



Quaternaire

Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire

vol. 19/4 | 2008
Volume 19 Numéro 4

Nouvelle approche de l'altération des galets de silex dans les dépôts marins Pléistocènes

Contribution à l'étude des plates-formes marines du Val de Saire (Normandie, France)

New Approach to Flint Pebbles Weathering in Pleistocene Raised Beaches Deposits: Contribution to the Study of Val de Saire Wave-Cut Platforms (Normandy, France)

Sylvie Coutard et Jean-Claude Ozouf



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/4852>

DOI : 10.4000/quaternaire.4852

ISSN : 1965-0795

Éditeur

Association française pour l'étude du quaternaire

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2008

Pagination : 335-344

ISSN : 1142-2904

Référence électronique

Sylvie Coutard et Jean-Claude Ozouf, « Nouvelle approche de l'altération des galets de silex dans les dépôts marins Pléistocènes », *Quaternaire* [En ligne], vol. 19/4 | 2008, mis en ligne le 01 décembre 2011, consulté le 21 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/4852> ; DOI : 10.4000/quaternaire.4852

NOUVELLE APPROCHE DE L'ALTÉRATION DES GALETS DE SILEX DANS LES DÉPÔTS MARINS PLÉISTOCÈNES : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES PLATES-FORMES MARINES DU VAL DE SAIRE (NORMANDIE, FRANCE)

Sylvie COUTARD¹ & Jean-Claude OZOUF²

RÉSUMÉ

Des travaux récents portant sur les plates-formes marines pléistocènes du Val de Saire (Cotentin, France) ont permis de reconnaître quatre plates-formes étagées, correspondant selon l'hypothèse la plus simple aux interglaciaires 5e, 7, 9 et 11 de la chronologie isotopique. Lors de ces travaux, l'altération des galets de silex présents dans les dépôts marins fossiles a été étudiée par le biais de mesures physiques (surface spécifique et porosité). Les résultats montrent que les différents stades d'altération distingués à l'œil nu (épaisseur du cortex) correspondent à une réalité physique mesurable. L'altération des silex se traduit par un accroissement de l'épaisseur du néocortex, au sein duquel augmentent la porosité (en valeur absolue et en dimension des pores) et la surface spécifique. Il a été ainsi montré que l'altération des silex est un marqueur adéquat de l'âge relatif des plates-formes marines, ce qui a contribué à valider les corrélations altimétriques dans le secteur étudié.

Mots-clés : plates-formes d'abrasion, Pléistocène, silex, corticométrie, plages fossiles, altération, porosimétrie, surface spécifique.

ABSTRACT

NEW APPROACH TO FLINT PEBBLES WEATHERING IN PLEISTOCENE RAISED BEACHES DEPOSITS: CONTRIBUTION TO THE STUDY OF VAL DE SAIRE WAVE-CUT PLATFORMS (NORMANDY, FRANCE)

Recent works on pleistocene wave-cut platforms in Val de Saire (Normandy, France) allowed to identify four stepped platforms, corresponding probably to the MIS 5e, 7, 9, 11. Alteration of the flint pebbles present in marine deposits has been studied as a mean for build a relative chronology. A specific surface analyzer and a pore sizer have been used. Results showed that alteration stages distinguished to the naked eye (cortex thickness) correspond to a measurable physical reality. Alteration develops both towards the center of the flint and by increasing pore sizes into the cortex. Flint alteration is then a good marker of relative age of platforms, which has contributed to validate altitudinal correlations in the studied area.

Keys-words: wave-cut platforms, Pleistocene, corticometry, raised beaches, alteration, pore sizer.

1 - CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1 - CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le Val de Saire se situe au nord-est de la presqu'île du Cotentin (Basse-Normandie) à la charnière entre Massif Armoricain et Bassin Parisien. Le relief est divisé en deux ensembles séparés par un escarpement bien marqué (fig. 1) : un domaine de plateaux entre 60 et 150 m d'altitude, et un domaine appelé le Bas-Pays, nettement en contrebas entre 0 et 35 m d'altitude, qui a été soumis périodiquement à une morphogenèse marine.

Le substrat est constitué essentiellement de schistes briovériens, de batholites granitiques tardi-varisques, et de roches triasiques consolidées ou non. La plus grande partie de la côte est façonnée dans les granites. Les dépôts fluviatiles du Trias (sables, conglomérats et

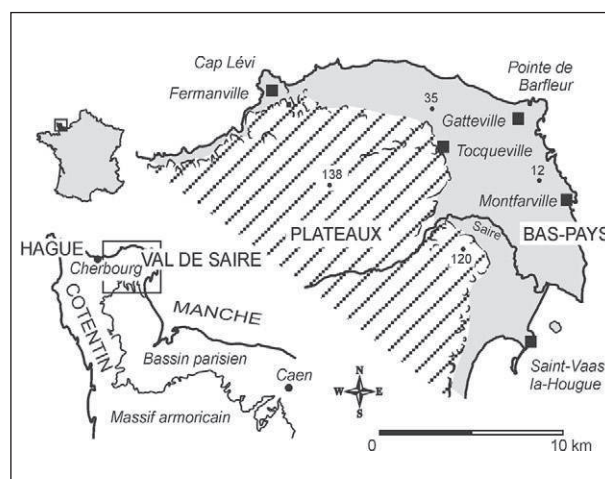


Fig. 1 : Localisation du Val de Saire.

Fig. 1: Location map.

¹ INRAP Nord-Picardie, 518 rue Saint-Fuscien, 80000 AMIENS. Courriel : sylvie.coutard@inrap.fr

² UMR 6143 CNRS Morphodynamique Continentale et Côtière, 24 rue des Tilleuls, 14000 CAEN.

argiles, consolidés ou non) constituent le substrat des plateaux, recouvrant le socle précambrien et paléozoïque. La mise en évidence du Trias dans le Bas-Pays montre que la discordance basale infra-triasique observe un fort pendage vers l'est (Coutard, 2003). Des altérites infra-triasiques sont présentes localement dans l'intérieur. Les formations mésozoïques post-triasiques sont absentes bien qu'elles affleurent en mer à quelques kilomètres au large des côtes (en particulier des craies à silex du Crétacé au nord du Cap Lévi, Larsonneur, 1971). Cependant, il faut noter la présence à Flamanville, sur la côte ouest du Cotentin (à environ 40 km de notre terrain d'étude), de reliques d'argiles à silex issues de formations crétacées attestant de l'extension de la mer crétacée sur la Normandie armoricaine. L'extension des mers jurassiques reste également imprécise (Dugué *et al.*, 2005).

1.2 - LE SYSTÈME DES PLATES-FORMES MARINES PLÉISTOCÈNES DU VAL DE SAIRE

Dans le nord-est du Val de Saire (fig. 1) se dessine un système de replats topographiques étagés. La présence, signalée dès le début du xx^e siècle, de dépôts d'origine

marine sur ces replats a conduit à les considérer comme des plates-formes d'abrasion marine façonnées dans le substrat granitique (Bigot, 1930; Dangeard, 1936; Graindor, 1958; Elhaï, 1963; Coutard *et al.*, 1981...). De nouvelles études (Coutard, 2003; Coutard *et al.*, 2006), ont confirmé cette attribution génétique. Quatre plates-formes étagées ont été reconnues avec certitude grâce à l'identification de leurs limites morphologiques (ruptures de pente, paléofalaises) et à un suivi de la continuité topographique des géométries repérées, le tout accompagné de l'analyse des plages fossiles proprement dites. En l'absence de marqueurs lithologiques et biostratigraphiques, et dans l'impossibilité d'établir des relations géométriques directes entre lambeaux de plates-formes isolés, nous avons dû rechercher des marqueurs de chronologie relative autres. Aussi, pour démontrer que la plus haute plate-forme était bien la plus ancienne, l'état d'altération des dépôts et du substrat granitique sous-jacent a été étudié. Cet article a pour objet de détailler les résultats obtenus sur l'état d'altération des galets de silex contenus dans les dépôts marins, qui ont confirmé l'antériorité des plus hautes plates-formes.

Ces plates-formes ont été numérotées de IV à I (fig. 2) depuis la plus ancienne (la plus haute) jusqu'à la plus

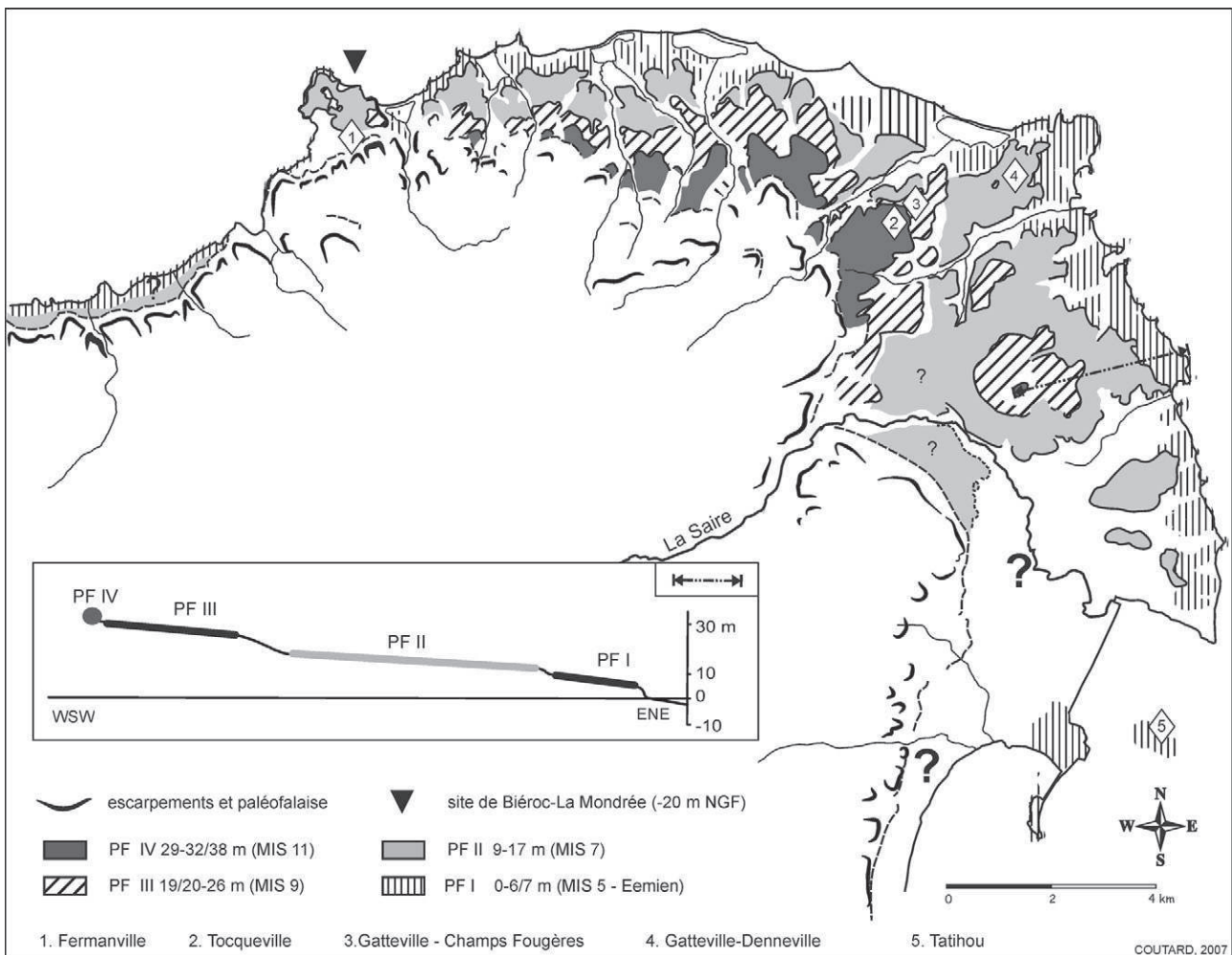


Fig. 2: Carte de l'extension des plates-formes marines.

Losanges: localisation des lieux cités dans le texte. 1. Fermanville. 2. Tocqueville. 3. Gatteville-Champs Fougères. 4. Gatteville-Denneville. 5. Tatihou. Dans le cartouche: transect montrant l'étagement des plates-formes.

Fig. 2: Map of the extent of Pleistocene wave-cut platforms. Box: transect showing the stepped platforms.

jeune (la plus basse). Les altitudes sont données au niveau du substrat, ce qui permet des corrélations indépendantes de l'épaisseur de dépôts conservée. Des noms de formations ont été proposés pour les dépôts marins pléistocènes (Coutard *et al.*, 2006):

– PF IV: 29-33 m NGF, voire 38 m à proximité de la paléofalaise. Les dépôts marins pléistocènes reposant sur cette plate-forme sont regroupés sous le terme de Formation du Trésor d'après les observations faites dans les parcelles du Trésor à Tocqueville (fig. 2, point 2);

– PF III: 19-26 m NGF. Les dépôts de sables et galets reposant sur la PF III sont définis comme la Formation de Gatteville (fig. 2, point 3);

– PF II: 9-18 m NGF. Les dépôts marins associés à cette plate-forme ont été observés à Réville (Courclais, 14 m NGF), Montfarville (La Houe, 16 m NGF; Michel, 1972), à Réthoville (10 m NGF; Hommeril, 1967), dans le secteur de Gatteville - Denneville (fig. 2, point 4), et à Fermanville-Cap Lévi (Coutard *et al.*, 1981; fig. 2, point 1). Ils sont regroupés sous le terme de Formation du Cap Lévi;

– PF I: 0-7 m. Tous les dépôts marins recouvrant la PF I sont regroupés dans la Formation de Montfarville, largement observable le long des côtes. L'altitude maximale atteinte par la plate-forme est de 6-7 m NGF dans l'ensemble du Val de Saire.

Il n'a pas été possible de réaliser des datations absolues sur les sédiments des plus hautes plates-formes en raison des doses importantes de radiations émises par le substrat granitique et les sédiments eux-mêmes. Des datations effectuées sur la Formation de Montfarville ont confirmé son appartenance à l'Eémien (Coutard *et al.*, 2006). Enfin, les observations effectuées sur la coupe de Port-Pignot à Fermanville (Coutard *et al.*, 1981) ont mis en évidence la présence du sol éémien dans la séquence de couverture et ont ainsi permis d'établir, sur des bases stratigraphiques, un âge saalien pour la formation du Cap Lévi.

Ainsi, dans l'hypothèse la plus simple, c'est-à-dire si tous les interglaciaires sont enregistrés, les quatre plates-formes identifiées peuvent être attribuées aux quatre derniers hauts-niveaux marins, à savoir les stades 5e, 7, 9 et 11 de la chronologie isotopique, entre 120 et 420 000 ans BP (Coutard *et al.*, 2006). La morphogenèse est cyclique, ce qui peut être expliqué par l'interaction entre les variations du niveau marin et un soulèvement tectonique de l'ordre de 60 mm/ka sur les quatre derniers cycles, menant à l'étagement des plates-formes d'érosion marine successives. Le fait que les niveaux soient de plus en plus anciens avec l'altitude et la régularité de l'étagement implique également qu'au cours des interglaciaires de la période considérée ici, le niveau marin n'a jamais dépassé de plus de quelques mètres le niveau actuel.

1.3 - LES DÉPÔTS MARINS PLÉISTOCÈNES DU VAL DE SAIRE

Les plates-formes ont été explorées principalement à la tarière et étudiées plus en détail grâce à des tranchées réalisées à la pelle mécanique dans des secteurs-clefs (essentiellement Tocqueville, Gatteville et Montfarville), les dépôts du Pléistocène supérieur affleurant également dans les coupes littorales (plus de 200 points d'observation au total).

L'étude des dépôts marins et des formations continentales qui les recouvrent vise à reconstituer les environnements et les dynamiques de dépôt ainsi qu'à décrire l'évolution post-dépositionnelle du sédiment et du substrat qu'il recouvre. Les dépôts marins ont été caractérisés par granulométrie, morphoscopie des sables, analyses chimiques et diffractométrie aux rayons X (minéralogie des argiles) (Coutard, 2003). Des comptages de galets ont été effectués lorsque c'était possible, visant à déterminer la répartition pétrographique des galets, et pour les silex leur état d'altération. Les observations micromorphologiques permettent en outre d'apporter des éléments sur les pédogenèses inscrites dans les dépôts.

L'ensemble des observations a montré que les dépôts marins recouvrant les diverses plates-formes sont similaires en composition et en épaisseur, ce qui reflète bien la nature cyclique des fluctuations climatiques et eustatiques et la permanence du stock sédimentaire au cours du Pléistocène. La séquence généralement observée est composée de galets (silex, quartz, granite, roches triasiques...) dans une matrice sablo-graveleuse à la base (cordons de galets), puis de sables azoïques quartzeux bien classés attribués de par leurs caractéristiques granulométriques et morphoscopiques à des hauts de plage ou des dunes.

2 - L'ALTÉRATION, UN MARQUEUR DE CHRONOLOGIE RELATIVE ?

L'homogénéité des formations marines sur les diverses plates-formes permet donc des comparaisons sur leur état d'altération car si les dépôts sont originellement semblables, les différences observées aujourd'hui doivent être le résultat du temps écoulé. Cette démarche n'est pas nouvelle et a déjà été largement utilisée en particulier pour les terrasses fluviatiles (Bornand, 1978; Pellerin, 1977; Icole, 1980; Hubschman, 1975 a, b; Macaire, 1981, 1986). Elle a ses limites puisque le raisonnement n'est valable que si les formations considérées n'ont pas été recouvertes après leur dépôt de manière différente et qu'elles ont évolué dans les mêmes conditions (climat, pédogenèses...). Dans notre secteur d'étude, seule la couverture loessique du Pléniglaciaire supérieur du Weichselien recouvre les dépôts marins pléistocènes. Les loess antérieurs manquent même s'ils ont probablement existé. Nous pouvons donc supposer que les dépôts marins ont subi une altération météorique « amortie » par une couverture loessique au cours de certaines périodes. Le climat a été alternativement périglaciaire et tempéré.

3 - L'ALTÉRATION DES PLATES-FORMES ET DES SÉDIMENTS MARINS PLÉISTOCÈNES

Pour exprimer le degré d'altération météorique, notre attention s'est portée sur l'état d'altération du substrat (la morphogenèse marine a déblayé les altérites anciennes) et des sédiments marins, exprimé par la teneur et la minéralogie des argiles, ainsi que par les traits pédologiques et l'état d'altération des galets de silex contenus dans les dépôts marins.

Quelques analyses chimiques sur les arènes granitiques sous-jacentes aux dépôts marins tendent à montrer un appauvrissement en certains éléments au cours du temps (Fe, Mn, Mg, Ca, Na). Pour ces deux derniers, cela correspond à l'altération chimique des plagioclases, minéraux les plus altérables du granite (Godard *et al.*, 1994), qui libère les bases. Les résultats ont simplement montré une altération un peu plus poussée sur PF IV (Coutard, 2003).

Les observations portant sur les argiles du sédiment et les traits pédologiques visibles en lames minces ont également donné quelques informations sur la chronologie relative des plates-formes (Coutard, 2003). Les évolutions constatées dans les cortèges argileux depuis la plate-forme I à la plate-forme IV sont peu marquées, mais réelles : dominés par la kaolinite et caractérisés par des variations dans la composition entre illite-smectites-vermiculites, les cortèges argileux semblent principalement refléter l'état d'altération des minéraux issus du granite, ainsi qu'une contamination par les apports loessiques postérieurs. Les minéraux issus du granite sont plus altérés sur les plates-formes les plus hautes. Par ailleurs, les observations micromorphologiques sur les sédiments marins des diverses plates-formes ont pu mettre en évidence des différences importantes dans les pédogenèses, en particulier en ce qui concerne la PF IV. Sur cette dernière, une phase fersiallitique et une phase « acide », marquée par des grains de quartz cariés (dissolution de la silice) et des silicifications secondaires, ont pu être identifiées. Dans les dépôts plus récents, des pédogenèses de type sol lessivé à tendance rubéfiante ont été observées, souvent fortement remaniées par les phénomènes de gel-dégel périglaciaires (Coutard, 2003).

4 - L'ALTÉRATION DES SILEX

4.1 - POURQUOI S'INTÉRESSER AUX SILEX ?

La datation relative des formations grossières riches en galets est basée sur l'étude de l'évolution d'un type de roche que l'on s'attache à suivre sur l'ensemble des dépôts étudiés. Ainsi, Pellerin (1977) a étudié l'altération des granites dans les nappes alluviales de l'Orne, en pratiquant des analyses diffractométriques directement sur les galets.

Dans le Val de Saire, différentes roches sont présentes dans les galets des formations marines fossiles. Notre choix s'est porté sur le silex pour plusieurs raisons :

- les roches du socle peuvent provenir d'un remaniement des formations triasiques à galets, très répandues dans le secteur (en particulier, quartz et grès quartzites) ;
- les roches briovériennes sont très fragiles et s'altèrent rapidement, de même que les roches issues du démantèlement des formations triasiques consolidées (arkoses, microconglomérats) et sont donc peu propices à une différenciation selon l'âge du dépôt ;
- l'altération des granites est difficilement mesurable selon notre méthode d'étude ;
- les roches filoniennes (aprites par exemple), bien que relativement favorables à ce genre d'étude (Verague *et al.*, 1991), sont peu fréquentes ;
- le silex est omniprésent dans quasiment l'ensemble des formations marines ; c'est même l'élément diagnostic qui permet de différencier immédiatement sur le terrain les formations quaternaires marines des dépôts triasiques meubles ;
- dans certains dépôts, le silex constitue jusqu'à 80 % des galets, ce qui ne laisse guère d'autres possibilités.

Le silex est donc la formation lithique la plus adaptée à notre méthode d'étude et aux objectifs poursuivis. Deux autres paramètres rendent également intéressante l'étude des silex du Val de Saire :

- la provenance des silex reste discutée dans ce contexte armoricain (étage géologique concerné, localisation des gîtes) ;
- le silex est la matière première privilégiée par l'homme dans l'ensemble des sites préhistoriques du secteur.

4.2 - CARACTÉRISTIQUES MINÉRALOGIQUES DES SILEX

« Un silex est un corps de silice massive au sein d'un sédiment calcaire, généralement crayeux, dont il se détache parfaitement. [...] On observe une différenciation très marquée entre le cœur et le cortex du silex. Le cœur est constitué d'une matrice compacte [tandis que] le cortex présente un réseau très dense de cavités dans lesquelles les cristallites de quartz sont beaucoup plus gros et mieux organisés. » Dans la roche d'origine, « la différenciation du cortex tient donc surtout à l'apparition en quelques micromètres d'une porosité importante » (Fröhlich, 2006).

Dans le Val de Saire, les déterminations pétrographiques, macroscopiques et microscopiques (couleurs, grains, traces d'oxydation, état de cristallisation...) ont mis en évidence la présence de silex crétacés, mais également de silex jurassiques, ce qui est nouveau pour le secteur (tab. 1). Les silex se distinguent en deux grands ensembles : les silex jurassiques, gris clair à foncé, mats, de texture souvent relativement plus grossière, et les silex crétacés (Sénonien et Cénomaniens), de texture plus fine et de couleur très variable. Le faciès cénomanien se caractérise par une teinte noire mate et la présence de micro-inclusions lui donnant un aspect piqueté. Cependant, il est très difficile d'extrapoler aux

Formation	Jurassique indifférencié		Crétacé indifférencié			Cénomaniens
	gris clair à foncé mat	brun-noir à cortex rugueux	gris clair à taches plus sombres	gris foncé translucide	brun gris marbré	noir à micro-inclusions
éléments macroscopiques						
Calcédonite cryptocristalline sphérolites longues fibres colloforme	+++ +	++++	++++	++++ +	++++ +	++++
Quartz détritiques						
Pelloïdes						
Calcite		+			+	++
Bioclastes	++++	++++	++		+++	+++
Taille des bioclastes	400 µm -> 1,5 mm	~ 1 mm	< 800 µm		600 µm - 1,5 mm	300 µm - 1,5 mm
Spicules	+++	++	+	++	+++	+++
Échinodermes		++			++	
Bivalves						
Foraminifères	+	++	+			
Bryozoaires	+++		++		+	
Autres						
Matière organique	+	++				
Oxydes de fer	+	+		+	++	+
Autres	ankérite			birdeyes		glauconie
exemples	TR4/TE	CAR6brun-noir	CF2/M	BL6/57	CAR6	QueryS1b
	+ présent ++ assez abondant +++ abondant ++++ très abondant					

Tab. 1 : Caractéristiques pétrographiques des silex du Val de Saire.
Tab. 1: Val de Saire flint petrographic characteristics.

autres silex les déterminations réalisées en lames minces sur quelques-uns, les faciès macroscopiques étant trop proches dans la plupart des cas. Il est même souvent difficile de distinguer silex crétacés et jurassiques, même en lame mince.

4.3 - GÉNÉRALITÉS SUR LA DISSOLUTION DE LA SILICE ET L'ALTÉRATION DES SILEX

L'intensité de la dissolution de la silice dans les sols est principalement dépendante des conditions climatiques et du temps écoulé. Dans les sols des régions chaudes, l'altération géochimique est nettement plus poussée qu'en climat tempéré; elle est liée, généralement, à une longue durée. Ainsi, sous les climats équatoriaux humides, l'altération des minéraux primaires peut être pratiquement totale (ferrallitisation). La désilicification est très poussée. Sous nos climats tempérés, les hydrolyses sont partielles et l'altération géochimique n'aboutit pas à la dissolution de la silice (Duchaufour, 1997).

Pourtant, l'altération des silex est observée depuis longtemps dans les sites archéologiques du Pléistocène supérieur. Des observations au MEB sur des silex taillés paléolithiques altérés ont montré des pores proportionnellement de très grande taille, la forte porosité étant responsable de la couleur blanche acquise par le silex (Texier, 1981). Le remontage sur un même bloc de pièces altérées et non altérées est courant, l'altération semblant dépendre de la situation topographique, des conditions de drainage, de la porosité initiale de la roche, de la teneur en silice des eaux de drainage.

Ce contraste est bien mis en évidence par le cas des Argiles à silex (RS) du Bassin Parisien. La désilicifica-

tion des silex y est faible (0,9 à 7,3 %), traduite majoritairement par une augmentation de l'épaisseur du cortex et du volume des cavernes de surface (Laignel & Meyer, 2000), ce malgré un âge souvent cénozoïque. Par contre, les silex des biefs à silex, formations de remaniement des RS mises en place essentiellement lors des deux derniers cycles glaciaires, peuvent être pulvérulents (Laignel *et al.*, 1998).

4.4 - PRINCIPE DE L'ÉTUDE

L'étude des silex s'est effectuée selon deux approches :

- l'une macroscopique, seule utilisable sur le terrain ;
- l'autre microscopique et analytique, destinée à comprendre davantage l'altération d'un silex et approfondir les observations faites à l'œil nu.

On considère que dans les plages, tout comme dans les formations fluviales (Gibbard, 1986), les frottements et les chocs pendant le séjour sur l'estran débarrassent rapidement le silex de son cortex originel, qui persiste cependant parfois dans les creux. L'extérieur du silex est alors constitué d'une fine patine blanche souvent mâchurée par les coups d'ongle (cas idéal prouvant l'activité marine) ou parfois totalement lisse (cas de la plage actuelle de Gatteville-le-Phare). Le cortex observable dans les plages fossiles est alors uniquement dû à l'altération post-dépositionnelle. Nous pouvons parler de néocortex ou cortex d'altération. Ce postulat de base correspond bien à la réalité en règle générale : il n'a ainsi pas été possible d'effectuer des mesures sur les silex des dépôts les plus récents (actuels et émiens), faute de cortex.

Après son dépôt, le galet de silex s'altère : les restes de cortex originel et la patine évoluent en cortex d'altération qui s'épaissit par dissolution et perte de matière (Gibbard, 1986 ; Bridgland, 1990). La perte de poids due à cette désilicification peut être très sensible et le silex devenir poudreux.

Au plan macroscopique, des comptages ont été effectués sur les silex (supérieurs à 2 cm) des différentes plates-formes. Tous sont cassés au marteau pour noter l'épaisseur du cortex d'altération selon des catégories simples semi-quantitatives : mince (< 1 mm), épais (1-3 mm), très épais (> 3 mm), blanc à cœur (fig. 3). Plus d'une soixantaine de silex a été comptée à chaque fois afin d'obtenir un résultat significatif. Huit comptages ont été réalisés dans les sondages les plus favorables sur les communes de Tocqueville (PF IV) et Gatteville (parcelles de Champs Fougères pour la PF III et hameau de Denneville pour la PF II).

Des silex représentatifs des comptages ont ensuite fait l'objet de mesures de la surface spécifique (total de la surface des parois des pores) avec un analyseur de surface spécifique (communément appelé à tort BET), complétées par la détermination de la porosité au porosimètre à mercure.

Dans un premier temps, des mesures ont été effectuées sur les cœurs des silex, de manière à vérifier si le silex s'altère dans son ensemble. Les valeurs obtenues sont trop faibles pour déceler des variations significatives (tab. 2). Ces mesures confirment qu'un silex s'altère de l'extérieur vers l'intérieur et que le cœur reste sain, la

perte de matière caractérisant le cortex d'altération.

Le programme principal de mesure s'est donc particulièrement intéressé aux cortex de silex.

4.5 - PRINCIPES DES APPAREILS DE MESURE

Les appareils utilisés dans cette étude se trouvent au Centre de géomorphologie du CNRS (UMR 6143) à Caen.

PF	n° éch.	cœur		cortex	
		surf. sp. (m ² /g)	surf. sp. (m ² /g)	por. Hg (%)	Md pores (µm)
PF IV	235 (Tocqueville)	0,403	1,399		
	179A	0,088	2,557	16,7	0,09
	179B	1,656	4,01		
PF III	173E	0,014	3,836	16,6	0,097
	177	0,149			
PF II	144	0,779	5,913	19,6	0,05
PF I	Port-Lévi (10)	1,01274	pas de cortex		
	Fouly	0,09	2,362	18,1	0,09
actuel	Le Crau	0,013	pas de cortex		

Tab. 2: Mesures de surface spécifique sur les cœurs et cortex de quelques silex issus des différentes plates-formes marines du Val de Saire.

Tab. 2: Results of specific surface measurements on flint hearts and cortex from wave-cut platforms of Val de Saire.

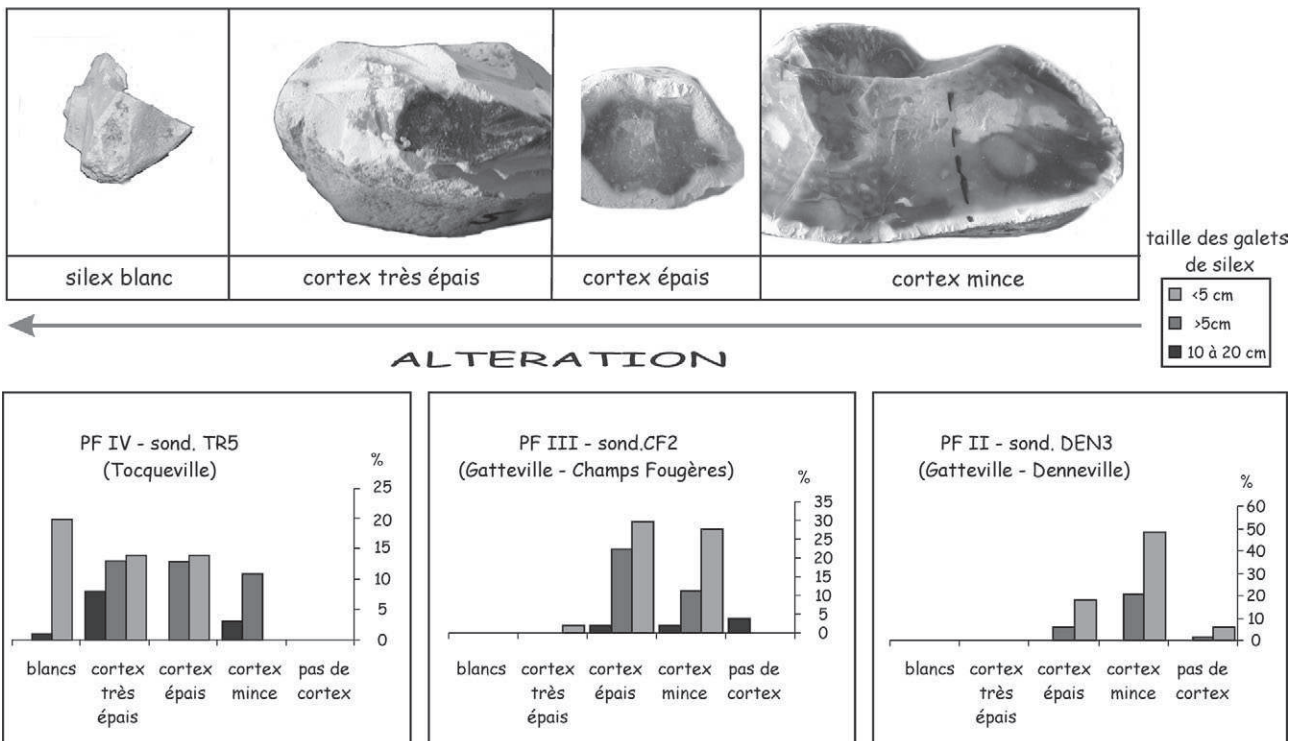


Fig. 3: Altération des silex en fonction de l'altitude du dépôt : photo des types définis macroscopiquement et résultat des comptages.
 Fig. 3: Flint alteration according to the altitude of the deposits. Pictures showing the types defined macroscopically and the results of countings.

Le principe du porosimètre à mercure (*pore sizer*) est d'injecter du mercure à des pressions progressivement de plus en plus élevées dans un échantillon de roche afin de connaître la porosité totale et la granulométrie des pores. Deux courbes sont obtenues, l'une d'intrusion, l'autre d'extrusion; la différence entre elles indique qu'une partie du mercure reste piégée dans l'échantillon rocheux (fig. 4). L'inflexion de la courbe d'intrusion indique la médiane du diamètre des pores. Une surface spécifique peut ensuite être calculée à partir de cette médiane et du poids de l'échantillon, mais dans ce cas, on ne tient pas compte de la forme réelle des pores, considérée comme cylindrique. La mesure est destructrice dans le sens où l'échantillon, contenant du mercure, n'est plus utilisable pour d'autres mesures.

L'analyseur de surface spécifique injecte des gaz dans l'échantillon : « la mesure de la surface spécifique de même que celle de la dimension des pores (volume et diamètre) est basée sur l'adsorption et la désorption d'un gaz (typiquement azote, argon ou krypton) à la surface et dans les pores de l'échantillon, à basse température. L'adsorption est l'augmentation de la concentration des molécules de gaz à la surface du solide avec lequel il rentre en contact. Les molécules

de gaz sont fortement immobilisées à la surface du solide. La désorption est le mouvement des molécules de gaz s'éloignant de la surface du solide » (www.er.uqam.ca/nobel/r27734/solcon/surfasp.html).

Le krypton a été utilisé pour les échantillons pris dans les cœurs des silex, et l'azote pour les échantillons de cortex. Le BET peut analyser les pores jusqu'à 2 nm, le porosimètre à mercure jusqu'à 6 nm.

4.6 - APPORTS DES MESURES PHYSIQUES A L'ÉTUDE DE L'ALTÉRATION DES SILEX

Les mesures de surface spécifique ont montré que plus un cortex est épais, plus sa surface spécifique est grande (tab. 3) : le développement des pores se fait parallèlement à l'extension de l'altération vers le cœur du silex. Les valeurs de surface spécifique vont de 2,099 à 5,91 m²/g. Un silex particulièrement altéré, poudreux, atteint même 15 m²/g!

Les mesures au porosimètre à mercure confirment ces valeurs fortes, avec des porosités obtenues sur les cortex s'étendant entre 11,43 et 35,04 %, ce qui est supérieur aux valeurs autour de 10 % obtenues par Laignel sur des silex de l'argile à silex (Laignel & Meyer, 2000). Les silex des plates-formes marines fossiles sont ainsi, sur le

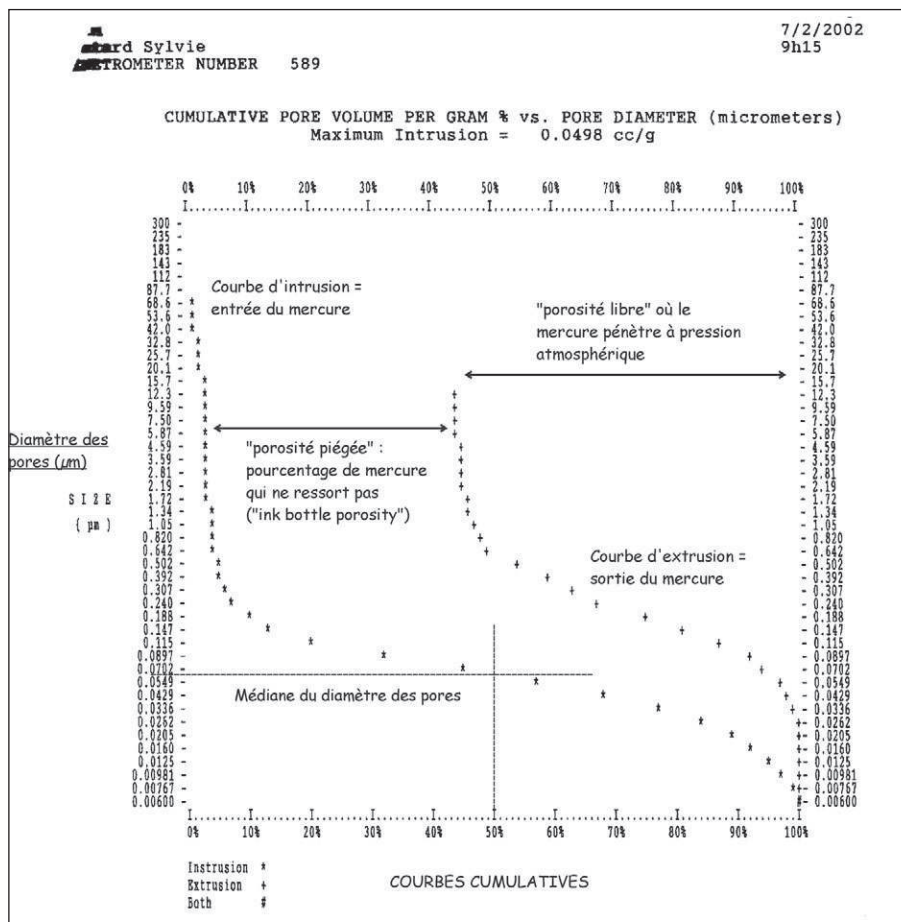


Fig. 4 : Modèle de courbe obtenue au porosimètre à mercure montrant la courbe d'intrusion et la courbe d'extrusion. En ordonnée, le diamètre des pores.

Fig. 4: Example of curve obtained with the pore sizer showing the intrusion and extrusion curves. On Y-axis, pore diameter.

épaisseur du cortex d'altération												
BLC (blanc à cœur)				TE (très épais)			E (épais)			M (mince)		
PF	n° éch.	surf. sp. (m ² /g)	por. Hg (%)	n° éch.	surf. sp. (m ² /g)	por. Hg (%)	n° éch.	surf. sp. (m ² /g)	por. Hg (%)	n° éch.	surf. sp. (m ² /g)	por. Hg (%)
PF IV	TR5BLC	5,652	35	TR5TE (poudreux)	15,001		179A	2,557	16,7	179B	4,009	
				TR4TE	4,085	27,7	TR4E	3,257	20,7	TR2M	2,701	11,4
	TR4BLC	4,357		TR1TE	3,828		TR1E	3,258				
PF III							CF2ME	3,905				
							173E	3,838	16,6	CF2M	5,475	
							CH1E	4,479		CF4M	2,099	
PF II	144BLC	3,895		DEN4supTEbis	4,447		144E	3,843				
	144	5,913	19,6	DEN4supTE	3,558		DEN4supE	4,402		DEN4supM	3,281	
	DEN4supBLC	4,597					DEN4infTE/E	2,85				
	DEN4infBLC	5,095					DEN4infE	4,186				
PF I							Tatihou	4,672				
							Fouly	2,363	18,1			

Tab. 3 : Valeurs de surface spécifique (surf. sp.) et de porosité au mercure (por. Hg) du cortex d'altération en fonction de l'épaisseur du cortex (M : mince, E : épais, TE : très épais, BLC : blanc à cœur) et de l'altitude du dépôt (PF : plate-forme).

En grisé, les silex jurassiques, les autres sont crétacés ou indéterminés. Les numéros d'échantillons correspondent aux numéros des coupes lors des levés.

Tab 3: Specific surface (surf. sp.) and porosity (por. Hg) of alteration cortex according to cortex thickness (M: thin, E: thick, TE: very thick, BLC: all white) and altitude of the deposits (PF: platform). Jurassic flints in grey, the others are cretaceous or undetermined. Sample numbers correspond to section numbers.

plan de l'altération, plus proches des formations quaternaires de bief à silex (Laignel *et al.*, 1998). Cette proximité peut être attribuée à une microfissuration des silex, causée par les chocs lors du transport des galets et les alternances gel-dégel subies au cours du Pléistocène (effet de « fatigue », Coutard & Lautridou, 1977).

Le porosimètre à mercure donne une courbe cumulée des diamètres des pores, calculée selon la pression de mercure injecté. Ainsi, sur la figure 5 qui présente les résultats sur 4 silex issus de la PF IV, on observe un décalage des courbes correspondant à une augmentation de la taille des pores au cours de l'altération, parallèlement à l'épaississement du cortex. On remarque que pour les échantillons TR5BLC et TR4TE, la courbe n'est plus une sigmoïde parfaite et indique l'existence de deux familles de pores. La différence entre les courbes d'intrusion et d'extrusion nous renseigne sur

l'importance de la porosité piégée, c'est-à-dire des pores développés au sein de la roche mais reliés uniquement par de fins capillaires: le mercure y reste piégé et ne ressort pas.

Les données de porosité permettent de calculer une surface spécifique. La différence entre cette surface spécifique calculée et la surface spécifique réelle mesurée au BET nous informe également sur la configuration des pores, comme le montre l'exemple suivant (tab. 4).

Pour les 2 silex les moins altérés, la surface spécifique calculée est supérieure à la surface réelle, ce qui est révélateur d'une porosité piégée importante: les renflements du réseau poreux sont comptabilisés comme des pores plus petits en raison de la pression nécessaire pour injecter le mercure dans les capillaires très fins qui servent à leur remplissage. Les pores étant alors compta-

Réf. éch. (PF IV)	surface spécifique réelle BET (m ² /g)	surface spécifique calculée (m ² /g)	porosité Hg	diamètre des pores Md (µm)
TR5BLC	5,65	2,25	35,04	1,30
TR4TE	4,08	2,94	27,66	0,24
TR4E	3,26	5,09	20,75	0,11
TR2M	2,70	4,78	11,43	0,06

Tab. 4 : Tableau récapitulatif des surfaces spécifiques et des porosités mesurées et calculées pour une série de 4 silex de la plate-forme IV.

Tab. 4: Specific surfaces and porosities measured and calculated for 4 flints of the PF IV.

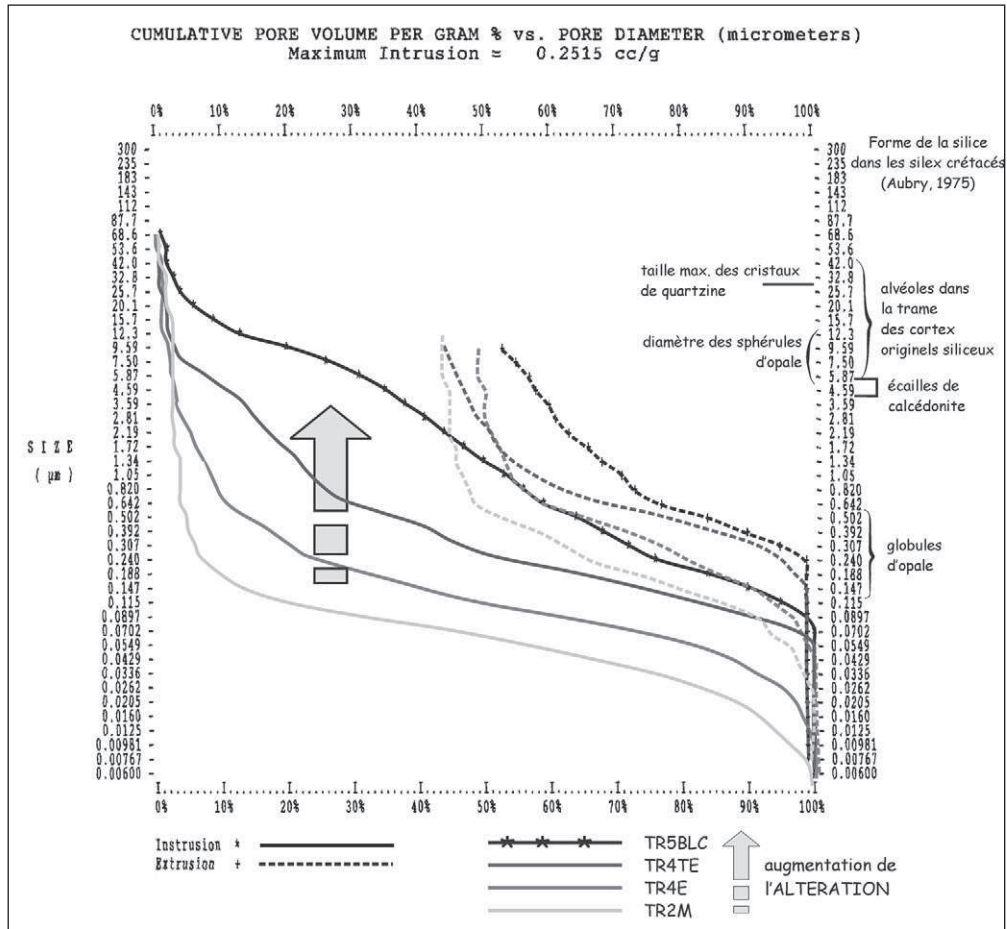


Fig. 5: Courbes obtenues au porosimètre à mercure sur 4 silex issus de la plate-forme IV (Tocqueville, voir fig. 1 pour la localisation et tab. 3). En ordonnée, le diamètre des pores. À droite, en référence, dimensions atteintes par les différentes formes de silice (Aubry, 1975).
 Fig. 5: Curves obtained with the pore sizer for 4 flints taken from the PF IV (Tocqueville, see fig. 1 for location and tab. 3). On Y-axis, pore diameter. On the right, sizes of the different forms of silica according to Aubry (1975).

bilisés comme une somme de capillaires fins, la surface calculée est supérieure à la surface réelle. Par contre, pour les 2 plus altérés, la situation est inverse, la taille des pores augmentant et la porosité piégée diminuant, la pression d'injection du mercure nécessaire est faible et la surface calculée est sous-estimée, probablement aussi parce que la forme réelle des pores n'est pas circulaire comme on le considère dans les calculs faits à partir des données porosimétriques.

4.7 - APPORTS À LA STRATIGRAPHIE

Les mesures de surface spécifique ont donc validé les catégories de cortex établies à l'œil nu.

Les histogrammes montrent une forte augmentation du nombre de silex au cortex très épais voire blancs à cœur depuis la plate-forme la plus basse jusqu'à la plus haute (fig. 3). L'altération des silex augmente donc bien globalement selon l'âge des dépôts. Dans certains cas (coupe DEN4sup, Denneville à Gatteville sur la PF II), le degré d'altération des galets semble signer la reprise partielle de stocks plus anciens, bien que des variations dans l'exposition aux agents d'altération et dans les pédogenèses subies soient également possibles en fonction de la topographie passée (fig. 3).

Cependant, les comptages ont montré que l'ensemble des états d'altération est représenté sur chacune des plates-formes fossiles (tab. 4): l'altération d'un stock de silex n'est pas homogène et peut affecter certains galets plus que d'autres, d'où la nécessité de travailler sur des lots de galets assez importants pour faire ressortir des dominantes. Les paramètres expliquant cet état de fait sont jusqu'à présent mal identifiés (topographie, humidité, conditions de drainage, pétrographie...). Le rôle de la pétrographie ne semble pas négligeable, peut-être en fonction des différentes formes de silice (taille des cristallites, opale...) ou éventuellement de la présence de carbonates dans la matrice du silex. Des études complémentaires par microsonde ou autres seraient à cet égard intéressantes.

5 - CONCLUSION

Nous pouvons donc affirmer que, dans le secteur étudié et pour la période concernée (Pléistocène moyen et supérieur), l'altération des silex est un marqueur adéquat de l'âge relatif des plates-formes marines. Dans le cas du Val de Saire, l'ensemble des aspects évoqués en

ce qui concerne l'altération a permis d'établir la chronologie relative entre plates-formes et par conséquent de valider les corrélations entre lambeaux de plates-formes isolés basées sur le critère altimétrique. Au cours de ces travaux, nous n'avons pas observé de lambeaux de formations marines plus anciennes piégées dans des creux des plates-formes sous des dépôts marins plus récents, ce qui souligne là encore la régularité des paliers d'abrasion.

Le comptage d'un grand nombre de galets sur le terrain est nécessaire. Les mesures ont montré que les catégories distinguées à l'œil nu correspondent à une réalité physique mesurable. L'altération des silex se développe à la fois vers l'intérieur du silex et par augmentation de la taille des pores dans le cortex. Les outils techniques utilisés sont performants dans cette approche corticométrique et une utilisation plus poussée permettrait d'approcher de plus près les modalités d'altération des silex, ou d'autres roches, à l'échelle microscopique. Un croisement avec des observations au MEB, que nous n'avons pu mener lors de cette étude, pourrait être très fructueux.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier ici O. Dugué et J.P. Camuzard pour leur aide dans la détermination des silex et l'interprétation des lames minces de sols, ainsi que G. Guillemet (UMR 6143) pour la réalisation des mesures. Merci également aux deux relecteurs, M. Dubar et B. Hallegouet pour leurs remarques constructives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUBRY M.P., 1975 - Recherches sur la nannopetrographie des roches siliceuses. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Museum du Havre*, **LXII** (2), 8-34.
- BIGOT A., 1930 - Les terrasses pléistocènes du littoral du Cotentin. *Livre jubilaire de la Société Géologique de France*, t. I, 133-148.
- BORNAND M., 1978 - *Altération des minéraux fluvioglaciers, genèse et évolution des sols sur les terrasses quaternaires de la moyenne vallée du Rhône*. USTL Languedoc, Publ. SES-INRA, **444**, 329 p.
- BRIDGLAND D.R., 1990 - The recognition and distinction of flint and chert in the analysis of clasts from pleistocene gravel in southeast England. In M.-R. Seronie-Vivien & M. Lenoir (dir.), *Le silex de sa genèse à l'outil*. Actes du Vème colloque international sur le silex, Bordeaux, 17 sept.-2 oct. 1987. Éditions du CNRS, Cahier du Quaternaire n° 17, 119-130.
- CAMUZARD J.-P., 2000 - *Les sols marqueurs de la dynamique des systèmes géomorphologiques continentaux*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Département de Géologie, 600 p.
- COUTARD J.-P., & LAUTRIDOU J.-P., 1977 - Effet du gel sur diverses roches de Normandie (grès, granites, silex). *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie*, **105**, 79-82.
- COUTARD J.-P., HELLUIN M., OZOUF J.-C., & PELLERIN J., 1981 - Le Quaternaire marin et continental du Cap Lévi et de ses abords (Fermanville, Manche). *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie*, **108**, 7-22.
- COUTARD S., 2003 - *Formations quaternaires en bordure d'une mer épicontinentale, la Manche. Tectonique, eustatisme, climat et occupations humaines. Exemple du Val de Saire (Normandie, France)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 446 p.
- COUTARD S., LAUTRIDOU J.-P., RHODES E., & CLET M., 2006 - Tectonic, eustatic and climatic significance of raised beaches of Val de Saire, Cotentin, Normandy, France. *Quaternary Science Reviews*, **25** (5-6), 595-611.
- DANGEARD L., 1936 - Sur la définition d'un étage normannien. *Comptes-Rendus Sommaires des Séances de la Société géologique de France*, 5^e série, t. VI, 164-166.
- DUCHAUFOR P., 1997 - *Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement*. Éd. Masson, Paris, 5^e édition, 291 p.
- DUGUE O., LAUTRIDOU J.-P., QUESNEL F., POUPINET N., CLET M., CAMUZARD J.-P., COUTARD S., BOURDILLON C., FRESLON M., AUFFRET J.-P., LAVILLE E., & GAIN O., 2005 - *Le Cotentin du Mésozoïque au Cénozoïque*. Livret-Guide de l'Excursion de l'Association des Géologues du Bassin de Paris, 148 p.
- ELHAÏ H., 1963 - *La Normandie occidentale entre la Seine et le Golfe normand-breton. Étude morphologique*. Thèse d'État, Université de Bordeaux, 624 p.
- FROHLICH F., 2006 - Silex et cherts : questions de genèse. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **43** (2), 5-22.
- GIBBARD P.L., 1986 - Flint gravels in the Quaternary of southeast England. In G.d.G. Sieveking & M.B. Hart (eds), *The scientific study of flint and chert*. IVth international flint symposium held at Brighton Polytechnic, 10-15 April 1983, Cambridge University Press, 141-149.
- GODARD A., LAGASQUIE J.-J., & LAGEAT Y. (eds), 1994 - *Les régions de socle. Apports d'une école française de Géomorphologie*. Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, fasc. **43**, 328 p.
- GRAINDOR M.-J., 1958 - Niveaux marins quaternaires dans le Cotentin et corrélations avec les îles Anglo-Normandes. *Comptes-Rendus Sommaires des Séances de la Société Géologique de France*, **2**, 31-34.
- HOMMERIL P., 1967 - *Étude de géologie marine concernant le littoral bas-normand et la zone pré-littorale de l'archipel anglo-normand*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 304 p.
- HUBSCHMAN J., 1975a - Les terrasses récentes de la Garonne et leur évolution. In Le piémont quaternaire de la Garonne (sud-est du bassin Aquitain, piémont central nord-pyrénéen). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **44-45**, 137-147.
- HUBSCHMAN J., 1975b - L'évolution des nappes alluviales antérisiennes de la Garonne dans l'avant-pays molassique. In Le piémont quaternaire de la Garonne (sud-est du bassin Aquitain, piémont central nord-pyrénéen). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **44-45**, 148-160.
- ICOLE M., 1980 - L'altération au sein des alluvions quaternaires du piémont occidental nord-pyrénéen : éléments de corrélations. In J. CHALINE (dir.), *Problèmes de stratigraphie quaternaire en France et dans les pays limitrophes*. Actes de la Table-Ronde de Dijon, Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire, N.S., **1**, 312-313.
- LAINEL B., QUESNEL F., MEYER R., & LEBRET P., 1998 - Les biefs à silex : dépôts périglaciaires de versants issus des altérites à silex du plateau du bassin de Paris. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **169** (4), 605-612.
- LAINEL B., & MEYER R., 2000 - La désilicification des silex des formations résiduelles à silex de l'ouest du Bassin de Paris. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **171** (5), 569-576.
- LARSONNEUR C., 1971 - *Manche centrale et Baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Caen, 394 p.
- MACAIRE J.-J., 1981 - *Contribution à l'étude géologique et paléopédologique du Quaternaire dans le sud-ouest du Bassin de Paris (Touraine et ses abords)*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Tours, 450 p.
- MACAIRE J.-J., 1986 - Apport de l'altération superficielle à la stratigraphie - exemple des formations alluviales et éoliennes plio-quaternaires de Touraine (France). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **27-28** (3/4), 233-245.
- MICHEL D., 1972 - Contribution à l'étude du Paléolithique de Montfarville. *Mémoires de la Société Nationale des Sciences Naturelles et Mathématiques de Cherbourg*, **IV**, 21-78.
- PELLERIN J., 1977 - Les nappes alluviales de l'Orne, leurs altérations et leurs relations avec les dépôts marins sur la côte du Calvados. *Bulletin de la Société Géologique de Normandie et Amis du Museum du Havre*, **LXIV** (4), 75-80.
- TEXIER P.J., 1981 - Désilicification des silex taillés. *Quaternaria*, **XXIII**, 159-169.
- VERAGUE J., COUTARD J.-P., OZOUF J.-C., & SCUVEE F., 1991 - Les niveaux marins quaternaires de l'Anse du Brick (Maupertus, Manche). *Bulletin de la Société Linnéenne de Normandie*, **114-115**, 81-94.