamentale. Cette évolution résulte de l'interférence de plusieurs processus. D'abord, les conditions de drainage qui modifient la progression de l'altération elle-même (un bed-rock perméable accélère celle-ci, un manteau d'altération épaissi peut la freiner). Les fluctuations climatiques ensuite, et leurs modifications locales (pluviosité, régime des vents...). Enfin, les variations de l'intensité de l'érosion au cours du temps en fonction des modifications du niveau de base.

Les altérites de la surface fondamentale du Pays nantais sont largement représentées dans le Massif armoricain. Milon (1936) les a globalement considérées comme les héritages d'une morphogenèse de type subtropical, principalement survenue à l'Éocène, à l'Oligocène et au Pliocène, aux dépens du socle armoricain. Dans la même ligne de pensée, Estéoule-Choux (1961, 1970) a montré que l'influence des « climats latérisants du Crétacé » a provoqué la formation d'un « épais manteau kaolinique » sur la surface post-hercynienne et que l'action de « climats très agressifs » s'est poursuivie pendant tout le Paléogène puisque des altérations supplémentaires se sont produites « jusqu'au Pliocène et au Quaternaire ». Klein (1959 a/b, 1970, 1974, 1985) a souligné pour sa part le caractère composite et hétérochrone de ce type de formations. C'est dire l'intérêt que présentait pour nous cette tentative, visant à mieux situer dans l'espace et le temps, les formes, les altérations et les produits d'érosion.

2) Minéralogie des altérites de la surface fondamentale (tabl. II, Échantillons du groupe 1 : altérites « découvertes », altérites « enfouies » et tabl. IV a/b).

L'étude minéralogique montre une grande dispersion des valeurs. Les minéraux non argileux varient de 16 à 60 % (pâtes *) et de 23 à 87 % (poudres *).

Les feldspaths sont très inégalement hydrolysés ; d'après l'examen des pâtes, ils semblent relativement préservés dans les gisements à forte hydromorphie (HV91 indice : 4, CS3 indice : 2,6). Il en résulte un taux de kaolinisation généralement modéré des fractions fines puisque la kaolinite ne dépasse pas 57 % (SR29) et descend même à 15 % (HV91). Corrélativement, le complexe gonflant est très bien représenté dans ce groupe (10 à 60 %), surtout dans les horizons hydromorphes précités (HV91-CS3). Ces observations valent surtout pour les altérites découvertes.

* Nous appellerons « pâtes » les fractions ayant la taille granulométrique des argiles ($\varnothing \leq 2 \mu\text{m}$) et « poudres » les fractions ayant la taille granulométrique des silts ($\varnothing \leq 44 \mu\text{m}$).

Pour les « altérites enfouies » sous Pliocène, donc pré-pliocènes, du type SR30 et GV20, les observations doivent être nuancées. Le fonds détritique est assez élevé dans les poudres (50 et 73 %) ; il baisse dans les pâtes sur substrat granitique (22 % contre 58 % sur substrat micaschisteux). La kaolinisation est très poussée (95 % des FF ≤ 2 microns) en milieu granitique bien drainé (GV20) et limitée (55 % de kaolinite contre 32 % d'illite et 13 % de CG) en milieu micaschisteux mal drainé (SR30).

Le rapport G/K des altérites du groupe I (tabl. IV b) est assez élevé (0,1 à 1), plus fort que l'ensemble des autres types d'altérites du Pays nantais (G/K $\leq 0,2$).

L'indice de cristallinité de l'illite est très mauvais pour les altérites découvertes (5 à 8), meilleur pour les altérites enfouies (3,5-4).

Parmi les minéraux argileux « accessoires », on soulignera la présence de la pyrophyllite dans les poudres, très abondante pour certains échantillons (SR29, CS3, HV90) sur substrat granitique, où elle représente un minéral primaire en général très résistant, que l'on retrouve parfois même dans les pâtes (HV90, SR30, CS4). Les palygorskites, plus discrètes (CS4, SR30), semblent correspondre à des intercalations de niveaux serpentiniteux et/ou amphibolitiques sous-jacents conformément aux observations de Caillère et Hénin (1963) et Caillère (1936).

B. Les sables rouges des plateaux

1) Caractéristiques sédimentologiques générales (tabl. III, groupe 2).

Des sables affleurent ponctuellement, sur quelques décimètres ou quelques mètres, sur la surface fondamentale du Pays nantais, principalement sur le Plateau nantais (fig. 1). Ils couvrent également de vastes étendues sur la plate-forme de Carquefou, sans atteindre cependant les épaisseurs connues (60 m à 80 m) dans les bassins d'effondrement tertiaires périphériques (Saffré, Nort, Petit-Mars ; Durand, 1960 ; Margerel, 1977 et 1979). Sauf cas particuliers qui seront explicités ci-dessous (La Ménardais), ils demeurent absents des glaciaires et replats-glaciaires emboîtés dans la surface fondamentale.

Il s'agit de sables blancs, jaunes ou ocres, feldspathiques (les feldspaths sont altérés et décolorés) et argileux (les fractions inférieures à 50 microns varient entre 14 et 27 % avec une moyenne de 22 % calculée sur une dizaine d'échantillons de référence) ; la biotite en est absente ; la muscovite y est inégalement répartie. La granulométrie des fractions sableuses se rapporte à des classements souvent rencontrés parmi les sables marins (indice de Trask de 1,8 en moyenne), avec des médianes comprises entre 190 et 640 microns. La morphoscopie confirme l'environnement marin où se sont trouvés les sédiments, mais révèle l'hétérogénéité de leurs composants et une évolution littorale incomplète. Les N.U. sont rares. Les E.L. sont peu abondants : 30 à 44 % dans les fractions supérieures à 500 microns de certains échantillons, mais plus généralement 10 à 20 % (GV19, SR8). Les sub-angleux forment donc l'essentiel des grains : 56 à 80 %.

Ces sables rouges du Pays nantais, imparfaitement émoussés, semblent résulter de la combinaison de deux stocks sédimentaires : des sables marins pliocènes directement produits par la mobilisation d'altérites locales, qui seraient représentés par les sub-anguleux et des sables pré-pliocènes, remaniés, représentés par les E.L. les mieux élaborés.

L'analyse exoscopique des grains de quartz révèle, en effet, des traces d'érosion s'apparentant au façonnement de sables marins intertidaux. Les phénomènes observés traduisent une évolution complexe marquée par plusieurs phases de précipitation et de dissolution successives. La présence de pellicules et de coulées de silice amorphe, pourrait caractériser une altération postérieure au dépôt des sables, mais pourrait résulter aussi d'une précipitation de silice et de fer en milieu margino-littoral (Barbaroux *et al.*, 1972 ; Le Ribault, 1976 ; Barbaroux, 1980).

2) Minéralogie des sables rouges (tabl. III, groupe 2 et tabl. IV a/b)

Il faut distinguer deux types extrêmes du point de vue de la composition minéralogique ; ils ont toutefois, en commun, un indice de cristallinité de l'illite très mauvais ($na = 8$).

a) Sables rouges de base (GV19 - SR8 - GV29)

Avec tous les termes de transition altérites-sables, qu'il est parfois difficile de distinguer, ces niveaux de base sont le plus souvent indurés par ferruginisation (*cf.* § E 1/2).

Dans les poudres, un fonds détritique variable, plus faible que dans les altérites, privilégie toujours le quartz ($F/Q = 0,01$ à $0,03$). La kaolinite et l'illite sont faiblement représentées et l'on observe par contre une teneur élevée en minéraux primaires résistants (pyrophyllite dans les sables de base) et même fragiles (hydrobiotites dans les niveaux de transition altérites-sables).

Dans les pâtes, les minéraux varient moins (27 à 43 %) et la part des feldspaths augmente ($F/Q = 0,2$ à $0,5$). La kaolinite domine (75 à 80 %) et la teneur en gibbsite est faible ($G/K \approx 0,1$).

b) Sables ocre à jaune (GV31)

Pour ces dépôts situés dans la partie supérieure du Pliocène, nous ne disposons que d'analyses sur pâtes.

Le fonds détritique est plus important (57 %), au bénéfice des feldspaths ($F/Q = 1,1$), le complexe gonflant y est bien représenté (33 %) et on note la persistance de minéraux primaires fragiles (hydrobiotite) avec cependant un taux de gibbsite élevé ($G/K = 1,1$).

C. Glacis et replats-glacis

1) Caractéristiques générales (tabl. I, groupe 3)

Au nord du Pays nantais, le Glacis d'Héric forme un vaste plan laniéré incliné vers le nord et le nord-est (57 à 25 m). Il s'emboîte de 5 à 15 m dans la surface

fondamentale et se poursuit vers le sud-est par le Glacis de la Chapelle-sur-Erdre, d'altitude et d'emboîtement similaires (fig. 1). Une vingtaine de replats-glacis (de 65 - 60 m en amont à 50 - 40 m en aval) s'encaissent de 10 à 20 m dans la surface fondamentale le long de la haute et moyenne vallée du Gesvres. L'ensemble de ces replats détermine un palier topographique d'une quinzaine de kilomètres de longueur qui s'inscrit parfaitement dans le prolongement de celui du Glacis de la Chapelle-sur-Erdre.

Des replats analogues existent plus au nord, le long de l'Hocmard et plus au sud, le long du Cens et de la Chézine. L'élaboration de ces reliefs à partir de niveaux de base périphériques (bassins de Saffré, Nort et plate-forme de Carquefou), ne se conçoit qu'en fonction d'un système morphogénétique où prime l'érosion aréolaire et d'un épisode morphoclimatique de type rhexistatique probablement semi-aride, comme il a pu s'en produire au Plio-Quaternaire ou au Quaternaire Ancien. Le terme de glacis peut donc leur être appliqué dans son sens génétique.

Le développement des phénomènes d'altération à la surface des glacis et replats-glacis se situe à un degré intermédiaire entre celui de la surface fondamentale et celui des versants de vallées. Il se manifeste essentiellement par des altérites de types 3 ou 4, épaisses de 1 à 4 m au maximum, qui ne se présentent d'ailleurs qu'à l'état relictuel. De nombreux horizons sont tronqués. Ces altérites sont probablement, elles aussi, polygéniques et hétérochrones. Elles associent les produits de morphogénèses altérantes (postérieures à l'élaboration des glacis) aux racines des altérites de la surface fondamentale. C'est aux dépens de ces dernières que s'est effectuée la glaciplanation.

2) Minéralogie des altérites des glacis et replats-glacis (tabl. I, échantillons du groupe 3, et tabl. IV a/b)

En ce qui concerne les poudres, la teneur en détritiques est moyenne, du même ordre que celle des altérites de la surface fondamentale, avec davantage de feldspaths ($GV42 = 64$ %). Dans les pâtes, il semble par contre y avoir une non-fragmentation, ou une destruction plus poussée des feldspaths (≤ 5 %, avec $F/Q = 0,1$ à $0,2$). Ces altérites se distinguent par un coefficient d'hydromorphie faible ($0,3$ à 0), un indice de kaolinisation fort ($3,4$ à $4,2$), avec dans les pâtes 62 à 77 % de kaolinite, mais régulièrement associée à des halloysites. La teneur en gibbsite est infime ($G/K \leq 0,06$). Le taux de cristallinité de l'illite est bon (2 à 3).

D. Nappes caillouteuses des glacis et replats-glacis

1) Caractéristiques générales (tabl. II, groupe 4)

Les glacis et replats-glacis supportent des nappes caillouteuses rouges qui en représentent les formations spécifiques, jusqu'ici rapportées indistinctement au Pliocène. Nous insistons sur les caractéristiques très différentes de ces dépôts. Ils recouvrent la plupart des

	Groupe Morpho-sédimentologique	N° Echant.	DETRITIQUES %		MINÉRAUX						PHYLLITEUX %				F/Q	
			Q	F	Σ	Cardinaux					Accessoires					
						K	I	C	M	CS	HydroB.	Ha	Py	At		
ALTERITES	1	SR 30	45	5	50	15	29	6	6	-	23	10	6	5	0,09	
		GV 20	70	3	27	55	45	-	-	-	-	-	-	-	0,04	
		CS 3	60	4	36	tr	20	tr	36	-	tr	-	35	-	0,06	
		CS 4	80	7	13	29	19	16	10	-	21	-	5	tr	0,09	
		SR 29	3	20	77	tr	-	-	4	-	-	-	10	86	-	6
		HV 91	60	10	30	43	35	-	22	-	-	-	-	-	-	0,16
		HV 90	67	10	23	12	30	-	26	20	tr	-	12	-	-	0,14
	3	GV 42	22	64	14	63	19	tr	-	18	-	-	-	-	2,9	
		NT 22	46	8	36	60	25	tr	10	-	5	-	tr	-	0,16	
		GV 22	33	32	35	83	17	tr	-	-	-	-	-	-	1	
	5	GV 28	43	10	47	59	10	tr	5	-	22	-	3	-	0,2	
		GV 1	45	2	43	74	7	tr	2	-	15	-	tr	-	0,04	
	6	GV 16	25	52	23	82	10	tr	-	-	-	-	-	-	2,5	
		GV 46	34	2	64	65	15	6	tr	-	14	-	-	-	0,06	
FORMATIONS TRANSPORTÉES	2	GV 29	24	6	70	18	21	-	tr	-	34	-	9	18	0,25	
		GV 19	78	2	20	tr	tr	-	4	21	-	-	73	-	0,03	
		SR 8	15	tr	84	tr	tr	-	7	10	-	-	83	-	0,01	
	4	GV 3	tr	33	66	-	-	-	10	-	-	-	90	-	10	
		GV 6	10	5	85	-	-	-	10	-	-	-	90	-	0,5	
		NT 20	22	44	54	66	40	-	tr	-	-	-	4	-	2	
	7	SB 15	80	6	14	5	14	tr	16	-	51	-	5	9	0,07	
		NT 2	78	4	18	11	6	15	35	27	-	-	6	-	0,05	
		HV 11	92	6	2	15	8	12	32	24	-	-	3	-	0,06	

Tabl. IV a. - Minéralogie des poudres ($FF \leq 44 \mu\text{m}$, Rayons X).
Powers mineralogy ($FF \leq 44 \mu\text{m}$, X Rays).

replats de l'Hocmard et du Gesvres, affleurent au sud du Glacis d'Héric et sur celui de la Chapelle-sur-Erdre, sont rares ou absents sur les replats du Cens et de la Chézine (fig. 1). Leur épaisseur visible, très variable (3 à 10 m), est plus réduite dans la région d'Héric. Ils ne comportent pas de litage mais peuvent présenter un certain tri granulométrique local (La Barre, Le Pérou). Le matériel est hétérogène (quartz et micaschistes, anguleux ou émoussés) et hétérométrique : argiles, sables, cailloux, blocs (atteignant parfois plus de 20 cm de longueur).

Les médianes granulométriques calculées à partir d'une dizaine d'échantillons de référence, varient de 1,3 à 38 mm, avec une moyenne de 18 mm. Les galets ($\emptyset > 2 \text{ cm}$) représentent 41 à 48 % des stocks examinés ; ils associent des quartz et des micaschistes anguleux ou peu émoussés. La proportion des graviers (2 mm à 2 cm) varie de 11 à 38 %. Celle des sables, toujours inférieure à 12 %, est généralement fonction de celle des graviers, surtout des graviers E.L. La matrice argileuse forme 3 à 24 % des dépôts.

L'analyse morphoscopique des fractions grossières (plus de 2 mm) montre que les N.U. sont prépondérants parmi les galets (60 à 80 %), comme parmi les graviers

(40 à 82 %) et que les E.L. sont très rares parmi les galets, mais toujours présents parmi les graviers avec des taux de 5 à 50 %.

Les nappes caillouteuses sont des formations détritiques d'origine continentale, accumulées à la suite de transports très courts, comme le montrent leur granulométrie (associant des matériaux très grossiers à une matrice argileuse parfois abondante) et leur morphoscopie (remarquable par l'abondance des éléments anguleux tant quartzueux que micaschisteux). Elles remanient deux types de matériaux : des quartz d'exsudation, débris de micaschistes et argiles, livrés par une mobilisation des altérites de la surface fondamentale, lors de la genèse des glacis et replats-glacis, ainsi que des sédiments marins tertiaires, partiellement pliocènes, sables et graviers, dont la perfection de l'émoussé contraste toujours avec les formes anguleuses des autres éléments.

Ces nappes sont postérieures au Pliocène. Leurs conditions de gisement sur un palier topographique, emboîté dans la surface fondamentale, elle-même ponctuée de sables pliocènes, et leur sédimentologie associant les produits du remaniement des altérites de la surface fondamentale et de dépôts pliocènes le mon-

MINÉRAUX ARGILEUX DES ALTÉRITES ET DES SÉDIMENTS PLIOCÈNES ET QUATÉNAIRES

Nature des formations	Groupe Morphosédimentologique	N° Echantillons	DETRITIQUES %		MINÉRAUX ARGILEUX (%)										RAPPORTS			
			Q	F	K	I	C	M	CJ	Ha	Py	At	na	F/Q	G/K	KM/CIHy	CG/K	
ALTERITES	1	SR30	48	10	42	55	32	-	-	13	-	tr	tr	3,5	0,2	0,1	2,1	0,23
		GV20	17	5	78	85	7	-	4	4	-	-	-	4	0,3	0,2	12,7	0,04
		CS3	10	6	84	20	28	-	24	28	-	-	-	5,5	0,6	0,5	1,6	2,6
		CS4	24	3	73	38	34	-	6	4	-	3	8	5	0,1	0,3	1,1	0,6
		SR29	32	11	57	57	20	-	9	14	-	tr	-	8	0,4	0,3	3,3	0,4
		HV91	42	18	40	15	25	-	30	30	-	-	-	8	0,4	1+	1,8	4
		HV90	16	24	60	16	30	-	4	20	-	20	-	6	0,7	0,5	0,65	1,5
	3	GV42	40	5	55	62	20	-	6	12	tr	tr	-	2,5	0,1+	0,06	3,4	0,29
		NT22	18	4	78	65	18	-	9	8	tr	-	-	3	0,2	0,01	4,1	0,26
		GV22	32	3	65	77	18	-	-	-	5	tr	-	2	0,1	0	4,2	0
	5	GV1	17	6	77	95	5	-	tr	tr	-	-	-	4	0,02	0,001	19	0,003
		6	GV16	22	2	76	82	13	tr	5	tr	-	tr	-	2	0,1	0,1	8,7
	GV46		22	2	76	48	24	-	24	tr	-	tr	3	2	0,1	0,1	3	0,5
FORMATIONS TRANSPORTÉES	2	GV19	29	14	57	75	12	-	5	-	-	8	-	8	0,5	0,1		
		SR8	22	5	73	81	7	-	3	-	-	7	-	8	0,2	0,1		
		GV31*	23	34	43	32	10/15	-	17	16	-	10	-	8	0,14	1,1		
	4	GV3	40	12	48	50	20	-	7	-	-	13	10	3,5	0,3	0,2		
		GV6	45	10	45	57	30	-	13	-	-	tr	-	4,5	0,2	0,1		
		NT20	25	6	49	46	36	-	18	-	-	-	tr	6	0,8	0		
	7	SB15	40	4	56	66	16	-	3	7	-	-	8	4	0,1	0,03		
		NT2	60	2	38	55	22	-	10	-	-	tr	13	6	0,05	0,04		
		HV11	20	tr	69	26	32	-	17	11	8	6	tr	5	0,03	0		

Tabl. IV b. - Minéralogie des argiles (pâtes lissées, $FF \leq 2 \mu m$, Rayons X)
Clays mineralogy (smoothed pastes, $FF \leq 2 \mu m$, X Rays).

trent. Elles résulteraient d'une crise rhexistatique importante qui est peut-être contemporaine de la glaciaplanation survenue au Quaternaire ancien. Elles constituent les formations corrélatives des glacis et replats-glacis.

Ces nappes portent les marques d'une puissante altération postérieure à leur dépôt ; les quartz sont patinés, rubéfiés et cariés ; de nombreux galets et graviers se débitent sur place en esquilles ou aiguilles au simple toucher ; la matrice argileuse est également rubéfiée et les débris de micaschistes, décolorés et friables, présentent un état de délabrement poussé, nécessairement postérieur à leur transport.

Les analyses exoscopiques montrent que les grains N.U. et E.L. ne comportent pas de figures phénomorphiques d'origine mécanique abondantes, ce qui confirme la brièveté des transports subis par les nappes. Les traces de précipitations siliceuses sont absentes ou très rares. Les figures de dissolution (surfaces lisses, vermiculations, caries, rhombes) sont au contraire particulièrement développées et constituent les éléments les plus caractéristiques de ce type de sédiment. Cette corrosion des sables confirme l'influence d'une phase climatique fortement altérante survenue à la suite

du dépôt des nappes et *a fortiori* de celui des sables rouges, donc post-pliocène. Le fait que cette déstabilisation géochimique se marque par des figures de dissolution sur les quartz des nappes, alors qu'elle se traduit surtout par des figures de précipitation sur les quartz des sables rouges, tient probablement aux conditions de gisement et de drainage propres à chacun des deux dépôts. Lors de la ou des phases d'altération, en raison de la pente des replats et glacis, de l'hétérogénéité des matériaux et d'une moindre teneur argileuse (12 % de particules inférieures à 50 microns), ces nappes ont constitué des milieux relativement bien drainés par des eaux sous-saturées en silice, donc favorables à la formation de figures de dissolution. En revanche, les affleurements de « sables » rouges, souvent plus argileux, correspondent à des dépôts mal drainés, dont les eaux sursaturées en silice, ont permis la formation de figures de précipitation.

2) Minéralogie des fractions fines des nappes caillouteuses des glacis et replats-glacis (tabl. IV a/b, groupe 4)

Les fractions fines sont très homogènes, avec un fonds détritique assez important (30 à 55 %), dominé

par les quartz dans les pâtes, mais par les feldspaths dans les poudres. L'association argileuse, où le minéral principal reste la kaolinite (46 à 57 %), est marquée par des quantités notables d'illite (20 à 36 %) la montmorillonite étant moins représentée (7 à 18 %). Une certaine hétérogénéité se manifeste toutefois avec la grande variabilité des indices de cristallinité de l'illite (GV3 : 3,5 ; NT20 : 6) et au niveau des minéraux accessoires où domine souvent la pyrophyllite ; ce minéral peut même atteindre des valeurs très élevées (90 %) au sein des poudres (GV3, GV6).

E. Les alvéoles pré-pliocènes (tabl. II, groupe 5)

1) Caractères généraux

La surface fondamentale du Pays nantais conserve les vestiges de modelés en creux qui ont précédé les phases ultimes de son élaboration. Aux abords des affluents de la Loire (Havre et Chézine) ou de l'Erdre (Gesvres et Cens), les contours de la surface décrivent des alvéoles, décelables par la morphologie, isolées (cuvette de la Loge au Moine, à l'est du Plateau nantais), alignées (vallée de la Chézine) ou coalescentes (vallée du Cens). Leur configuration et leur localisation sont parfaitement indépendantes du système de drainage actuel, le cas de la cuvette de la Loge au Moine, recoupée à angle droit par le tracé de la vallée du Havre, étant le plus démonstratif à ce sujet. Ces faits tendent à montrer que leur formation hérite d'une organisation de l'écoulement différente de l'actuelle et ne tient pas aux seuls agents de la morphogénèse fluviale.

Des formes semblables sont connues dans les massifs anciens [Bourgeat (1970), Poulvert (1971), Leneuf (1959), Levêque (1975), Millot (1971)]. Elles ont pu constituer des centres d'altération préférentielle, en même temps que des pièges à sédiments, au cours du Tertiaire. Il semble que les replats-glacis des vallées de l'Hocmard, du Gesvres, du Cens et de la Chézine résultent d'un approfondissement, d'un aplanissement, d'un élargissement et d'une éventuelle coalescence de ces alvéoles sous l'effet d'une érosion latérale, solidaire de la glaciplanation, propagée vers l'intérieur du Pays nantais, à partir des Glacis d'Héric et de la Chapelle-sur-Erdre. Mais l'action de cette glaciplanation a pu se trouver facilitée par une altération initiale du fond des alvéoles, lesquels auraient fonctionné alors comme des annexes des glacis précités, simples ou composites.

La surface des replats porte les traces d'une telle évolution et témoigne d'une irrégularité originelle du fond des alvéoles. Deux coupes, parmi d'autres, montrent que l'aplanissement des alvéoles s'est accompagné du recoupement de poches et de surcreusements remplis d'altérites blanches, distinctes des types précédents et fossilisés par des sables rouges.

Ainsi à la Barre, dans la moyenne vallée du Gesvres, un replat-glacis d'altitude 35 m supporte une nappe caillouteuse rouge de près de 10 m d'épaisseur (GV3), qui recouvre des argiles blanches fines, plastiques et épaisses de plus de 2 m (GV1) reposant elles-mêmes sur des micaschistes moins altérés (type 3 et 4).

De même, à 2 km en amont, le replat de la Ménardais (40 m) recoupe une poche de sables rouges d'un kilomètre de diamètre, actuellement ravinée par un affluent du Gesvres. Une coupe présente du nord au sud (fig. 4) :

- des micaschistes sains, tronqués par le plan du replat,
- des altérites prépliocènes de type 3/4 sur micaschistes (GV28) moulant le fond de l'alvéole à partir duquel se sont développés les replats-glacis de la vallée du Gesvres,
- des argiles sableuses rouges, terme de transition entre les altérites précédentes, en place, et les dépôts ultérieurs (échantillon GV29),
- une couche de sables grésifiés sur quelques décimètres d'épaisseur,
- des sables rouges, épais de plusieurs mètres, qui ont précédemment servi à définir les sables rouges du Pays nantais (échantillon GV31).

Toutes ces formations plongent de 30 - 35° vers le sud-ouest, alors que le versant qui les recoupe actuellement et qui ravine les rebords du replat-glacis ne s'incline que d'environ 10°.

Cette coupe fournit, entre autres, une nouvelle preuve de la postériorité des replats-glacis par rapport au Pliocène ; elle permet aussi d'expliquer l'enrichissement local de certaines nappes caillouteuses en sables et graviers émoussés d'origine pliocène ; elle démontre que la « glaciplanation » s'est effectuée à partir d'alvéoles, accidentées de poches de surcreusement, bourrées d'altérites ou de sables rouges ; elle explique la nécessité de relier formes et formations d'altération et de sédimentation, et justifie la méthodologie employée ici, ébauchée dans un travail antérieur (Barbaroux et Bousquet, 1976). Paquet (com. or. 1985) insiste toutefois, à travers l'expérience accumulée par l'équipe de l'U.L.P. en Afrique, sur l'existence possible d'« ombilics suraltérés » non liés à des critères morphogénétiques. Ces sortes de « puits de drainage » sont conditionnés pour l'essentiel par des caractéristiques particulières locales du substratum (non homogénéité structurale ou lithologique, variation de grain de la roche, filons, etc...), créant des discontinuités.

2) Minéralogie des altérites des alvéoles pré-pliocènes (tabl. IV a/b, groupe 5)

Dans les poudres, la teneur en détritiques est moyenne (47 et 53 %) mais favorise surtout le quartz. La kaolinite est relativement abondante (59 et 74 %) et les minéraux primaires présents sont fragiles (hydrobiotite).

Dans les pâtes ($\emptyset \leq 2$ microns), la teneur en minéraux non argileux est très basse, la kaolinisation est presque totale (GV1). Ces altérites semblent les plus évoluées de toutes celles étudiées ici. Le taux de gibbsite est très faible, ainsi que l'indice d'hydromorphie. L'indice de cristallinité de l'illite est moyen (environ 4). Une variation importante peut être perçue dans les termes de transition avec les sables rouges pliocènes fossilisant ces formations (GV29) (cf. § B2 a).

F. L'altération des versants de vallées (tabl. II, groupe 6)

1) Caractéristiques générales

Les versants qui ravinent les glacis et qui découpent les replats-glacis résultent d'une érosion fluviale exclusivement pléistocène. Leur commandement demeure partout inférieur à 40 - 50 m, en raison de la modération générale du relief. Leurs profils sont convexes ou rectilignes. Leurs pentes sont généralement faibles.

Les altérites de versants se distinguent de toutes les précédentes par un moindre degré d'accomplissement. Les altérites de types 2 et 3 dominant ; leurs épaisseurs sont faibles, jamais supérieures à 2 ou 3 m, souvent d'ordre décimétrique ; leur répartition est très inégale, en raison de la lithologie, et surtout des pentes qui ont entravé l'altération et favorisé les mouvements de masse. Il en résulte des profils tronqués et perturbés (solifluction, ruissellement...).

L'émoussé général des modelés fluviaux, la faiblesse relative des pentes, la fréquence des profils convexes écorcés ou atténués par ablation des altérites, la présence de tertres arrondis alternant avec des cuvettes d'origine endoréique en bordure des plateaux, sont autant d'indices de morphogénèses altérantes et d'épisodes biotasiques successifs qui pourraient être rattachés aux phases interglaciaires quaternaires. Les altérites de versants témoigneraient ainsi de la continuité du processus d'altération post-tertiaire.

2) Minéralogie des fractions fines des altérites de versants (tabl. IV a/b, groupe 6)

Le choix des échantillons s'est porté sur les profils les moins perturbés. L'indice d'hydromorphie est faible en tête des vallons (GV16) et plus élevé à l'aval des réseaux (GV46). Il existe donc deux types extrêmes d'altérites ; les premières ont une fraction argileuse peu importante (77 % de détritiques, dont 62 % de feldspaths), mais à dominante de kaolinite ; les secondes présentent davantage d'argiles (36 % de détritiques, en majorité des quartz), mais plus d'illite et de montmorillonite (48 % du total des argiles). Le rapport G/K reste identique dans les deux cas (0,1) ainsi que l'indice de cristallinité des illites ($n_a = 2$) ; cet indice est le plus faible des types d'altérites étudiées.

G. Les limons éoliens (tabl. III, groupe 7)

1) Caractéristiques générales

Les cartes géologiques relatives au Pays nantais mentionnent de vastes affleurements de « limons des plateaux », dont l'appellation ambiguë recouvre des produits d'altération et de véritables dépôts éoliens en proportions variables. Il apparaît que la représentation de ces « limons » est insuffisante si on la rapporte à des formations, même composites, à base d'altérites de type 5, ou au contraire excessive, si on comprend par là des

limons éoliens. L'instabilité des termes et des contours relatifs à ces formations illustre suffisamment les problèmes posés par leur détermination sur le terrain. L'analyse des argiles apparaît, à ce titre, un moyen privilégié.

Il existe sur le Plateau nantais (SB15), comme sur le Plateau du Cellier, des placages minces, discontinus et hétérogènes de sédiments limoneux qui peuvent être attribués à des processus éoliens. Les plus épais (40 à 70 cm) bordent sur plusieurs dizaines de kilomètres les terminaisons septentrionales de la surface fondamentale. Ils soulignent ainsi les pentes de raccordement de cette dernière avec le Glacis d'Héric (NT2) ou avec la dépression de la Loge au Moine (HV11). En occupant des sites d'abris ouverts au nord-est, ils traduisent l'influence de vents dominants de secteur Sud-Ouest (fig. 1-2).

Il s'agit de dépôts, gris ou beiges, meubles, contenant toujours plus de 80 % de particules fines inférieures à 50 microns (SB15 : 81 %, NT2 : 87 %, HV11 : 80,5 %). Leur contact avec les altérites sous-jacentes est parfois souligné par une surface de discontinuité ; la présence fréquente de nodules ferro-manganeux, qui peuvent être interprétés comme des cryoconites fossiles formées à l'intérieur de dépôts nivéo-éoliens, constitue un critère supplémentaire pour les différencier des altérites (Bousquet, Sellier, Sauvage, 1976).

La teneur en grains R.M., qui ne sont pas nécessairement contemporains des derniers dépôts, représente exceptionnellement 50 % de la fraction grossière. Elle demeure généralement faible (10 à 20 % de R.M. parfaits), même si on y ajoute les grains E.L. ou subanguleux éolisés (10 à 25 %) ; ceci s'explique par un rapport sables/limons défavorable au façonnement éolien des grains de quartz. L'analyse exoscopique de ces derniers révèle les croissants de chocs, les stries orientées et l'amorphisation superficielle, caractéristiques des émoussés éoliens.

2) Minéralogie des fractions fines des dépôts éoliens (tabl. IV a/b, groupe 7)

La caractéristique la plus marquante de ces dépôts est leur richesse exceptionnelle en poussière de quartz (82 à 98 % des poudres, 30 à 60 % des pâtes). La teneur en détritiques des pâtes varie du sud-ouest au nord-est. Les plus fortes teneurs en poussières de quartz s'observent parmi les limons situés au sud-ouest du Plateau nantais ; ces derniers sont, par ailleurs, les plus riches en minéraux argileux primaires (hydrobiotite) et s'enrichissent en kaolinite et illite vers le nord-est.

II. Tentative d'interprétation géodynamique

Observations préliminaires :

Les échantillons étudiés sont en petit nombre. Néanmoins ils peuvent être considérés comme représentatifs d'échantillons « moyens ». Les critères de sélection utilisés pour cette réduction des investigations analytiques

ques ont été exposés plus haut. Nous pensons ces critères suffisants pour étayer valablement l'argumentation qui va suivre. Nous en voulons pour preuve le bon accord de divers points de notre exposé avec plusieurs travaux antérieurs en ce domaine (et en particulier ceux de Tardy). Il reste évident que des analyses ultérieures pourront apporter d'utiles compléments et même modifier la portée de certaines de nos interprétations.

A. Principales familles minéralogiques

1) Minéraux primaires et minéraux évolués (fig. 5 à 7)

Deux diagrammes triangulaires ont été construits, l'un pour les poudres ($FF \leq 44$ microns), l'autre pour les argiles granulométriques ($FF \leq 2$ microns).

Ils comprennent les pôles suivants :

- Feldspaths + hydrobiotite,
- Quartz + pyrophyllite + micas,
- Autres minéraux (essentiellement argileux = montmorillonite, kaolinite).

Le premier pôle est celui des minéraux primaires fragiles, le second celui des minéraux primaires résistants, le troisième celui des minéraux argileux évolués.

a) Poudres ($FF \leq 44$ microns)

- Les altérites relèvent de trois ensembles (fig. 5) :

- celui où les minéraux primaires résistants sont dominants : altérites de la surface fondamentale (A) ;
- celui où les minéraux primaires fragiles sont abondants : altérites de milieux bien drainés prélevées sur les glacis ou replats-glacis ou sur les versants de vallées (B) ;
- celui où les minéraux argileux sont abondants et les minéraux primaires fragiles variables : ensemble comprenant, d'une part les altérites de cuvettes pré-pliocènes (minéraux primaires fragiles peu abondants), d'autre part les altérites de versants situés à l'aval des réseaux (minéraux primaires fragiles abondants) (C) ; ces deux familles ne se trouvent réunies ici que par convergence.

On parvient à un schéma d'évolution relativement simple. D'abord des altérites anciennes de type tropical, évoluées, non tronquées, enfouies et préservées, éventuellement suraltérées, riches en argiles ; on les trouve dans les alvéoles prépliocènes de la surface fondamentale ; ensuite ces mêmes altérites anciennes mais tronquées et lessivées ; enfin les altérites de glacis, replats-glacis et vallées récentes, où les minéraux primaires hydrolysables sont encore abondants et où l'évolution reste incomplète pour aboutir aux minéraux argileux.

A partir des mêmes fractions et du même diagramme, les sédiments détritiques s'analysent ainsi :

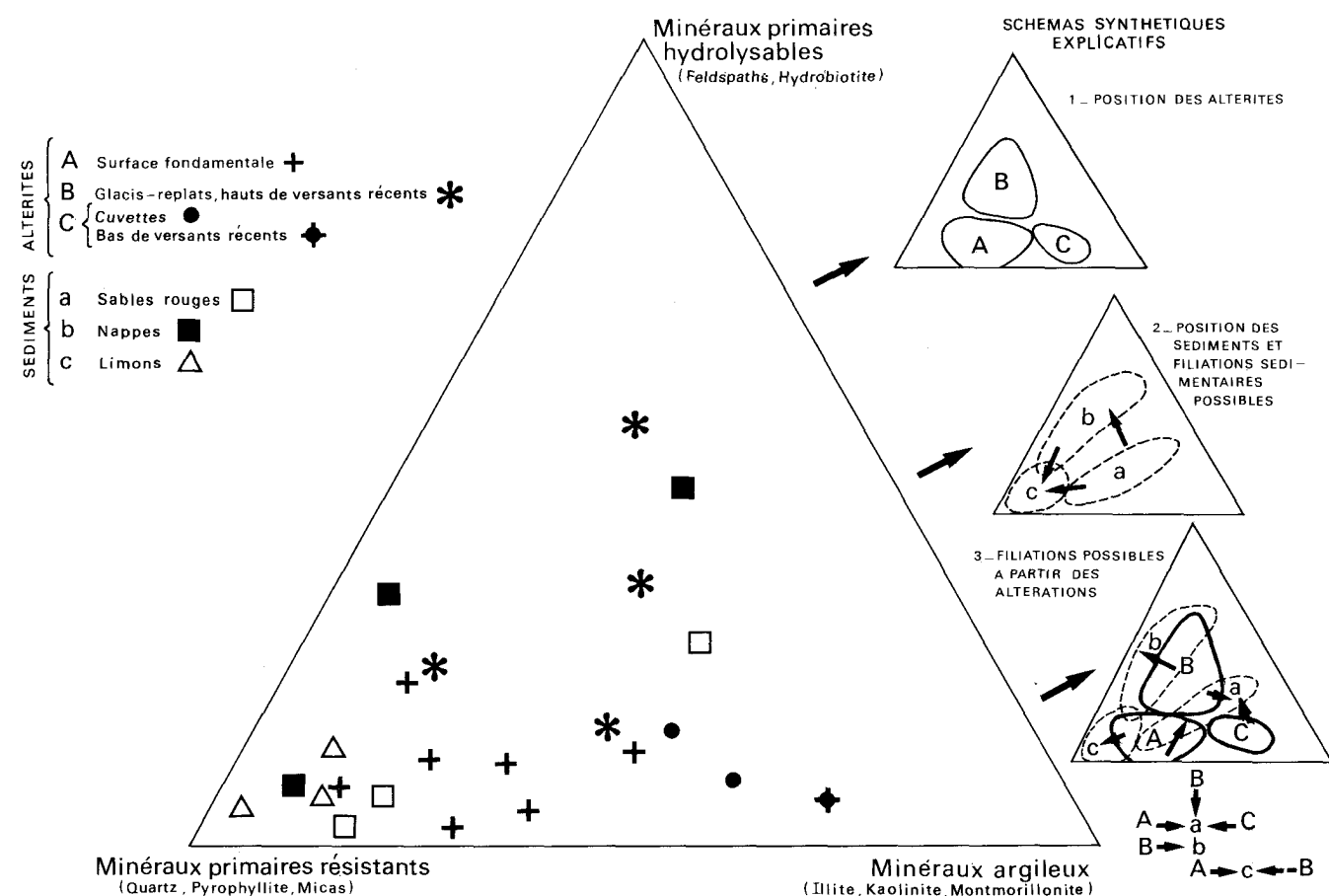


Fig. 5. - Diagramme triangulaire, Minéraux des poudres ($FF \leq 44 \mu m$) (Minéraux primaires résistants - Minéraux primaires hydrolysables - Minéraux argileux).

Triangular diagram. Powders mineralogy ($FF \leq 44 \mu m$) (Primary resistant minerals, Primary hydrolyzable minerals - Clay minerals).

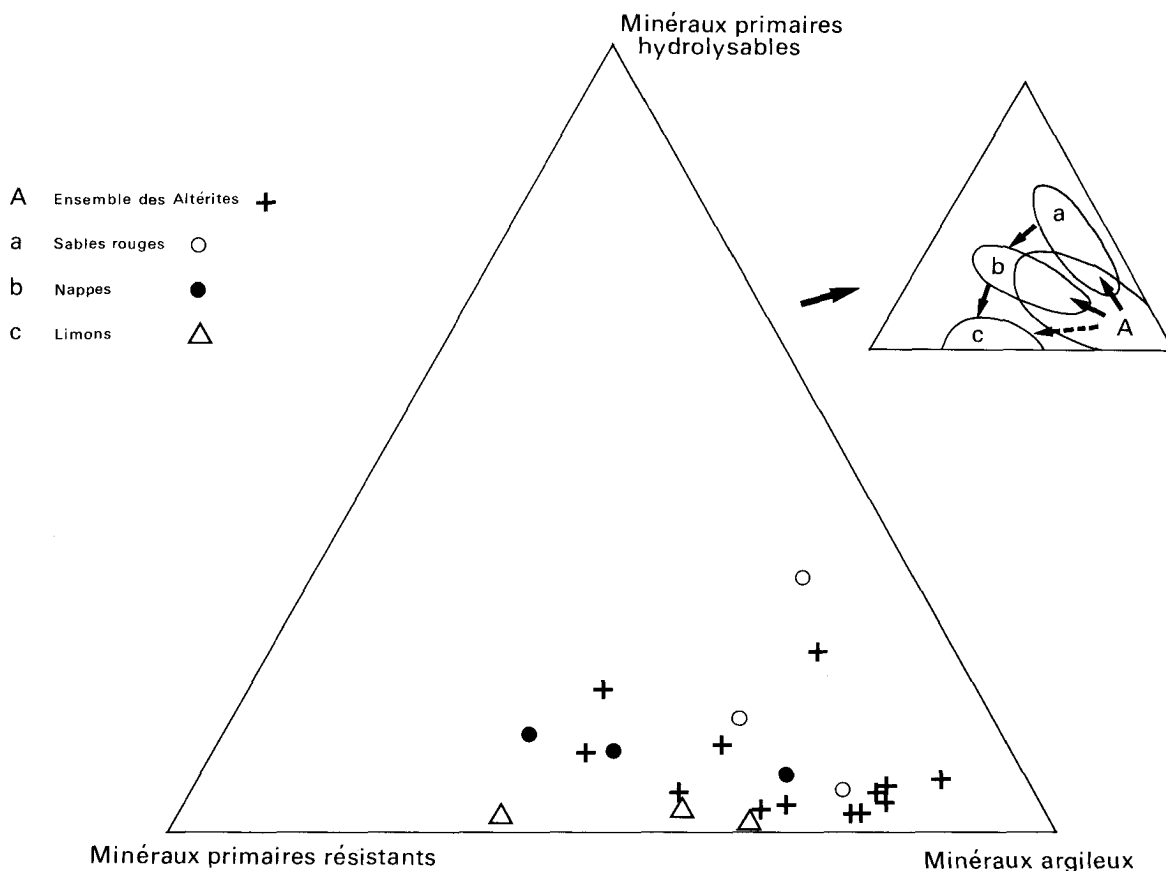


Fig. 6. - Diagramme triangulaire, Minéraux des pâtes ($FF \leq 2 \mu m$) (Minéraux primaires résistants - Minéraux primaires hydrolysables - Minéraux argileux).

Triangular diagram. Paste mineralogy ($FF \leq 2 \mu m$) (Primary resistant minerals, Primary hydrolyzable minerals - Clay minerals).

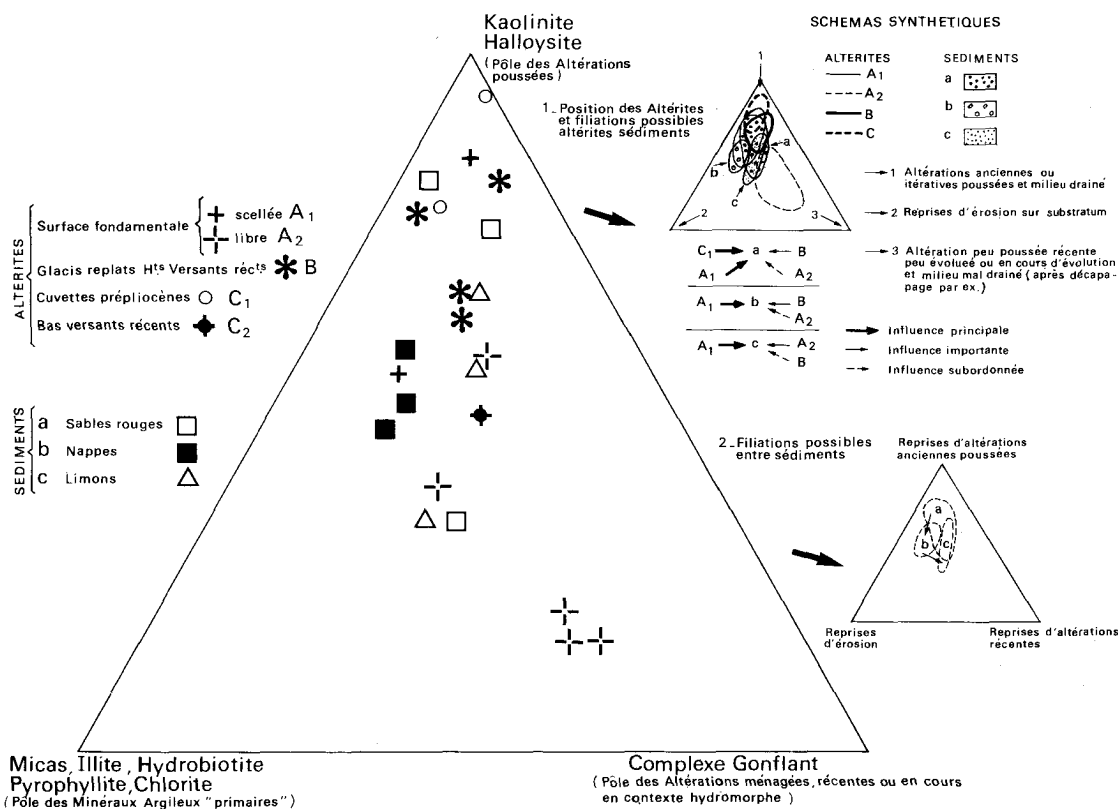


Fig. 7. - Diagramme triangulaire, Minéraux argileux (pâtes lissées $FF \leq 2 \mu m$) (« Primaires » clay minerals - Deep alteration clay products. Soft alteration clay products, hydromorphic context).

Triangular diagram. Clay minerals (smoothed pastes $FF \leq 2 \mu m$) (« Primary » clay minerals - Deep alteration clay products, hydromorphic context).

— les sables rouges pliocènes contenant les minéraux les plus évolués (a) hériteraient des altérites tronquées du type surface fondamentale, car ils contiennent les minéraux argileux que l'on retrouve, par ailleurs, dans les altérites des alvéoles prépliocènes préservées ;

— les nappes d'épandages caillouteux, les plus riches en minéraux fragiles, peuvent être considérées comme héritées des altérites de glacis et de replats-glacis (B) dont elles se rapprochent sur le diagramme (b), mais elles ont aussi subi une altération ultérieure ;

— les limons éoliens (c) proviennent de la déflation des altérites de surface fondamentale (A) et de glacis (B). Ils sont, comme elles, pauvres en argiles évoluées et riches en minéraux primaires résistants. La teneur en minéraux primaires, fragiles, diminue d'ouest en est, parallèlement à l'affinage des textures. Il y a donc lieu de souligner dans ce groupe un caractère évolutif avec éléments résiduels dominants à l'ouest et éléments fins, sélectionnés, accumulés vers l'est.

b) Pâtes (FF \leq 2 microns)

Le schéma se simplifie pour les argiles granulométriques, tout au moins en ce qui concerne la comparaison minéraux primaires/minéraux argileux (cf. § II A 1, fig. 6).

Les fractions fines des altérites sont généralement groupées vers le pôle argileux. Cependant celles de la surface fondamentale et des glacis sont parmi les moins bien évoluées. Ceci ne peut s'expliquer que si l'on admet :

— un décapage (pliocène ?) des formations altérées de la surface fondamentale perdant par ablation leurs horizons argilisés, avant reprise(s) d'altération ultérieure(s) ; les altérites de la surface fondamentale, dans ces conditions, ne peuvent être qu'hétérochrones ;

— une évolution incomplète et un façonnement rapide des glacis, en synchronisme avec l'édification des nappes caillouteuses, héritières de leurs matériaux argileux.

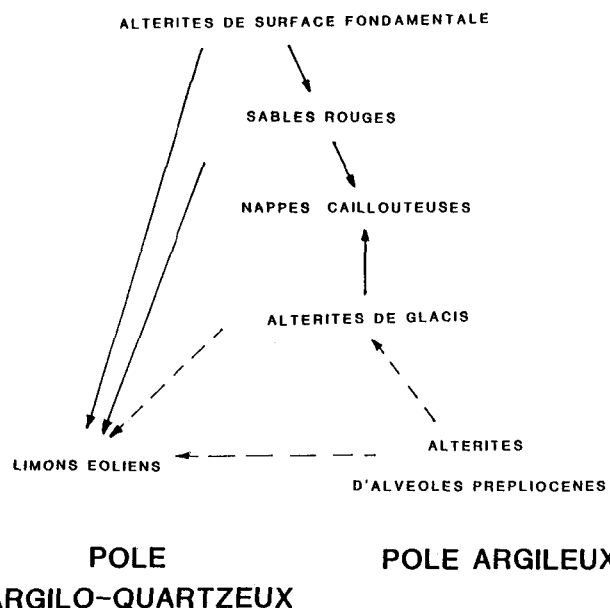
La place des argiles des sables rouges, à la fois riches en minéraux primaires fragiles, et en argiles évoluées, implique un processus d'alimentation par décapage des horizons profonds d'altérites prépliocènes. Les nappes, plus quartzeuses, ont pu hériter de reprises d'érosion plus brèves et plus locales, dans les altérites de glacis notamment.

Les limons, encore plus riches en poussières quartzeuses, signalent un nouveau décapage des formations précédentes, essentiellement des matériaux de la surface fondamentale, par déflation éolienne. C'est donc une attaque en « mosaïque » qui s'exprime ici.

Cette filiation s'exprimerait par le schéma suivant tel qu'on peut le déduire des observations de terrain et des données d'analyses. Elle impliquerait des reprises multiples des altérites et un héritage cumulatif, subsidiaire, pour les sédiments.

La rhexistase pliocène est très marquée. Elle représente une coupure sédimentaire majeure, avec un décapage profond et général, atteignant souvent la roche-mère sous-jacente aux altérations, comme l'indiquent les proportions importantes de feldspaths et d'hydrobiotite au sein des sables rouges. Lors de la mise en œuvre de ce processus et dans sa phase finale, les sables rouges de base (exemple type GV29) ont immobi-

POLE ARGILO-FELDSPATHIQUE



lisé le fer et la gibbsite disponibles. Alors, les sables rouges sus-jacents (exemple type GV31) ont pu paradoxalement recueillir à la fois les phyllites les plus résistantes (pyrophyllite) et les minéraux primaires les plus fragiles (feldspath), avec le mélange de deux stocks : argiles résistantes issues d'une longue évolution altérante et apports plus « frais » arrachés à la roche-mère.

Dans cette hypothèse, l'altération de la surface fondamentale aurait repris, au Pliocène, sur les racines d'altérites non enfouies et tronquées, donnant cette image de sédimentation (ou d'évolution) inverse (matériaux argileux évolués en dessous, matériaux de roche-mère fragiles et résiduels au-dessus) que l'on observe dans les sables rouges pliocènes. L'hypothèse est bien étayée par la morphologie des sables (§ B 1).

2) Les minéraux cardinaux des argiles et leurs enseignements (fig. 7)

A partir des enregistrements RX des pâtes, nous pouvons tenter de pousser plus loin l'analyse interprétative ébauchée dans le paragraphe précédent.

Nous avons regroupé les minéraux cardinaux en trois ensembles avec :

- un pôle des minéraux « primaires » peu ou pas évolués (micas, chlorites, pyrophyllite),
- un pôle des minéraux « secondaires » évolués en contexte hydromorphe (complexe gonflant),
- un pôle des minéraux « secondaires » évolués en contexte drainé (kandites).

A partir de là, nous analyserons d'une part les altérites en terme d'évolution *in situ* (altération, climat) et les formations sédimentaires transportées en terme d'évolution dynamique (tri granulométrique).

a) Minéraux argileux cardinaux des altérites. Parenté évolutive et hétérogénéité chronologique (fig. 7)

Les altérites enfouies sous le Pliocène ou réenfouies au Quaternaire, sont les plus évoluées, et toutes situées

près du pôle des Kandites à l'exception de SR30, tronquée avant enfouissement (A 1, C 1, fig. 7).

Les altérites libres de la surface fondamentale (A 2) sont nettement moins évoluées que les précédentes. Cependant, la dispersion est forte au sein de ce groupe, certaines sont plus évoluées (ex. SR29) que d'autres (ex. CS3, HV90), qui sont en cours d'évolution, ou en contexte hydromorphe, à interstratifiés et montmorillonite.

Les altérites des glacis sont intermédiaires (B évolution moyenne).

Les altérites de versants de vallées sont parmi celles qui contiennent le plus de minéraux argileux « primaires » (C 2).

Deux schémas évolutifs peuvent alors être tracés, matérialisant l'effet « mosaïque » des altérations.

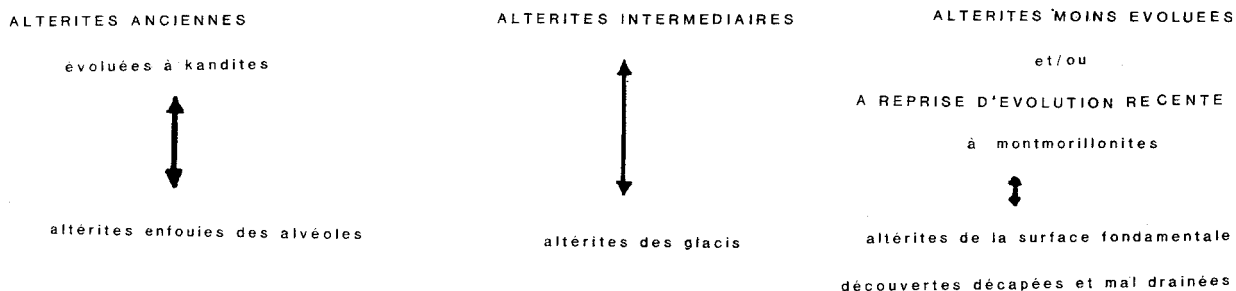
sont celles qui ont le plus de minéraux primaires non altérés. Ceci correspond à l'abondance de leurs niveaux phylliteux et à leur moindre granularité, empêchant la percolation des eaux et freinant la progression du front altérant.

b) Minéraux argileux cardinaux des sédiments (fig. 7.1 et 7.2)

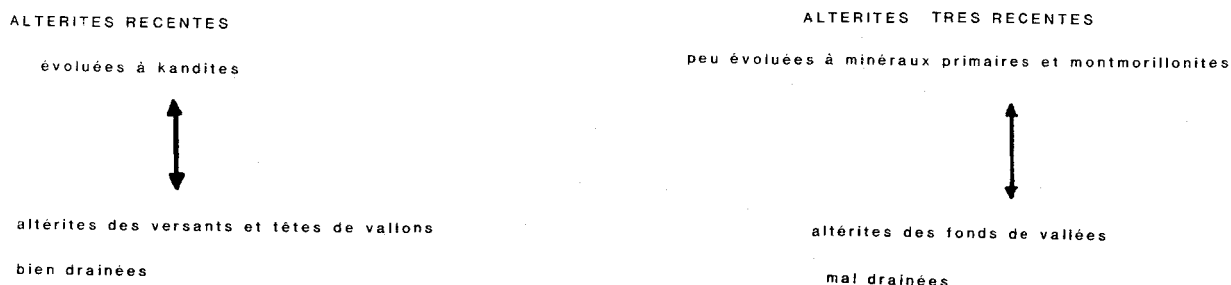
Les sables rouges sont, parmi les sédiments, ceux qui contiennent le plus de minéraux phylliteux primaires, signant un décapage profond du substratum. L'héritage est massif, à partir des altérites de la surface fondamentale, par « sédimentation inverse » (II. B dernier §).

Parmi les nappes, le pourcentage de kandites le plus élevé implique leur sélection par transport et une reprise d'altération avec héritage important à partir des

SUR PALEOFORMES (PRE PLATE-FORME)



SUR FORMES RÉCENTES (POST PLATE-FORME)



Du strict point de vue des argiles ($FF \leq 2$ microns), on voit qu'une altération quaternaire pourrait aboutir à une altérite aussi évoluée qu'une altération mésozoïque ou cénozoïque. L'altération serait donc « achronique » dans ses effets.

Toutefois, l'examen conjoint des poudres et l'évaluation des minéraux « primaires » (§ II A 1) permettent de distinguer les altérites anciennes, épuisées en feldspath et hydrobiotite, des altérites plus récentes, où la réserve en minéraux hydrolysables reste importante. Ceci explique les formes de convergence signalées entre ces fractions fines des altérites d'alvéoles pré-pliocènes (C 1) et celles des altérites de versants (C 2) (§ II A 1 a).

En examinant à cet égard le rôle subsidiaire de la roche-mère, il semble que les altérites sur micaschistes

altérites de glacis, confirmé par les données de l'analyse texturale (§ D 1) et l'étude des minéraux des poudres (§ A 1).

Les limons participent des deux groupes précédents, par leur composition mixte et un déplacement vers le pôle montmorillonitique. Ils résultent d'une reprise des altérites et d'un tri granulométrique lors du transport éolien. Si l'on en juge par la chute régulière des teneurs en hydrobiotite et par l'augmentation simultanée de montmorillonite du sud-ouest vers le nord-est, la montmorillonite des limons ne provient pas d'une altération récente. L'analyse des argiles confirme donc une influence déterminante de vents dominants du sud-ouest au cours des périodes froides les plus récentes du Quaternaire (§ G 1), influence déjà suggérée par l'analyse morphologique.

Les schémas synthétiques (fig. 7.1 et 7.2) illustrent l'enchaînement et l'organisation de ces altérations et de ces héritages selon notre interprétation.

3) Les minéraux argileux accessoires et leurs enseignements (tabl. IV a-b)

a) Dans les altérites

Les minéraux accessoires renseignent sur l'héritage local, direct ou indirect, issu des roches-mères, et sur le degré atteint dans l'accomplissement des processus d'altération.

— l'héritage local direct est indiqué par la pyrophyllite. C'est un minéral primaire très résistant de la roche-mère qui peut être considéré comme « minéral-repère ». Il peut être présent dans tout type d'altérites. Il ne peut servir d'indicateur chronologique, mais signe constamment l'influence d'un substrat granitique ou gneissique et contribue à souligner l'effet mosaïque.

— l'héritage local indirect est responsable des indices de palygorskite trouvés sur la surface fondamentale (CS4) et sur les versants (GV46) et issus de l'altération de passées d'amphibolites ou de serpentinites présentes dans le socle (Caillère et Hénin, 1963).

— le degré d'altération se matérialiserait par la présence d'halloysite. Celle-ci est exclusivement présente dans le groupe des altérites de glaciais et de replats-glaciais et dans le secteur de la Plate-forme de Carquefou, qui a servi de niveau de base à la glacioplation du Pléistocène ancien. Ces altérites ont pu subir un façonnement particulier et une évolution incomplète ou trop brève en périodes interglaciaires ou post-glaciaire.

b) Dans les sédiments pliocènes, plio-quadernaires et quadernaires

Les minéraux accessoires ont déjà été signalés comme de bons indicateurs des sources régionales d'apports (Barbaroux et Alix, 1969 ; Barbaroux, 1980).

— La pyrophyllite, constante dans les sables rouges du Pliocène, confirme le décapage important de la plate-forme continentale à cette époque. En revanche, au Quadernaire, épisodique, elle indique des phases d'érosion actives brèves dans le temps et dans l'espace.

— La palygorskite, dans les nappes caillouteuses, confirme une mise en place rapide et une alimentation éventuelle par érosion des formations sédimentaires tertiaires où ce minéral est abondant. Sa fragilité hors de son contexte de formation, implique une arrivée récente dans les dépôts.

Dans les limons éoliens, l'éventail de représentation des minéraux accessoires très large montre une alimentation très diversifiée à partir de l'ensemble des formations.

B. L'évolution et les degrés d'altération

Les coefficients mis au point (cf. méthodologie) permettent de dégager quelques éléments clefs dans l'appréciation de l'évolution des altérites.

1) Analyse des variations des coefficients (fig. 8 à 10)

a) Rapport G/K (Tardy, 1969) fig. 8

Les altérites étudiées classées sur la figure 8 par ordre décroissant des valeurs de ce rapport permettent de distinguer quatre groupes :

— les altérites de surface fondamentale découvertes, qui ont des valeurs particulièrement fortes du rapport G/K ($\approx 0,3$) ;

— les altérites de vallées récentes, où ce rapport a une valeur médiocre ($\approx 0,1$) ;

— les altérites de glaciais, où le rapport est faible ($\approx 0,05$) ;

— les altérites d'alvéoles pré-pliocènes et de surface fondamentale, enfouies, où le rapport est moyen à très faible (0,1 à 0,01).

b) Coefficient d'altération ($CA = \frac{K + CG}{Ch + Hy + I}$) fig. 9

L'ordre de succession est différent. Le degré d'altération des alvéoles pré-pliocènes et des altérites de la surface fondamentale enfouies est le plus élevé, à l'exception de SR30. Viennent ensuite les altérites des vallées récentes et des glaciais, puis les altérites de la surface fondamentale découvertes (fig. 9), les moins altérées, puisque décapées.

c) Coefficient d'hydromorphie ($CH = CG/K$) fig. 10

On trouve un classement voisin de celui que donne le rapport G/K, avec par contre, un regroupement des altérites d'alvéoles pré-pliocènes et des altérites de la surface fondamentale enfouies opposées à celles de la surface fondamentale découvertes.

2) Analyse interprétative

a) Observations générales et rôle de l'hydromorphie

D'après les données géomorphologiques, l'intensité du drainage, traduite par des faciès de dissection, s'ordonnerait de façon croissante selon la succession suivante : surface fondamentale et alvéoles pré-pliocènes, glaciais et replats-glaciais, versants de vallées. Selon le coefficient d'hydromorphie (CH), il s'ordonnerait selon le classement suivant : surface fondamentale, versants récents (têtes de vallées), glaciais, bas-versants récents, et enfin alvéoles pré-pliocènes.

Une première contradiction, apparente, peut être levée. Les argiles des versants situés à l'aval des vallées peuvent révéler une hydromorphie plus accentuée que ne le laissent prévoir les critères géomorphologiques, du fait du blocage des eaux de ruissellement par le colmatage flandrien.

Il est plus difficile d'expliquer le très bon coefficient de drainage apparent des altérites d'alvéoles pré-pliocènes. En fait, ces alvéoles ont été profondément incisés par l'érosion linéaire au Pléistocène. Les marques d'une altération récente en contexte bien drainé tendent peut-être à effacer celles de leur passé endoréique.

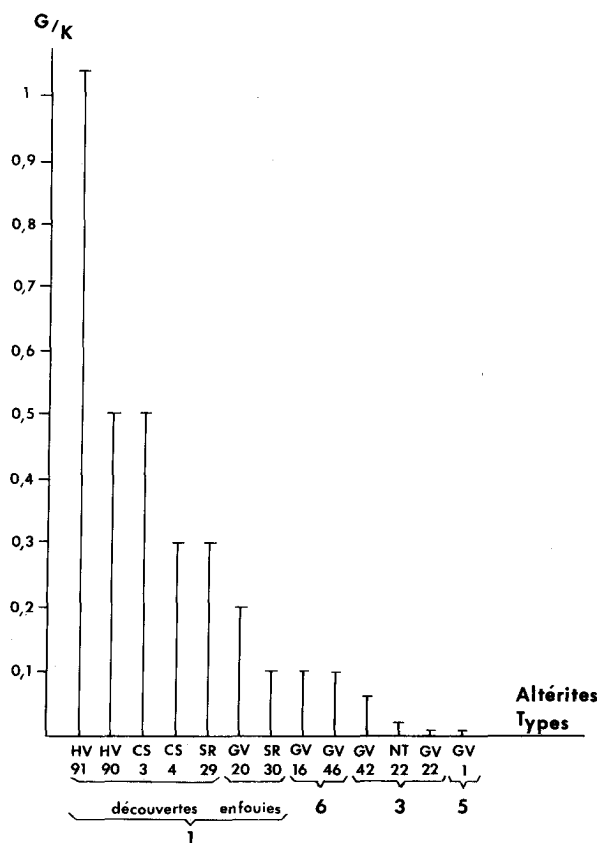


Fig. 8. - Le rapport Gibbsite/Kaolinite (coefficient d'achronisme) suivant les types d'altérites. Gibbsite/Kandites ratio according to alterit types (achronism index).

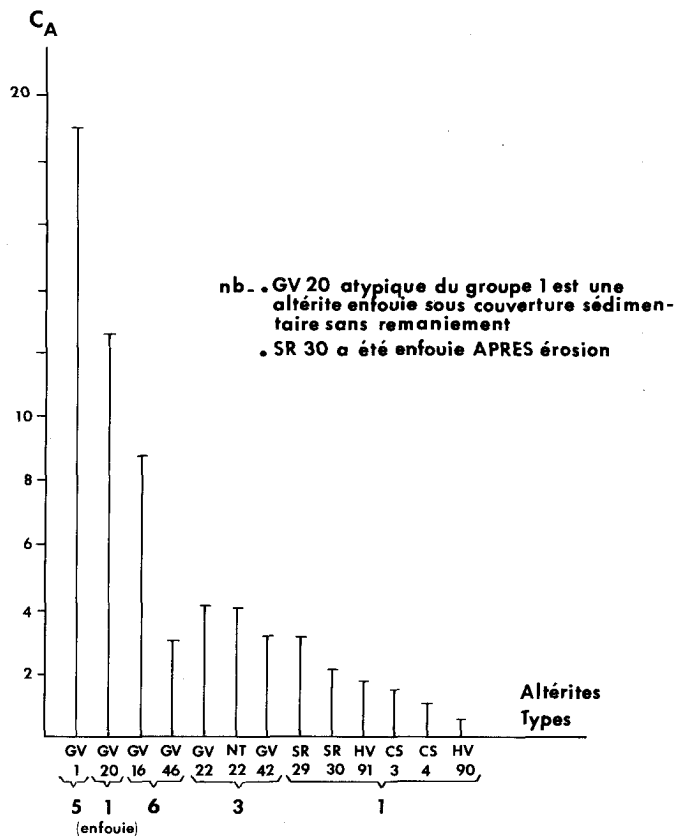


Fig. 9. - Le coefficient d'altération totale (CA) suivant les types d'altérites. Whole alteration index (CA) according to alterit types.

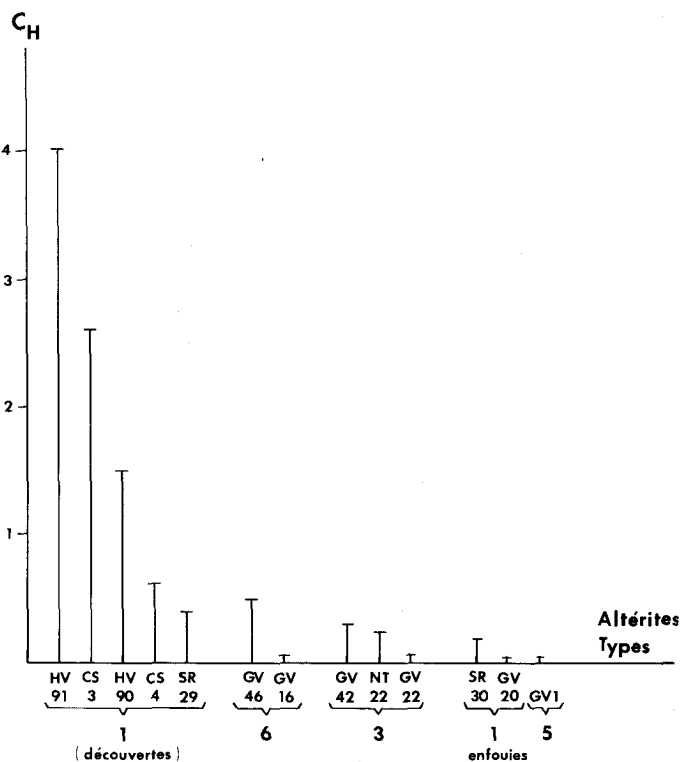


Fig. 10. - Le coefficient d'hydromorphie (CH) suivant les types d'altérites. Hydromorphic index (CH) according to alterit types.

Les altérites de plates-formes auraient suivi une évolution en contexte hydromorphe, et les altérites d'alvéoles pré-pliocènes au terme d'une évolution kaolinisante en milieu drainé, seraient crypto-altérées. Toutefois, ce schéma doit être corrigé en fonction des données fournies par les autres coefficients.

b) Le coefficient d'altération totale (CA)

Les altérites d'alvéoles pré-pliocènes sont les plus évoluées et celles où l'altération est la plus poussée. Les altérites de la surface fondamentale ont été profondément et largement décapées. On ne retrouve plus, à leur emplacement, que des racines d'altérites pré-pliocènes, affectées par une ou plusieurs phases d'altération récentes. Le cas du prélèvement SR30 est le plus instructif : on peut y reconnaître une troncature du profil d'altération ancien, préalablement érodé, sous les sables rouges pliocènes ; la racine pré-pliocène, ainsi scellée, n'a plus évolué et est restée « bloquée » à un stade d'altération médiocre.

De ces observations, on peut déduire que le plateau nantais et le plateau du Cellier représentent une surface de lente dégradation à multiples alvéoles-témoins, préservés par enfouissement, ayant subi des rajeunissements et des regradations multiples.

c) La gibbsite et le caractère polyphasé des altérations

Aucun facteur, isolé, n'est déterminant pour expliquer l'abondance de gibbsite. En effet, la teneur en

gibbsite est maximale dans les altérites de la surface fondamentale, pourtant mal drainées, et à des stades d'évolution très divers. En fait, et si l'on suit Tardy (*op. cit.*), des reprises d'altération multiples ont pu entraîner une genèse polyphasée de gibbsite accumulée dans les racines des altérites de la surface fondamentale. Ceci s'accorderait avec leur ancienneté, leur décapage et attesterait le caractère achronique et itératif de leur genèse.

Corrélativement, la moindre abondance de gibbsite dans les altérites des alvéoles prépliocènes, fossilisés, peut être attribuée à un passé endoréique prolongé et surtout au caractère moins itératif de leur façonnement, puisqu'elles ont gardé leur manteau d'altération, contrairement à la surface fondamentale et subi, peut-être, une évolution particulière sous leur couverture sédimentaire.

L'accumulation de gibbsite semble donc illustrer le caractère polyphasé de l'altération et le rapport G/K serait donc surtout révélateur d'achronisme. Il montre aussi que la pénélaine ancienne est, paradoxalement, une surface de rajeunissement.

d) Essai de corrélation entre les différents facteurs

On dispose donc de trois coefficients :

- G/K : coefficient d'achronisme (ou CP caractère polyphasé) des altérations,
- CH : coefficient d'hydromorphie,
- CA : coefficient (ou degré) d'altération totale.

Les corrélations suivantes peuvent être décelées en associant deux à deux ces coefficients.

Les graphiques I, II, III (fig. 11) montrent que les altérites « découvertes » de la surface fondamentale peuvent présenter une hydromorphie variable, un façonnement en mosaïque très polyphasé et une altération totale moyenne ou faible. Les autres altérites, surtout celles qui sont enfouies (alvéoles pré-pliocènes et lambeaux de surface fondamentale fossilisés) présentent un caractère moins hydromorphe et moins achronique. Le degré d'altération est maximum pour les altérites d'alvéoles pré-pliocènes fossilisés et, en second lieu, pour les altérites de versants de vallées ; celles qui sont situées sur les glacis présentent une altération intermédiaire.

III. Approche paléoclimatique interprétative

A. Arguments généraux

Les arguments généraux, fondés sur les observations de terrain, complétées par les études minéralogiques précédentes, conduisent à former quatre propositions dont on pourra, pour certaines idées, retrouver l'origine dans le travail de Gac et Tardy (1980).

Les altérites les plus évoluées, situées dans les alvéoles pré-pliocènes fossilisés, correspondent à une altération assez régulière, probablement monophasée,

ou à petit nombre de phases, en contexte climatique hydrolysant à saison très contrastées, en ambiance chaude. Le milieu était peut-être mal drainé à l'origine, mais certainement mieux drainé dans son évolution terminale. Il n'y subsiste que très peu de gibbsite, tandis que les ions solubles ont migré vers les bassins aval.

Les altérites de plates-formes présentent des degrés divers d'altération, mais généralement moins évolués. Leur façonnement pourrait être polycyclique, avec plusieurs marques d'altération en contexte « moins agressif » s'exerçant sur des racines tronquées, reliques d'altérites anciennes pré-pliocènes, élaborées en climat chaud. Si elles sont drainées (eaux de ruissellement), elles accumulent la gibbsite à la faveur d'actions répétées et souvent plus récentes. L'abondance épisodique du complexe gonflant traduit à la fois une reprise d'altération en contexte tempéré ou plus frais et le caractère hydromorphe de ces milieux (eaux de nappes quasi stagnantes). Le décapage général des altérites pré-pliocènes est signé par l'héritage général reçu par les sables rouges y compris avec la fixation du fer.

Les altérites sur glacis occupent en général une situation intermédiaire. Plus récentes dans leur phase d'évolution principale, elles auraient subi un climat tempéré à tempéré chaud, comme semble l'indiquer une kaolinisation incomplète (halloysite). C'est plusieurs phases d'altération brèves (indice G/K), facilitées par un bon drainage, qui pourraient avoir contribué à leur développement, lors des interglaciaires quaternaires. En effet, l'héritage constaté dans les nappes détritiques étaye cette interprétation. Les nappes procèdent d'une alimentation détritique, lors du façonnement des replats glaciaires, au cours des ruptures rhexistasiques quaternaires. Elles accumulent du fer, en contexte plus chaud, lors des interglaciaires.

Les altérites des versants de vallées présentent un degré d'altération parfois très poussé, mais ayant abouti au complexe gonflant, ce qui implique un climat moins agressif et donc une évolution essentiellement post-glaciaire, parallèlement à la remontée du niveau marin, bloquant ou entravant les nappes phréatiques.

B. Les indices minéralogiques comme révélateurs paléoclimatiques

Ces indices doivent revêtir pour les altérites une signification « climatique » ; pour les sédiments ils peuvent avoir en outre une signification plus dynamique que nous laisserons de côté ici.

1) Altérites

a) **Indice de cristallinité des illites** (na Chamley, 1967 ; Chamley, 1971).

Dans l'optique de Chamley, l'indice na a été défini à partir des milieux sédimentaires marins. Un indice élevé correspond à un climat chaud (feuillet « ouverts »), et un indice faible correspond à un climat froid (feuillet « fermés »). Le graphique suivant est ordonné selon des indices décroissants (fig. 12).

L’empreinte climatique essentielle sur les illites dégradées de la surface fondamentale reste une empreinte « chaude » pré-pliocène, malgré leur caractère polyphasé et les retouches d’altérations ultérieures. Les échantillons SR29 et HV91 (na = 8) sont typiques du

contexte climatique le plus chaud. L’échantillon CS4 se situe dans un contexte climatique qui se rapproche des faciès d’altérites des alvéoles pré-pliocènes fossilisés. Cette différence montre que, à climat égal, un facteur de drainage influence l’expression de l’indice. De

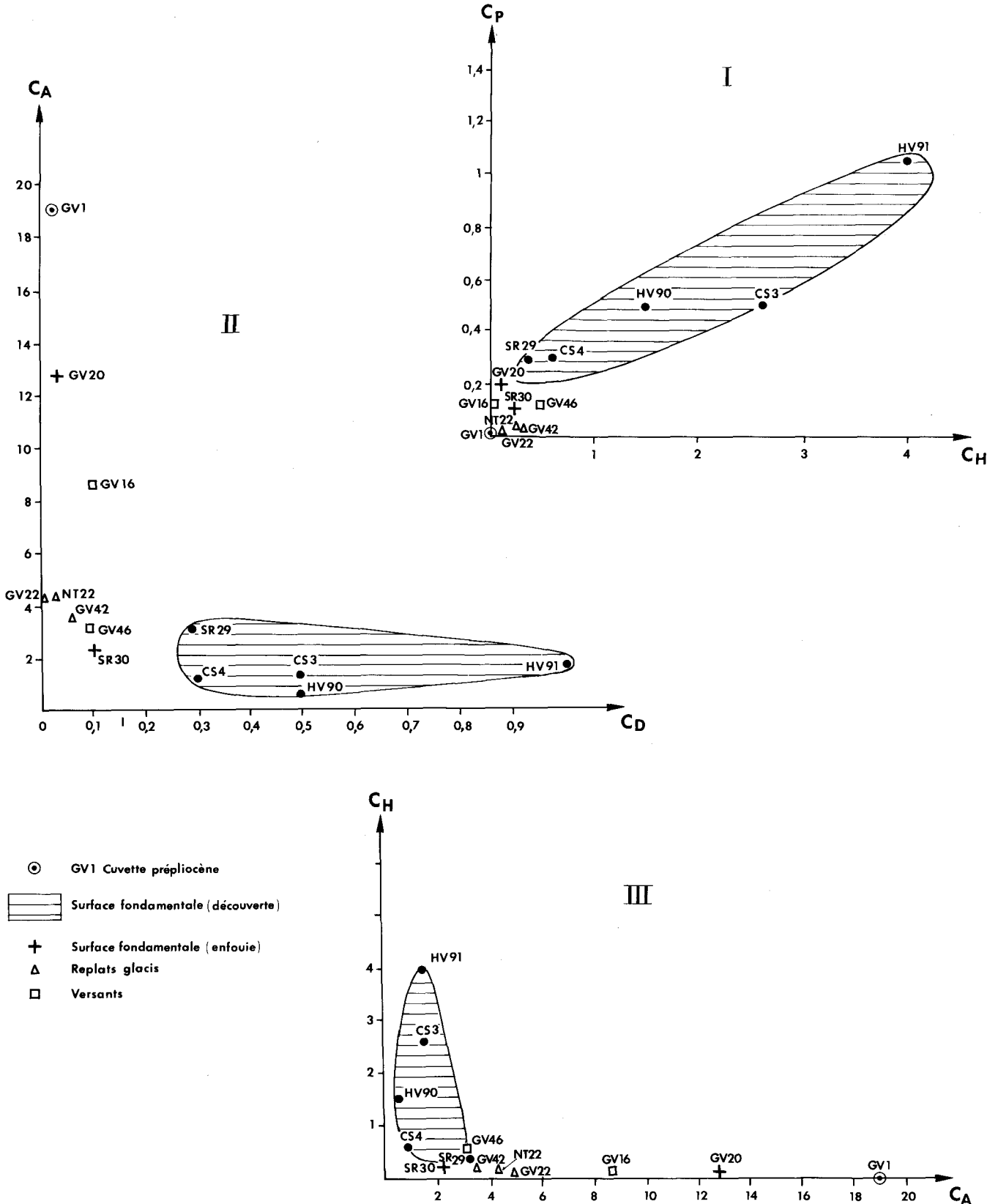


Fig. 11. - Tentative de corrélations entre coefficients suivant les types d’altérites. Tentative correlation between index according to altérite types.

même, le décalage assez systématique de valeurs entre les indices des altérites de la surface fondamentale et ceux des altérites des alvéoles pré-pliocènes pourrait provenir des perturbations géochimiques plus importantes subies par les premières (évolution par altération polyphasée). Le critère climatique ne serait donc pas seul en cause, même pour les altérites. De toute façon, on retrouve ici l'effet en « mosaïque » observé plus haut. Toutefois l'effet climatique reste globalement assez valable. Aux indices na des climats chauds, succèdent des indices intermédiaires dans les altérites des glacis et replats-glacis, de climats interglaciaires plus tempérés ; puis, les indices faibles des altérites de flancs de vallées caractérisent les climats frais, en contexte post-glaciaire, du Quaternaire récent.

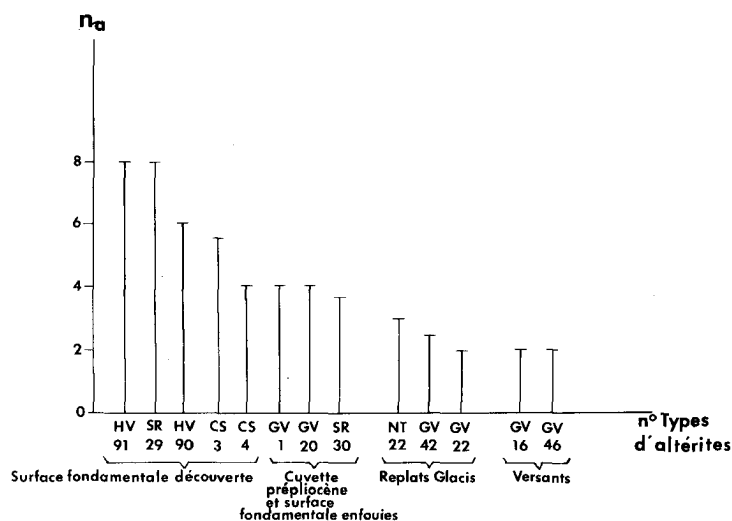


Fig. 12. - Variation de l'indice de cristallinité de l'illite dans les différents types d'altérites. Illite crystallinity index variation for different alterit types.

b) Rapport Feldspath/Quartz (F/Q) fig. 13

Ce rapport est moins directement utilisable pour la détermination du contexte climatique. Il paraît plus utile de le relier ici à la granularité initiale de la roche-mère. En effet, on observe que la répartition des valeurs diffère selon les classes granulométriques analysées ce qui se relie aisément à un simple effet de grain.

Dans les pâtes, le caractère de « racines » décapées des altérites de la surface fondamentale ressort d'un enrichissement relatif en feldspaths, mais l'éventail des variations est très resserré autour de valeurs absolues, beaucoup plus basses, de l'indice F/Q, ce qui pourrait s'expliquer par une attaque polyphasée et généralisée de la surface.

Avec les précautions d'usage (lithologie et granularité comparables), on peut cependant noter des indications climatiques :

- la persistance dans les altérites récentes formées sous climat plus froid de fragments de feldspaths, non encore altérés ;
- la fragmentation plus poussée des feldspaths des altérites plus anciennes, et, corrélativement, une attaque du quartz dans la fraction la plus fine. Ceci est corroboré par le taux de gibbsitisation plus élevé des altérites de la surface fondamentale (migration différentielle de la silice).

Les résultats des analyses exoscopiques, avec attaques successives observées, appuient encore cette hypothèse (§ I), confirmant un façonnement polyphasé sur les quartz.

2) Sédiments

a) Indice de cristallinité de l'illite

Nous avons montré (Barbaroux, 1980) que la valeur

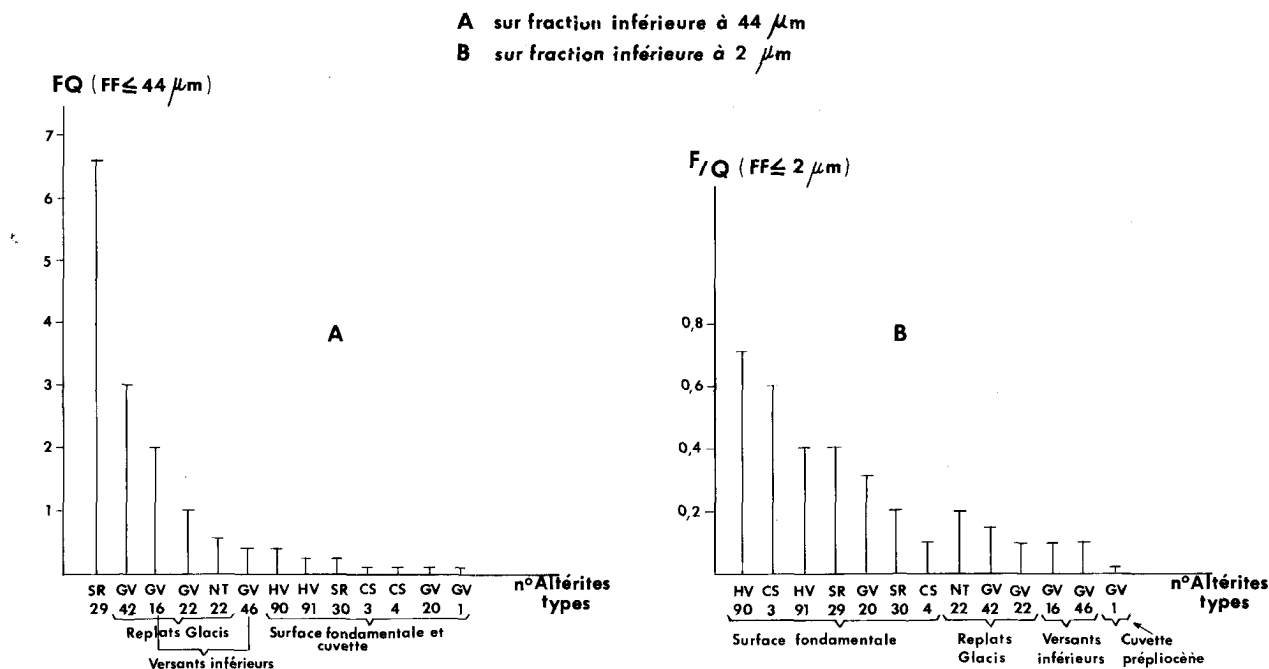


Fig. 13. - Variation du rapport Feldspath/Quartz dans les différents types d'altérites. Feldspars/Quartz ratio variation for different alterit types.

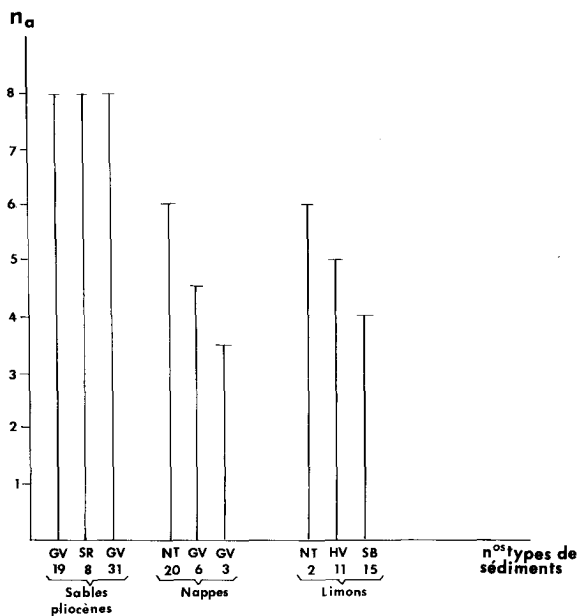


Fig. 14. - Variation de l'indice de cristallinité de l'illite dans les différents types de sédiments.
Illite crystallinity index variation for different sediment types.

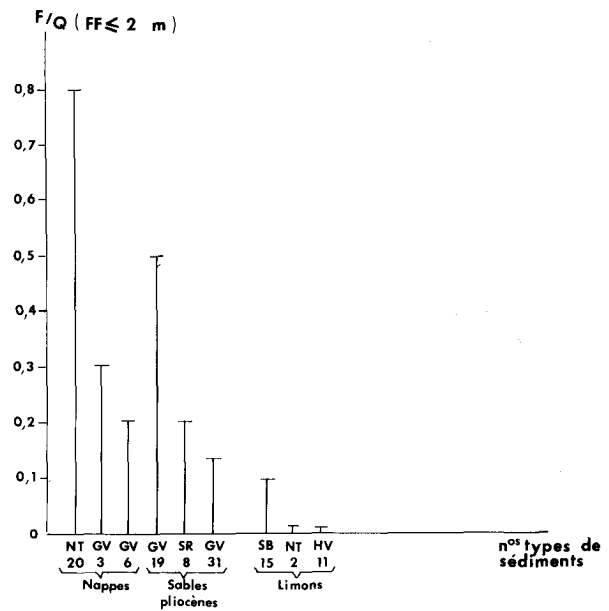


Fig. 15. - Variation du rapport Feldspath/Quartz dans les différents types de sédiments.
Feldspars/Quartz ratio variation for different sediment types.

paléoclimatique des indices pouvait être sujette à caution dans les dépôts sédimentaires. Les indices les plus élevés ($n_a = 8$) correspondent bien, cependant, aux sables rouges pliocènes, qui seraient donc les dépôts les plus chauds avec une sélection dynamique poussée des illites « ouvertes ».

Les nappes caillouteuses signent un contexte globalement plus « frais », au sein duquel les variations peuvent ressortir d'un tri dynamique. Par contre les limons relèvent, par tous les autres critères présentés, d'une formation en contexte froid incontestable. Aussi les valeurs assez élevées des indices que l'on y observe ne correspondent certainement pas à leur ambiance climatique de mise en place mais à un héritage par déflation à partir d'arènes préalablement édifiées en contexte chaud puis démantelées.

b) Rapport F/Q (fig. 15)

Ce rapport, dans les sédiments, doit être utilisé avec précaution pour une approche climatique ; celle-ci, au demeurant, peut être considérée comme indirecte.

Les nappes caillouteuses ont le rapport le plus élevé (ex. NT20) et correspondent au tri le plus médiocre et au transport le plus bref.

Certains sables pliocènes (ex. GV19) ne sont guère mieux partagés. Encore sont-ils surtout situés au sommet de la formation, où ils font relativement exception ; on les trouve lorsqu'a lieu une attaque locale de la base des altérites préexistantes, au terme du décapage.

Les limons, par contre, présentent un processus d'évolution complet ; ce sont les faciès à rapport F/Q le plus faible. Ces dépôts les plus récents, bien qu'en contexte froid de formation, ne font, encore une fois, que refléter leur mode de mise en place par sélection des poussières de quartz les plus fines, à partir d'un matériel d'altération lui-même très évolué au préalable.

IV. Conclusions

Nous regrouperons les principaux résultats de notre étude autour de cinq axes :

- A - Intérêt de la méthode employée.
- B - Données confirmées ou acquises sur les mécanismes d'altération régionale.
- C - Restitution des ambiances climatiques.
- D - Évolution géodynamique des pénéplaines et répercussions sédimentaires (liens altération - sédimentation).
- E - Rythmes et durées des phénomènes.

A. Intérêt de la méthode

La méthode employée permet l'expression des apports mutuels et des interactions entre deux disciplines : géomorphologie et sédimentologie. Les résultats obtenus ainsi sont supérieurs à ceux d'une pure et simple juxtaposition des deux spécialités.

Ainsi, la rationalisation des prélèvements sédimentologiques à partir d'une étude géomorphologique détaillée préalable, a permis d'améliorer la représentativité des échantillons, tout en réduisant l'échantillonnage.

Ce travail a été mené à diverses échelles d'observation (régionale, affleurement, microscopique) qui se complètent mutuellement.

Enfin, le souci constant de tenter des recoupements entre résultats d'observations et paramètres divers (granulométrie, morphoscopie, exoscopie, minéralogie des argiles, morphologie locale) a permis de mieux étayer les interprétations. Une approche géochimique conjointe aurait pu rendre ce travail encore plus efficace.

B. Données sur les mécanismes d'altération régionale en pays cristallin

Les altérations sont pérennes, avec, souvent, des phases plus actives, et un contrôle morphologique par l'intermédiaire des variations de drainage.

Ainsi, l'altération peut être bloquée ou extrêmement ralentie (crypto-altération) dans des profils fossilisés, mal drainés, protégés sous couverture sédimentaire (cuvettes ou alvéoles pré-pliocènes). A l'inverse, l'altération peut être fort rapide sur des pentes bien drainées et très exposées (glacis). L'altération peut, bien sûr, affecter les dépôts sédimentaires (nappes quaternaires, sables rouges pliocènes), mais il devient très difficile, alors, d'évaluer son impact sur ces matériaux, eux-mêmes issus de la remobilisation d'altérites.

Les trois coefficients (d'altération totale, d'hydromorphie, et le rapport G/K) utilisés à partir des analyses RX, ont permis de préciser l'importance et les conditions d'altération.

On peut résumer ainsi les conclusions qu'ils permettent d'atteindre :

- les altérations poussées et profondes des cuvettes en font des témoins préservés du manteau d'altération pré-pliocène ;
- l'accumulation relative de gibbsite dans les racines d'altérites de la surface fondamentale dénote des attaques polyphasées, après décapage pliocène ;
- la sédimentation inverse et l'évolution minéralogique confirme que les sédiments pliocènes proviennent de l'érosion du manteau d'altération pré-pliocène ;
- l'état des glacis et de leurs recouvrements caillouteux est révélateur de phases d'altération, successives, interglaciaires. La situation des manteaux d'altérites sur les versants de vallées semble significative de phases d'altérations pleistocènes (Sellier, 1985).

Conformément aux travaux de Birot (1981), nous avons pu établir par l'étude des poudres une distinction entre arénisation et argilisation. Le premier processus conduit à des quartzo-altérites, le second à des argilo-altérites. Ceci est fonction de la nature des roches-mères, des phases climatiques subies, de l'âge et de la durée des altérations.

Dans les quartzo-altérites, les plus récentes, sont feldspatho-quartzeuses, les plus anciennes quartzo-argileuses. De même, au sein des argilo-altérites, les plus récentes sont riches en minéraux argileux « primaires », alors que les plus anciennes ont épuisé ce stock.

Un indice d'argilisation, basé sur le rapport feldspaths + minéraux primaires / phyllites évoluées, a permis de quantifier ces notions.

Nous avons pu ainsi déceler les effets d'un ensemble de retouches altérantes, entrecoupées de pauses, d'ablations et de tronçonnements, d'aggradations et de regradations.

C. Restitution de l'ambiance climatique

La combinaison des divers résultats, et parmi eux

l'utilisation des données sur l'indice de cristallinité de l'illite, nous amène à formuler trois propositions principales :

— Les altérites enfouies dans les cuvettes de la surface fondamentale pré-pliocènes, sont des témoins des phases altérantes les plus anciennes et les plus poussées. Malgré le décapage sévère qu'elles ont subi, les autres altérites de cette surface, le plus souvent réduites à leurs racines, gardent l'empreinte climatique, chaude, de leur origine primitive.

— Les indices des altérites des glacis en général, par leur position intermédiaire sur l'échelle des valeurs représenteraient des épisodes d'actions climatiques améliorantes brèves. Ils pourraient correspondre aux interglaciaires. Parfois, les indices d'un climat plus chaud, sont décelables ; dans ce cas, il faut faire appel à une reprise d'altération sur altérites pré-pliocènes préservées.

— Le contexte le plus froid est donné par les indices des altérites de bas de versants. Le façonnement des vallées est récent et l'altération l'est également ; elle se situe dans le dernier épisode glaciaire et le post-glaciaire.

Nous suivons donc globalement et essentiellement les effets de la dégradation climatique depuis le Pliocène sur l'altération. Sans que ce phénomène cesse, il se restreint peu à peu dans son extension géographique et sa profondeur. Il dépend, de plus en plus, dans un contexte climatiquement dégradé, des conditions locales de drainage.

D. Évolution du modelé et de la géodynamique sédimentaire

Le modelé fourni par la région nantaise concerne un type de relief très répandu : une plate-forme ancienne cristalline et cristallophyllienne, ayant subi, dans l'exemple choisi, une série d'altérations cénozoïques d'ampleur décroissante avec le temps. Ces phases altérantes biostasiques ont été entrecoupées de crises rhexistatiques, de pulsations eustatiques et de mouvements tectoniques. Il résulte d'une telle combinaison de phénomènes, un ensemble de formes et formations imbriquées, avec retouches successives.

Les altérites dénudées, décapées, de la surface fondamentale apparaissent comme les équivalents évolutifs des altérites de glacis. De fait, le couple altérites dénudées — sédiments sableux pliocènes est très comparable, génétiquement, au couple altérites de glacis — sédiments caillouteux des nappes.

L'enchaînement de ces phénomènes est donc très délicat à restituer, mais il nous a paru indispensable de tenter cette restitution, car nous sommes devant un ensemble géomorphologique et paléoclimatique très fréquent : massifs anciens exhumés, altérés, avec couverture sédimentaire discrète, et conditionnant les paléoenvironnements des systèmes sédimentaires marins adjacents.

L'étude que nous avons faite, appuyée sur les travaux géomorphologiques de l'un de nous (Sellier, 1985), permet de reconstituer sept phases successives principales à partir d'un paléorelief pré-pliocène :

- 1) Conservation des altérites les plus anciennes dans

	PRESENT TRAVAIL						Erosion - Sédiments Tectonique
	Age	Altération	FLAGEOLET (1977) Limousin - Vendée			Age	
C. KLEIN (1975) M. Central, M. Armor.	WINKEL (1971) Limousin	TARDY (1969) Bret. Vosges MC Corse	DEJOU (1972) Limousin	FLAGEOLET (1977) Limousin - Vendée		Arènes grossières à Montmorillonite, interstratifiés minéraux primaires	Alluvionnement (nappes et cones alluviaux), Déflation - (Dépôts éoliens).
Altérations de plus en plus discrètes	Arènes à Kaolinite. Interstratifiés Montmorillonite.	Arènes à Kaolinite Gibbsite Vermicite, Interstratifiés (Al-térations dues aux principaux interglaciaires)	Arènes avec peu de Gibbsite (phases climatiques tempérées plus chaudes)	Quaternaire récent Quaternaire moyen Quaternaire ancien	Arènes à sable grossier dominant avec Montmorillonites et Interstratifiés	Arènes grossières à Kaolinite et minéraux primaires	incisions polyphasées très marquées au Riss (reprise partielle des nappes).
Miocène moyen - Néogène sup. tempéré chaude alt. discrète.	Arènes de "Montagnes" fines à Kaolinite, Gibbsite - Arènes de "plateaux" plus grossières à Lattor-Kaolinite	Arènes à Kaolinite Gibbsite (altération par phases tropicales à sub-tropicales).	Arènes à Kaolinite et Gibbsite (abondante phases climatiques subtropicales du tertiaire).	Pliocène Miocène Oligocène	Arènes à sables moyens à Kaolinite Gibbsite et minéraux résiduels abondants	Arènes moyennes et fines à Kaolinite Gibbsite minéraux primaires présents	(Sables) Rhéxistase et transgression cycles biotritiques penlittraux (sables - marnes calcaires) Tectonique
Post Oligocène							
Reprise d'altération au Lattor-fien sup.				Finis Bartonien	Arènes fines à Kaolinite et Gibbsite sans minéraux résiduels		
Démantèlement mésonummulitique				Eocène sup. (Cuisien) plateaux		Arènes fines à kaolinite Gibbsite	Tectonique (sables et grès)
Altération massive sous climat chaud humide sur surface fini Cuisienne.							(Sables) - Rhéxistase en Basse Loire

QUATERNAIRE

TERtiaire

Tabl. V. - Récapitulation et comparaisons. Dynamique sédimentaire et chronologie. Summary of results, comparisons with previous works. Sedimentary dynamics and Chronologie.

des dépressions et cuvettes surcreusées (paléofformes antépliocènes) sous couverture sédimentaire.

2) Dénudation des roches et racines d'altérites inégalement conservées, après décapage généralisé (Pliocène) et mise en place concomitante des sables rouges, sous influence marine, redistribuant les matériaux des altérites précédentes, avec une accumulation préférentielle guidée par des fossés tectoniques actifs (Nort-sur-Erdre, Petit-Mars, La Seilleraye).

3) Glaciplanations, plio-quadernaire et quadernaire ancien, avec retouches sur les sables rouges, reprise de façonnement de la plate-forme ancienne (surtout à proximité des fossés tectoniques et des paléoreliefs exhumés) et dépôt corrélatif des nappes, dont les matériaux sont issus de reprises d'érosion liées aux fluctuations climatiques (glaciaire/interglaciaire).

4) Reprises des altérations, lors des rémissions interglaciaires.

5) Altération des nappes, des versants inférieurs et *pro parte* des sables rouges au Quadernaire moyen.

6) Mise en place au Würm des limons éoliens, avec nouvelle remobilisation, par déflation, intense, des éléments de la surface fondamentale.

7) Reprise des altérations, surtout sur les versants inférieurs, des vallées récentes.

On voit qu'une telle reconstitution s'inscrit très bien dans le cadre fixé par Millot (1971) pour l'évolution géochimique des paysages.

Le tableau V récapitule nos observations, complétées par des indications sur l'évolution tertiaire à partir de nos levés sur les feuilles géologiques (1/50 000) de la région. Ce tableau les confronte à cinq essais de synthèse faits par différents auteurs sur diverses régions au cours de ces dernières années.

Une étude du même genre et du plus haut intérêt, pourrait être menée, concernant les phases de paléaltérations antérieures au Cénozoïque, bloquées sous couverture mésozoïque.

Tout comme l'a montré, à propos des cuirasses, Nahon (1976) il y a des cas où les altérations peuvent constituer de bons indicateurs de géologie historique (altérations « fossiles ») et d'autres où les altérations ne représentent qu'un faciès d'évolution à travers le temps.

E. Rythmes et durées

Dans cet exemple, les phénomènes d'altération relèvent de composantes évolutives lentes et discrètes, s'inscrivant dans la durée, mais pouvant être interrompues par des bouleversements rapides.

Ceux-ci interviennent essentiellement lors des crises rhexistatiques, tectoniques, eustatiques.

Nous retrouvons également une illustration de la notion d'« héritage différé » définie par l'un de nous (Barbaroux, 1980) ; les dépôts d'arènes accumulés lors de phases d'altération continentale de plus ou moins longue durée sont déblayés, plus ou moins complètement, dans les courtes périodes de crise, et redistribués plus ou moins loin en milieu de sédimentation.

Il est bien certain que la répétition de tels phénomènes au cours des temps explique la formidable masse

de sédiments arrachés au Massif armoricain pour aboutir, par d'incessantes retouches, à la surface pénéplanée actuelle, toujours en cours d'évolution altérante.

Celle-ci a donc été façonnée « en mosaïque » par de multiples aggradations et regradations depuis la fin du primaire jusqu'à nos jours. Paradoxalement, la surface fondamentale « ancienne », exhumée et écorchée, résultat de cette longue activité, présente les phénomènes d'altération les plus frustrés à côté de reliques, très évoluées, préservées.

Remerciements :

Les auteurs remercient :

— à l'IGARUN, Nantes, M. le Professeur B. Bousquet, par ses suggestions et critiques, il nous a aidés à affiner notre problématique.

— à l'ULP, Strasbourg, Mlle H. Paquet pour sa révision approfondie du manuscrit ; ses remarques précises et toujours pertinentes nous ont permis d'améliorer considérablement ce travail.

— au BRGM, Orléans, M. J. Fourniguet par sa révision scrupuleuse du texte nous a conduit à en clarifier l'expression.

— à l'Université de Provence, M. le Professeur J. Philip, qui nous a amenés à approfondir notre réflexion sur les problèmes de paléaltérations.

Nous remercions bien cordialement Mmes Dubois et Duchesne, IGARUN, Nantes, pour l'illustration graphique ainsi que Mlle Issa, CNRS, Université de Provence, pour le traitement de texte.

Dans sa phase finale, ce travail a bénéficié de l'aide du CNRS à travers la Jeune Équipe 334 : « Évolution des systèmes biosédimentaires » et le GRECO 51 « Interactions Continent-Océan ».

Références bibliographiques

- BARBAROUX L. (1980). - Évolution des propriétés physiques et chimiques des sédiments dans le passage Continent-Océan. L'effet estuarien (Estuaire de la Loire et ses parages). Nantes, thèse Doct. État Sci., 433 p.
- BARBAROUX L. (1982). - Un exemple subactuel d'échanges sédimentaires Continent-Océan en région tempérée, l'estuaire de la Loire (France). Textures et structures sédimentaires. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, N.S., n° 144, pp. 53-75.
- BARBAROUX L. *et al.*, (1972). - Examen au microscope électronique à balayage de grains de quartz de diverses origines. Essai de typologie, signification environnementale. *Bull. BRGM*, IV (2), 4, pp. 3-31.
- BARBAROUX L. *et al.*, (1975). - Feuille et notice. Carte Géologique à 1/50 000 de la Roche-Bernard, n° 449, BRGM, Éd. Orléans.
- BARBAROUX L., BOUSQUET B. (1976). - Contribution à l'étude des sols rouges méditerranéens. Les sols rouges du domaine hellénique en Grèce occidentale. Signification climatique et stratigraphique. *Géol. Médit.*, 3, n° 4, pp. 237-250.
- BARBAROUX L. *et al.* (1983). - Feuille et notice. Carte Géologique à 1/50 000 de Nort-sur-Erdre, n° 451, BRGM, Éd. Orléans.
- BIROT P. (1981). - Les processus d'érosion à la surface des continents. Paris, Masson éd., 606 p.
- BORNE V. (1978). - Étude d'un sondage profond dans le bassin tertiaire de Saffré, 44. *Mém. DEA*, Nantes, 47 p.
- BOURGEAT F. (1970). - Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quadernaire. Strasbourg. Thèse Doct. État Sci., 2 vol., 318 et 126 p.

- BOUSQUET B., SELLIER D. (1975). - Le rôle de la néotectonique dans le tracé de la vallée du Gesvres. *Norois*, **87**, pp. 466-473.
- BOUSQUET B., SAUVAGE J., SELLIER D. (1976). - Existence d'une cryoconite fossile dans certains dépôts périglaciaires de la région nantaise. *Norois*, **92**, p. 611-614.
- CAILLERE S. (1936). - Étude de quelques silicates magnésiens de faciès asbestiforme ou papyracé n'appartenant pas au groupe de l'Antigorite. *Bull. Soc. Fr. Minéral., Cristallogr.*, **59**, pp. 352-373.
- CAILLERE S., HENIN S. (1963). - Minéralogie des argiles, Paris, Masson Éd., 355 p.
- CHAMLEY H. (1967). - Possibilité d'utilisation de la cristallinité d'un minéral argileux (illite) comme témoin climatique dans les sédiments récents. *C.R. Acad. Sci. Fr., D.*, **265**, pp. 184-187.
- CHAMLEY H. (1971). - Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. Marseille, thèse Doct. État Sci., 401 p.
- CHESTWORTH W. (1972). - The stability of gibbsite and boehmite at the surface of the Earth. *Clays clay Miner.* Washington, **20**, pp. 369-374.
- DEJOU J., GUYOT J., CHAUMONT C. (1972). La gibbsite, minéral banal de l'altération des formations superficielles et des sols développés sur socles cristallins et cristallophylliens dans les zones tempérées humides. XIV^e Congrès Intern. Géol. Montréal, Sect. 10, pp. 417-425.
- DURAND S. (1960). - Le Tertiaire de Bretagne. Étude stratigraphique, sédimentaire et tectonique, Rennes. *Mém. Soc. Géol. Minér. Bretagne*, **13**, 389 p.
- ESTÉOULE-CHOUX J. (1961). - Importance de la kaolinite dans les produits d'altération de différents types de roches du Massif armoricain. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **253**, D, pp. 1266-1267.
- ESTÉOULE-CHOUX J. (1970). - Contribution à l'étude des argiles du massif armoricain. Rennes. *Mém. Soc. Géol. et Minér. de Bretagne*, **14**, 319 p.
- FLAGEOLLET J.C. (1977). - Origine des reliefs, altérations et formations superficielles : contribution à l'étude géomorphologique des massifs anciens. L'exemple du Limousin et de la Vendée du Nord-Ouest, Nancy, *Mém. Sci. Terre*, n° 35, 461 p.
- GAC J.Y., TARDY Y. (1980). - Géochimie d'un paysage tropical. Le bassin du Lac Tchad. Éléments éd. Tarbes, in *Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches*, pp. 199-239.
- GODARD A. (1977). - Pays et paysages du granite, Paris, P.U.F., 232 p.
- KLEIN C. (1959). - Surfaces polygéniques et surfaces polycycliques. *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, n° 282-283, pp. 51-68.
- KLEIN C. (1959). - Surfaces de regradation et surfaces d'aggradation. *Ann. Géogr.*, pp. 292-317.
- KLEIN C. (1970). - L'élaboration de la surface post-hercynienne en Armorique. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **270**, D, pp. 2418-2421.
- KLEIN C. (1973). - Massif armoricain et Bassin Parisien ; contribution à l'étude géologique et géomorphologique d'un massif ancien et de ses enveloppes sédimentaires. Thèse. Paris, 882 p.
- KLEIN C. (1974). - Tectogenèse et morphogenèse armoricaine et périarmoricaine. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* (2), **16**, n° 1, pp. 87-100.
- KLEIN C. (1985). - La notion de cycle en Géomorphologie. *Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn.* (2), **26**, n° 2, pp. 95-107.
- LENEUF N. (1959). - L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte-d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés, Thèse, Paris, 210 p.
- LÉVÊQUE A. (1975). - Pédogenèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et remaniements superficiels. Thèse Strasbourg, 301 p.
- LE RIBAULT L. (1976). - L'exoscopie. Méthode et applications. Paris. *Mém. C.F.P.-Total*, n° 12, 232 p.
- MARGEREL J.P. (1977). - Étude géologique et hydrogéologique du bassin de Saffré. *Trav. Lab. Géol. Hist. Nantes*, **7** p.
- MARGEREL J.P. (1979). - Interprétation structurale du bassin de Drefféac, 2^e rapp. Gr. S.E.E.R.S., Nantes, pp. 390-394.
- MILON Y. (1936). - Observations sur quelques gîtes de kaolin en Bretagne et leur répartition. *C.R. Somm. Séances Soc. Géol. Minér. Bretagne*, **2**, II, 5, pp. 4-9.
- MILLOT G. (1964). - Géologie des argiles, Paris, Masson, 499 p.
- MILLOT G. (1971). - Géochimie des altérations. *Bull. Serv. Carte Géol. Als., Lorr.*, Strasbourg, **24-4**, pp. 181-217.
- NAHON D. (1976). - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au Sénégal occidental et en Mauritanie. Systèmes évolutifs : Géochimie, structures, relais et coexistence. Thèse, Marseille et Strasbourg, *Mém. Sciences Géologiques*, n° 44, 232 p., 60 fig., 12 pl. photo.
- PAQUET H. (1969). - Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, n° 30, 212 p.
- SELLIER D. (1985). - Les versants du pays nantais. Étude géomorphologique. Thèse 3^e cycle Let. Nantes, 506 p.
- TARDY Y. (1969). - Géochimie des altérations : étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Strasbourg. *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, n° 31, 199 p.
- TERS M. (1961). - La Vendée littorale. Étude de géomorphologie. Thèse, Paris, 578 p.
- VERAGUE J. (1973). - L'arénisation du massif d'Athis-de-l'Orne (Basse-Normandie). *Centre Géomor. Caen. Bull.*, n° 16, 57 p.
- WINCKEL J. (1971). - Rôles respectifs de la tectonique récente et de l'érosion différentielle dans l'élaboration du relief de la retombée Nord-Ouest de la montagne limousine. Thèse spec. Let. Clermont-Ferrand, 164 p.