



Groupe APS

Association pour l'identification et l'étude des pathologies d'origine sismique dans le bâti ancien

ARCHÉOSISMICITÉ

&

Tsunamis en Méditerranée

Approches croisées

Ouvrage collectif coordonné par
Isabelle RÉBÉ-MARICHAL, André LAURENTI
Isabelle BOEHM et Jean-Philippe GOIRAN



Groupe APS

Centre archéologique Rémy Marichal,
Oppidum de Ruscino, Château Roussillon, F-66000 Perpignan
Tél. : 00 33 [0]4 68 67 47 17
Courriel : groupeaps@free.fr

UMR 5133 - Archéorient et UMR 5189 - HiSoMA
Maison de l'Orient et de la Méditerranée - Jean Pouilloux
7 rue Raulin, F-69365 Lyon Cedex 7

Copyright 2012 Groupe APS

ISBN : 978-2-9515025-5-0

Imprimé en France
Dépôt légal : décembre 2012

ARCHÉOSISMICITÉ

&

Tsunamis en Méditerranée

Approches croisées

**Séismes et tsunamis dans l'Antiquité:
données géoarchéologiques et textuelles**

Table ronde de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 25 avril 2007, Lyon

9. Caractérisation d'un dépôt de tsunami dans le port antique d'Alexandrie par l'étude exoscopique des quartz:

apports et limites de la méthode

Jean-Philippe GOIRAN*

Plusieurs carottages ont été réalisés dans le port antique d'Alexandrie (Égypte) afin de mieux comprendre l'évolution des paléoenvironnements portuaires. Les résultats montrent un envasement progressif des bassins depuis l'époque hellénistique jusqu'à l'époque arabe (Goiran *et al.* 2005). Au VIII^e/IX^e siècle ap. J.-C., un dépôt sédimentaire grossier vient recouvrir le dépôt argilo-limoneux antique. L'analyse du contenu biologique et la granulométrie suggèrent que ce dépôt grossier a été mis en place suite à un événement d'hydrodynamique marqué. Afin de compléter cette interprétation, une étude exoscopique des quartz contenus dans ce dépôt a été entreprise. L'objectif était d'observer les traces de chocs de grande amplitude et de les comparer à celles observées sur les quartz issus de dépôts de tsunamis attestés.

1. CADRE DE L'ÉTUDE, PROBLÉMATIQUES ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

Avec le soutien du Centre d'Études Alexandrines et du Supreme Council of Archaeology, une campagne de carottages a été réalisée dans le port oriental d'Alexandrie afin de comprendre l'évolution des environnements antiques (figure 1). Les carottages (figures 2-3) montrent quatre principales séquences stratigraphiques. (1) L'unité basale, dite préliménique, correspond à un environnement pré-portuaire de type baie marine (Goiran 2001; Goiran *et al.* 2008). (2) L'unité B, dite liménique, se compose d'une accumulation limono-argileuse noire: c'est l'envasement du bassin portuaire depuis l'époque hellénistique jusqu'au début de l'époque arabe (Goiran, Morhange 2005; Marriner *et al.* 2010). (3) L'unité sus-jacente (*post-liménique*) se caractérise par des éléments grossiers venant recouvrir les vases et mettant un terme à la période portuaire (Goiran 2001). (4) Enfin, l'unité sommitale, dite postliménique, se compose de sables marins typiques d'une baie ouverte.

Plusieurs hypothèses peuvent être évoquées afin d'expliquer la transition brutale de faciès entre les unités liménique et postliménique. Cette unité de transition, dite anoliménique, regroupe des éléments grossiers hétérogènes (figure 4). L'une d'elle suggère une mise en place brutale liée à un événement hydrodynamique. Les deux principaux facteurs, susceptibles d'engendrer de tels processus morphodynamiques, peuvent être soit des aléas dépendant de conditions météo-marines telles que de violentes tempêtes, soit des aléas d'origine sismique engendrant quant à eux des tsunamis ou « seismic sea wave » en anglais.

Les tsunamis peuvent être déclenchés par des séismes ou des glissements de terrains sous-marins. Ces mouvements de masse, en domaine sous-marin, se propagent à la surface des mers et océans sous la forme d'une onde oscillatoire.

* CNRS – UMR 5133, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, 7 rue Raulin, 69007 Lyon, FRANCE.

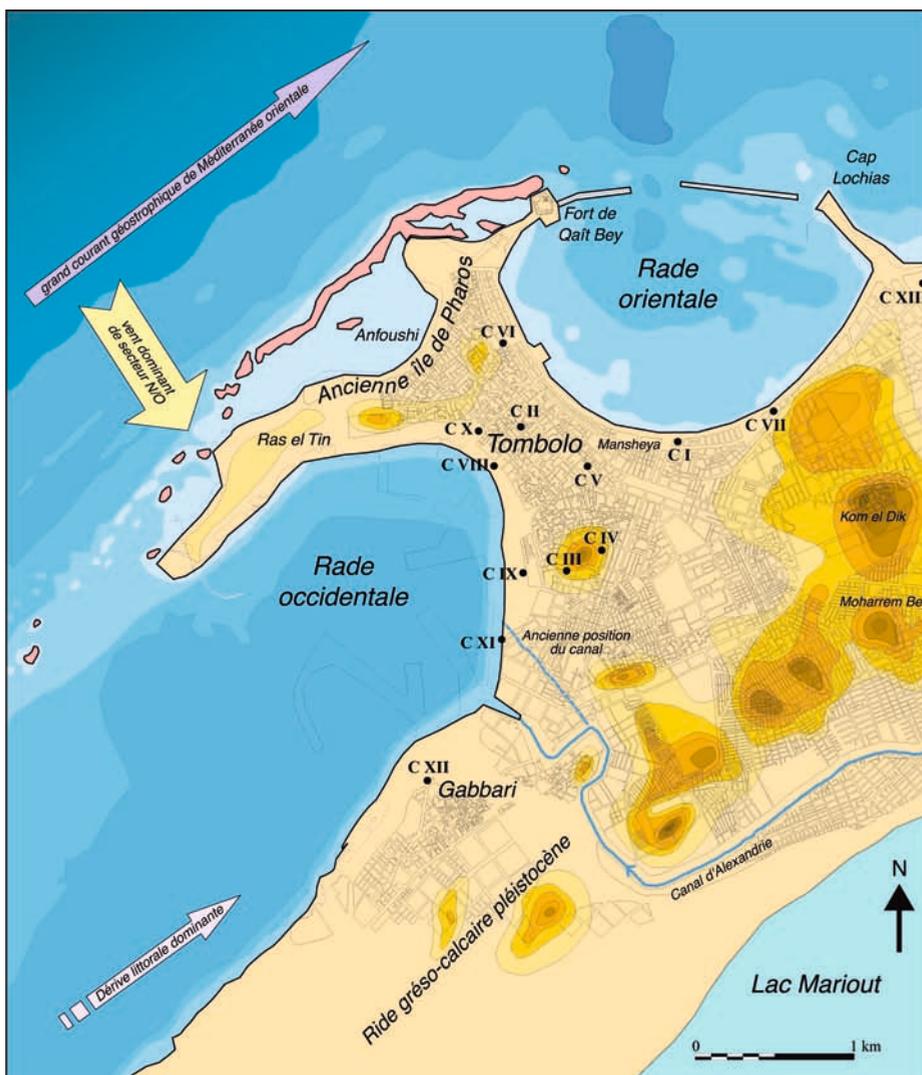


Figure 1 - Carte de la configuration actuelle des éléments du paysage à Alexandrie (Dessin : J.-Ph. Goiran, 2001, sur fond de plan cadastral 1935-1948).

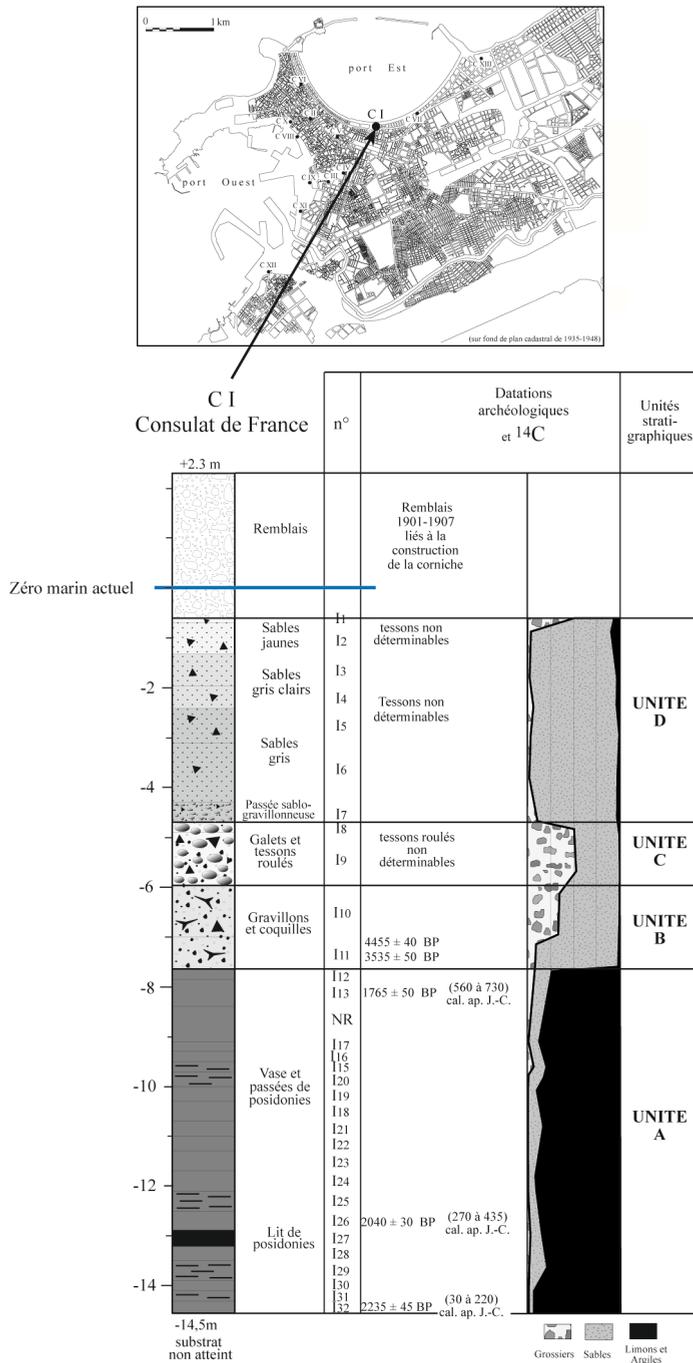


Figure 2 - Carotte CI et localisation.

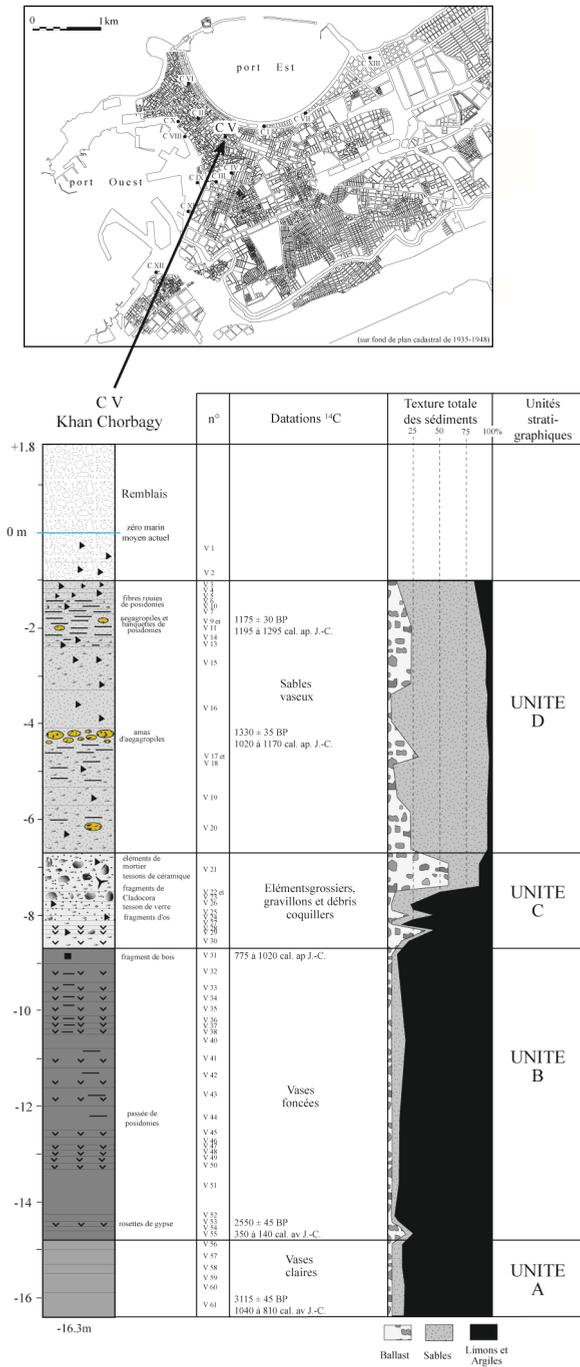


Figure 3 - Localisation du carottage CV: Khan Chorbagy.

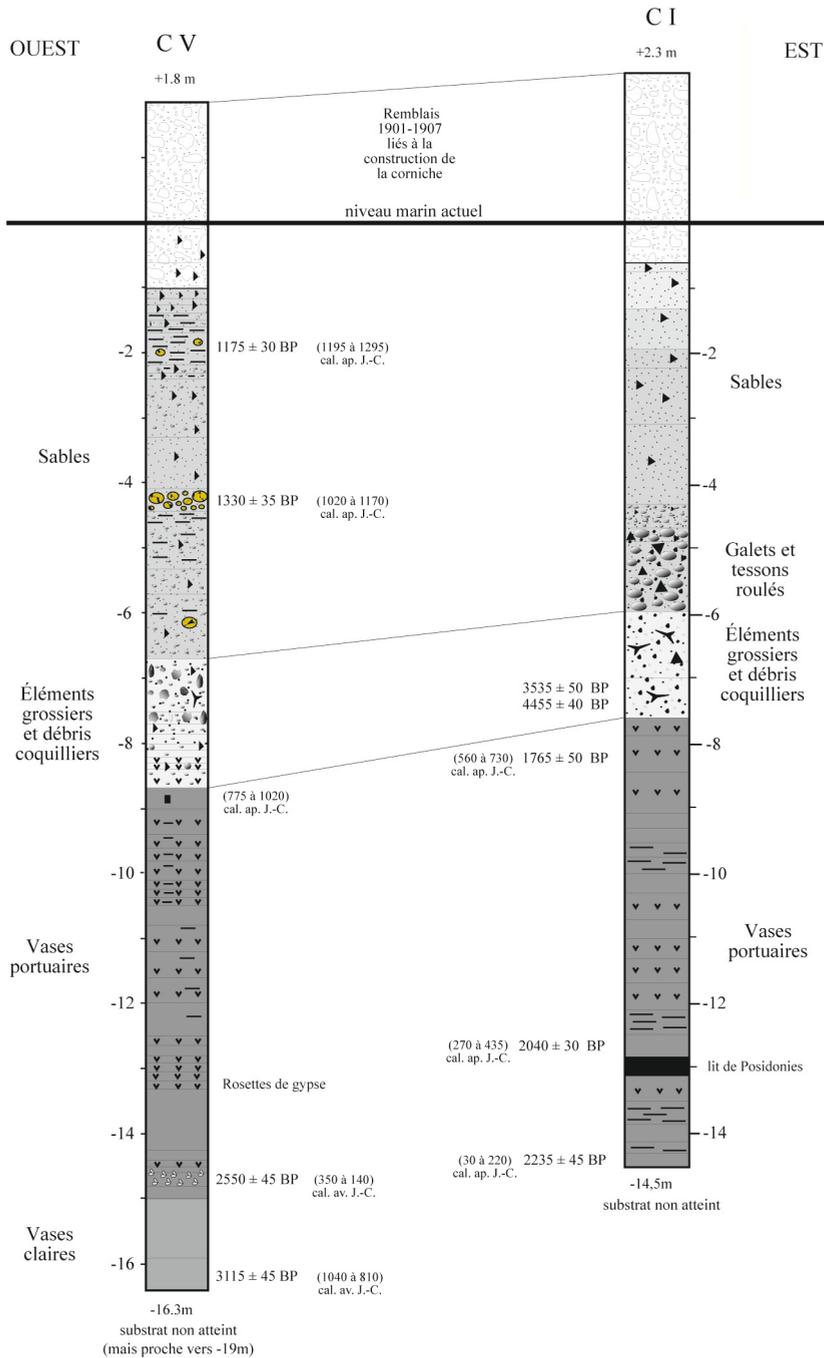


Figure 4 - Comparaison des carottes CV et CI.

Dans le cas d'un ou plusieurs événements hydrodynamiques majeurs venant frapper le littoral d'Alexandrie, il est possible d'orienter les voies de recherche, dans un premier temps, vers «l'hypothèse tsunami». En effet, si l'on prend en compte l'ensemble des recherches historiques au cours des 2000 dernières années, huit tsunamis et/ou tempêtes violentes sont venus frapper la ville d'Alexandrie (figure 5). Même s'il faut prendre la nature et le contenu des textes avec prudence, les tsunamis ne sont pas rares à Alexandrie. La région offre d'ailleurs un contexte favorable tant par ses aspects tectono-structuraux (subduction de la plaque africaine sous la plaque égéo-anatolienne), que par l'instabilité sédimentaire du prodelta du Nil.

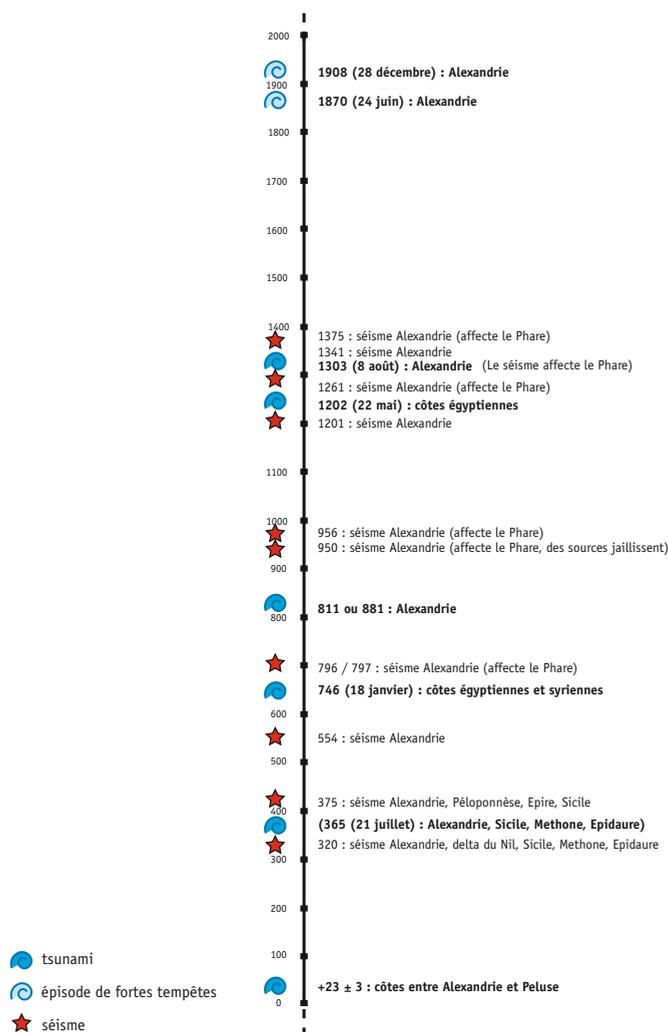


Figure 5 - Tsunami et séismes à Alexandrie depuis 2000 ans
(Sources : Guidoboni *et al.* 1994 ; Ambraseys 1962 ; Kebeasy 1990, Taher 1998).

2. MÉTHODOLOGIE

Un épisode de tempête ou de tsunami peut être considéré comme un processus hydro-morphosédimentaire brutal puisqu'il associe un mouvement de hautes vagues à forte énergie cinétique, à une remobilisation de stocks sédimentaires du large et des petits fonds.

Les sédiments mis en jeu lors de ces mouvements de brassage et de déferlement peuvent enregistrer à leur surface des traces ou microtraces d'usure mécanique, de fracturation, de chocs, d'impacts, de broyage, voire de « mitraillage ».

Si l'échelle microscopique a été privilégiée dans cette étude, restait à définir et choisir sur quel type de marqueur allaient porter ces analyses. Les grains de quartz ont été retenus pour deux raisons essentielles :

- raison minéralogique : il était nécessaire de sélectionner un marqueur suffisamment résistant pour ne pas être détruit ou trop fragmenté lors des épisodes hydrodynamiques importants ;
- raison historique : L'exoscopie des quartz dans les problématiques paléoenvironnementales a donné lieu à des publications fondamentales au cours des 30 dernières années (Le Ribault 1977, 1980, 1984 ; Font *et al.* 2010). Ces travaux nous permettent de mieux comprendre le comportement spécifique de ce marqueur, rencontré dans divers milieux de sédimentation. D'autre part, des travaux plus récents sont venus compléter en domaine côtier méditerranéen la base de données établie par Le Ribault : quartz de la période gréco-romaine (Morhange *et al.* 2000), quartz affectés par les tempêtes (Bruzzi, Prone 2000), quartz mis en place sous conditions fluvio-marines (Georges 2004).

Par conséquent, au sein du contingent minéralogique, les quartz sont apparus comme susceptibles d'être les meilleurs marqueurs.

Déterminer si tel faciès exprime une mise en place par un tsunami ou une tempête, amène à le comparer à d'autres dépôts prélevés sur le même site. Il était nécessaire d'essayer de trancher entre les impacts exoscopiques des quartz issus de tempêtes qui viennent affecter le littoral d'Alexandrie de façon régulière et les grandes marques exoscopiques de quartz, pouvant avoir été générées par des tsunamis ou des tempêtes extrêmes. Ce premier travail a été effectué sur des échantillons de la carotte C I intégrant quatre unités sédimentaires différentes. L'objectif, était de rechercher les traces de chocs les plus violentes et les plus fraîches sur chaque lot de quartz. Ce travail complète la méthode expérimentale mise au point par Le Ribault (1977), Prone (1980) puis Bruzzi, (1998).

En fonction de l'origine cristalline du quartz, son altération ne sera pas la même. Celle-ci s'attaque en premier lieu aux sommets puis aux arêtes en les émoussant légèrement. Les faces sont théoriquement attaquées en dernier. Ainsi un cristal automorphe parfait évoluera vers une bille de quartz ou, plus communément, un rond mat. En revanche un cristal xénomorphe (asymétrique) évoluera, à terme, vers une goutte de quartz (Clocchiatti 1975).

3. PROTOCOLE DE TRAVAIL SUIVI EN MORPHOSCOPIE ET EN EXOSCOPIE

Après avoir recueilli la fraction sableuse totale [2 mm ; 50 µm] par tamisage humide, la matière organique est détruite à froid par ajout d'eau oxygénée à 20 %. Les échantillons sont alors traités, toujours à froid, à l'acide chlorhydrique. Puis un second tamisage est

réalisé afin de séparer les sables grossiers, moyens et fins. Pour ce travail, seules les fractions grossières et moyennes sont étudiées au MEB, en raison de l'extraction délicate des quartz fins, le plus souvent à l'état de débris.

Le prélèvement s'effectue sur un plateau de tri à la loupe binoculaire avec des grossissements variant de $\times 20$ à $\times 60$. Une analyse morphoscopique est réalisée afin de mettre en évidence les différentes formes de quartz qui composent le cortège. En se référant aux travaux de Culver (Culver *et al.* 1983), sur la représentation statistique d'un échantillonnage, 30 grains de quartz ont été à chaque fois prélevés parmi les sables grossiers et moyens. Les 30 quartz choisis sont ensuite montés sur des plots métallisés à l'or et placés dans la chambre à vide du MEB. C'est le microscope électronique à balayage de la Faculté de Saint Charles à Marseille que nous avons utilisé pour ces opérations. L'exoscopie des quartz est une analyse morphologique à forts grossissements (jusqu'à $4000\times$) de l'état de surface de chaque grain.

4. ANALYSES MORPHOSCOPIQUES ET EXOSCOPIQUES DES QUARTZ D'ALEXANDRIE

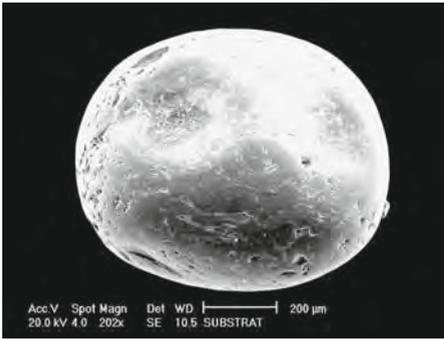
L'analyse tant morphoscopique qu'exoscopique n'avait pas pour but principal de reconstituer l'ambiance paléoenvironnementale dans ce secteur côtier telle qu'elle a été menée par exemple à Larnaca, dans le port de Kition-Bamboula (Morhange *et al.* 2000). Au contraire, l'objectif était de se focaliser sur la recherche de traces très fraîches de chocs de grande ampleur ou de figures d'impacts peu communes pouvant être reliées à une dynamique morpho-sédimentaire exceptionnelle.

Afin de pouvoir différencier les traces de chocs exceptionnels des traces de chocs classiques, nous avons donc analysé successivement les cortèges de quartz issus des différentes unités de la carottes C I. Puis nous avons procédé à une démarche comparative en observant les quartz prélevés sur le littoral de la baie orientale, ainsi que les quartz issus du substrat gréseux pléistocène, afin de caractériser le stock hérité.

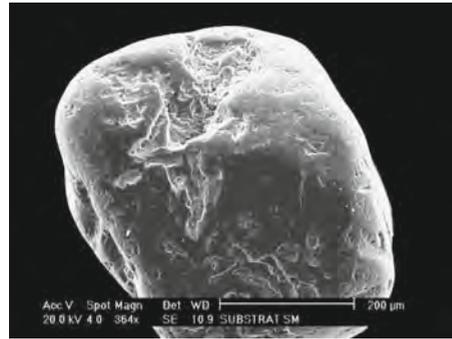
4.1 Les quartz du substrat gréseux pléistocène

Ces quartz proviennent d'une carotte de substrat, obtenue grâce à un carottier mécanique utilisé par les BTP d'Alexandrie, lors des carottages réalisés au cours du chantier de construction de la nouvelle bibliothèque d'Alexandrie.

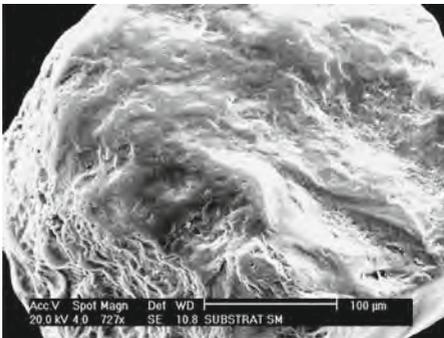
Sur le plan exoscopique, les quartz offrent une allure de surface usée. Les traces sont peu fraîches en raison de la fossilisation des grains et de la diagenèse de cette calcarénite pléistocène. Aucune trace de chocs frais n'a été remarquée. Les quartz se regroupent en deux stocks principaux de proportion semblable. Le premier comporte des cupules de chocs (figure 6a, f) ou des traces de rainurage parallèles (figure 6d). Le second rassemble les grains parsemés de traces de dissolution isolée ou organisée, en un réseau plus ou moins orienté et digité (figure 6b-c). Pour certains, on observe même un stade avancé dans l'engrainement du réseau de dissolution par rapport à la surface du grain (figure 6b, e).



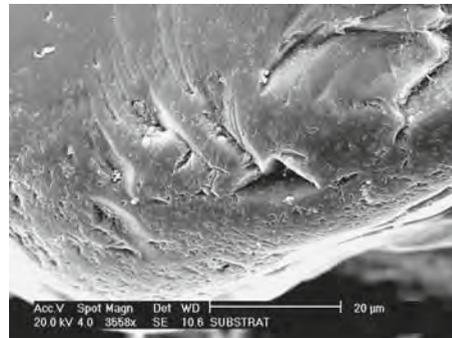
a) Alexandrie Substrat: Rond mat avec réseau de dissolution et cupules de chocs



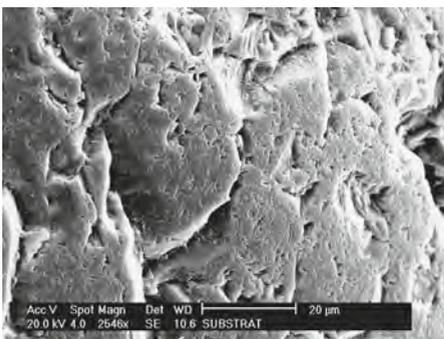
b) Alexandrie Substrat: Émoussé mat avec réseau de dissolution très avancé



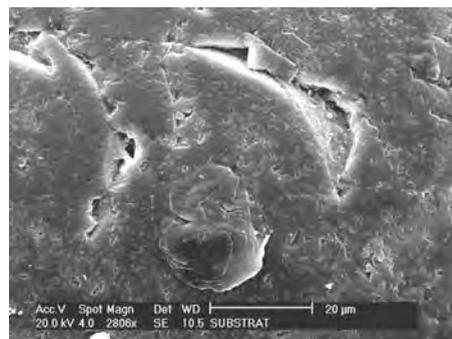
c) Alexandrie Substrat: Réseau de dissolution prononcé sur un émoussé terne



d) Alexandrie Substrat: Traces de rainurages et de dissolution



e) Alexandrie Substrat: Réseau de dissolution



f) Alexandrie Substrat: Cupules de chocs

Figure 6 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, Substrat, Sables Grossiers et Moyens.

4.2 Les quartz de l'unité A des vases portuaires antiques

Nous n'avons pas analysé au MEB tous les échantillons, trop nombreux, de l'unité A. Seuls les quartz du prélèvement I-17 et I-26 ont été analysés.

L'analyse morphoscopique permet d'observer que les quartz de la fraction grossière sont absents du prélèvement I-26, le plus profond. Sa fraction moyenne totalise $\frac{3}{4}$ de non usés évolués. Le I-17, situé dans la section sommitale de l'unité A, comporte seulement deux classes, probablement en raison de la faible proportion des éléments grossiers (12%). Les émoussés mats représentent les $\frac{3}{4}$ du stock et les non usés le quart restant.

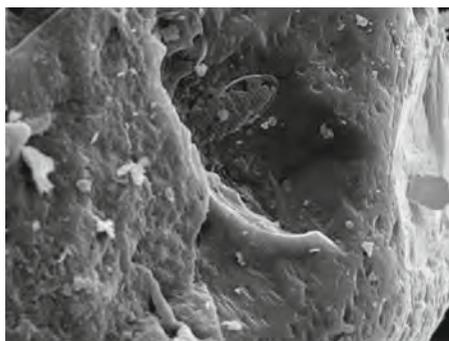
L'analyse exoscopique du plot I 26 montre des traces de dissolution très présentes sur les quartz (figure 7). Certaines se développent sur les arêtes, d'autres sur les faces. Quelques inclusions sont repérées qui tendent à fragiliser le quartz lors de chocs éventuels (figure 7 a). Quelques traces d'impacts sont présentes (figure 7 b), d'autres commencent à s'émousser (figure 7 c).



a) Alexandrie I 17 SM: Alvéole d'inclusion remplie de dépôts, fragments de diatomées et de baguettes de gypse



b) Alexandrie I 17 SG: diatomées et dépôts sur un non usé



c) Alexandrie I 17 SM: diatomées dans une ancienne cupule de choc et traces de dissolution périphériques

Figure 7 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, I 26 et I 17, Sables Moyens et Grossiers.

L'analyse exoscopique des quartz montés sur le plot I 17 montre que les grains présentent un faciès de surface affecté par de la dissolution beaucoup moins prononcée que celle observée sur les grains du substrat. Ces traces peuvent être liées à une évolution dans un environnement confiné et protégé de type portuaire. De nombreux tests de nano flore de diatomées restent piégés ou simplement posés à la surface des grains de quartz (figure 7 b-c). La présence de ces frustules siliceuses particulièrement fragiles face aux influences hydrodynamiques côtières renforce l'idée d'un environnement calme. Les principales traces de secteurs cassés sont recouvertes de dépôts plus ou moins massifs et de baguettes de gypse (figure 7 a). Ces traces peu fraîches sont plus à rattacher à une faiblesse dans la structure du cristal qu'à un choc.

4.2 Les quartz de l'unité B

Les deux prélèvements (I-11 et I-10) constitutifs de l'unité B ont été analysés. L'unité B rassemble les 5 classes morphoscopiques définies, avec l'arrivée caractéristique d'un stock de Rond Mat qui représentent 5% à 15% du cortège total des quartz. Les non usés et non usés évolués sont les deux classes morphoscopiques les plus importantes.

L'examen exoscopique a permis d'effectuer une série de clichés sur lesquels différents types d'impacts mécaniques très frais apparaissent. Chacune de ces marques se distingue des autres tant par son amplitude, que par sa position ou sa géométrie. Il a cependant été possible de les regrouper et d'établir ainsi une typologie basée sur les traces les plus importantes:

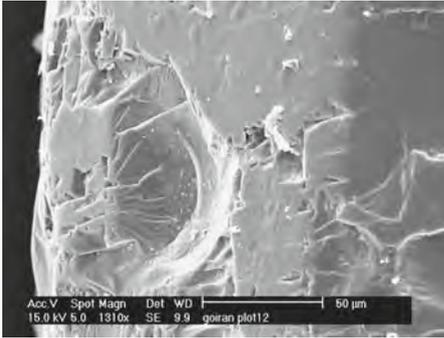
- cupules de chocs de large amplitude (figure 8 a);
- traces de broyage (figure 8 b);
- zones de desquamation (figure 8 e-f);
- plaques de décollement et d'écaillage (figure 8 a);
- lignes de fracturation (figure 8 c-d).

Une seconde série de traces moins importantes par l'ampleur des marques est également observée. Elle se développe principalement sur les quartz contenus dans la fraction des sables moyens:

- des coups de gouges (figure 8 c, f);
- des impacts en équerre (figure 8 d).

L'ampleur de ces marques de choc frais, peut être reliée à une dynamique hydrosédimentaire marine peu commune et de très forte énergie.

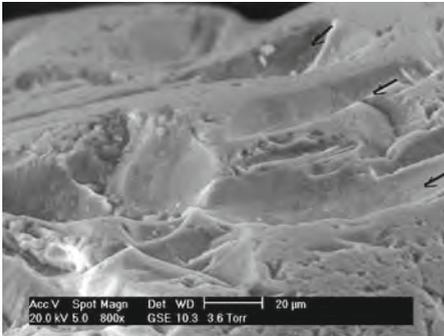
Le second échantillon de l'unité B (I 10) offre également des traces de choc peu communes. Les principaux types sont: des fracturations multiples associées à des zones de compression (figure 9 a-b) et de dislocation (figure 9 c). Les Ronds Mats semblent développer des types de marques particulières: des linéaments curvilignes (figure 9 e) et des desquamations en écaille (figure 9 f).



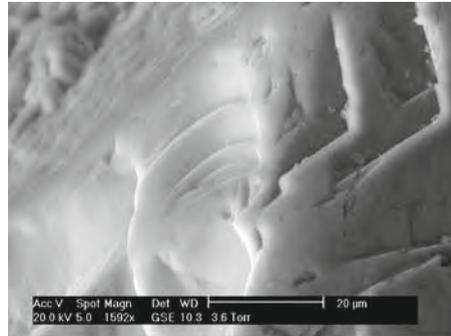
a) Alexandrie I 11 SG:
Trace de choc de grande amplitude



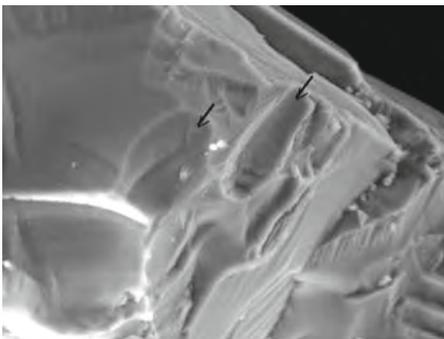
b) Alexandrie I 11 SG:
Grande ligne de fracturation sur une face du quartz



c) Alexandrie I 11 SM:
Longs coups de gouge parallèles sur une face de quartz

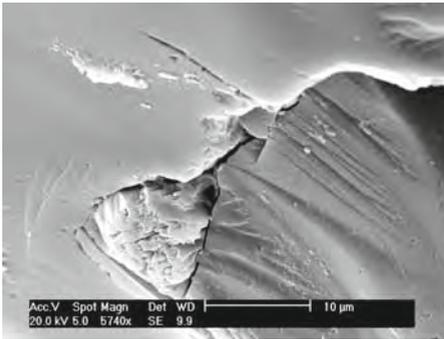


d) Alexandrie I 11 SM: Surface affectée par deux types d'impacts: curvilignes au centre et en équerre à droite

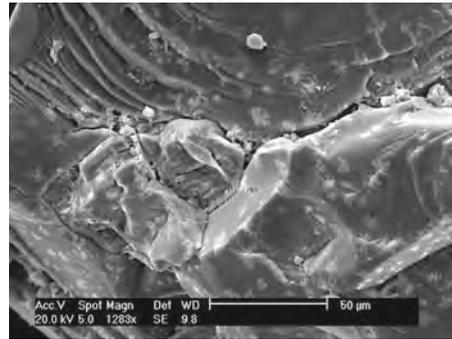


f) Alexandrie I 11 SM: Zone d'impact et coup de gouges

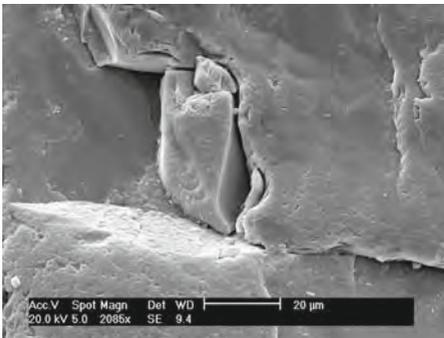
Figure 8 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, I 11, Sables Moyens et Grossiers.



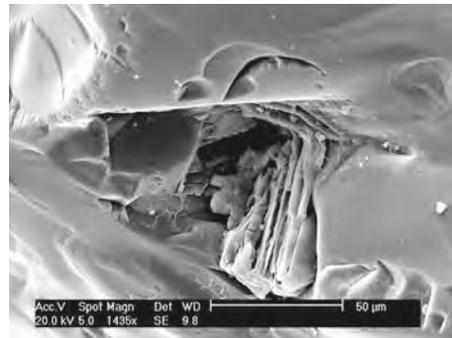
a) I - 10 SG: Sections fracturées, compression et zone de broyage



b) I - 10 SM: Compression et fracturation à orientation triple



c) I - 10 SG: Dislocation et fracturations curvilignes



d) I - 10 SM: Multiples traces de chocs sur le pourtour d'une cavité, probablement une inclusion qui a sauté



e) I - 10 SG: Linéaments curvilignes de grande ampleur sur un rond mat



f) I - 10 SM: Écailles rond mat. L'une est toujours en place

Figure 9 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, I 10, Sables Grossiers et Moyens.

4.4 Les quartz de l'unité C de la plage de galets

Les prélèvements I-9 et I-8 de l'unité C ont été analysés. Les 5 classes morphoscopiques sont présentes avec une prépondérance de la classe des émoussés luisants (25 %, [figure 10 a](#)) pour le I 9 et principalement des non usés évolués (55 %) pour le I 8.

En exoscopie, les principales traces de chocs attestées sont sans commune mesure avec celles observées sur les quartz de l'unité B précédente. La marque la plus notable correspond à certaines zones de desquamation ([figure 10 c](#)). Des traces de chocs en cupule ou curvilignes existent mais sont anciennes en raison de certains dépôts qui les recouvrent ([figure 10 d-f](#)). Si quelques inclusions ont sauté, leurs bords sont généralement émoussés et les cavités remplies de dépôt ([figure 10 b](#)). L'unité C est donc caractérisée par de nombreuses traces d'érosion mécanique ancienne héritée de l'épisode B.

4.5 Les quartz de l'unité D sableuse

L'unité sommitale D très sableuse n'a pas été entièrement analysée de manière systématique. Seul l'échantillon I-6 à été sélectionné car il n'est pas directement en contact avec l'unité C sous-jacente et à servi d'échantillon témoin, représentatif de l'unité.

Seules trois des cinq classes morphoscopiques sont observées. Les Ronds Mats et les Non Usés sont absents dans les deux fractions réunies des sables grossiers et moyens. Les Emoussés Luisants prédominent chez les grossiers ([figure 11 a](#)) et les Non Usés Evolués chez les moyens.

L'observation exoscopique montre que si la plupart des quartz possèdent de plus ou moins vastes réseaux de dissolution à leur surface ([figure 11 b-c](#)), les traces de chocs se retrouvent sur les sommets des grains ([figure 11 e-f](#)). Ces traces de chocs sont relativement fraîches mis à part quelques crêtes émoussées mais aucun dépôt ne les recouvre. Il semble qu'une ancienne série de chocs en forme de cupules ait existé mais de faible amplitude et en partie effacée par usure ou par dissolution ([figure 11 d](#)). On note ici la prédominance des processus chimiques par rapport à l'abrasion mécanique.

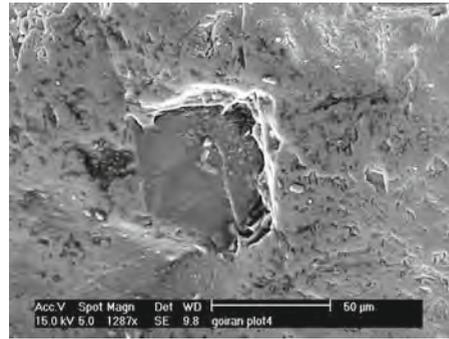
4.6 Les quartz des milieux de sédimentation actuels

Afin d'établir une comparaison avec les quartz actuellement présents et mobiles dans la baie orientale, nous avons choisi d'effectuer un échantillonnage de sables sur un estran du rivage ouest de la rade orientale. Il s'agit de l'échantillon A1.

Les traces de chocs sont plus fréquentes dans ce niveau mais pas pour autant plus fraîches. Si certaines lignes de fractures existent, elles semblent pour la plupart héritées car remplies ou recouvertes de dépôts ([figure 12 b-d](#)). Certains réseaux de dissolution prononcée ont été repérés ([figure 12 f](#)). Enfin, la trace de choc la plus spectaculaire reste celle du cliché de la [figure 13 b](#). Cet impact reste difficile à définir et à comprendre. Il peut être qualifié d'artefact car aucun autre impact de ce type n'a été repéré dans le cortège. Une partie de ces formes de dissolution et d'impact peut en partie trouver une explication dans le rôle joué par le rejet dans le port oriental actuel, de produit nocifs et de matériaux d'origine diverse.



a) I - 9 SG:
Quartz émoussé luisant



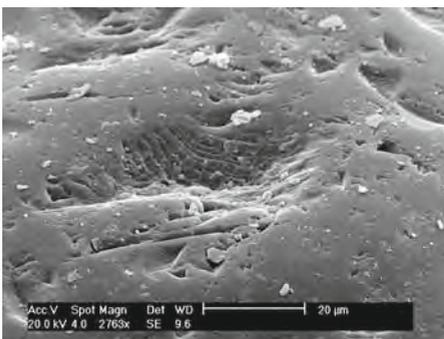
b) I - 9 SM:
Cavité géométrique liée à une inclusion



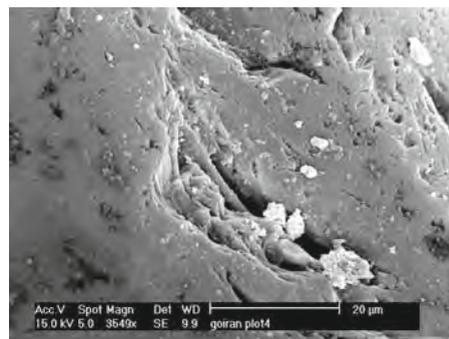
c) I - 9 SG:
Traces de desquamation superficielles anciennes



d) I - 9 SM:
Anciennes traces de chocs



e) I - 9 SG: Trace de chocs anciens,
figure émoussée et dépôts

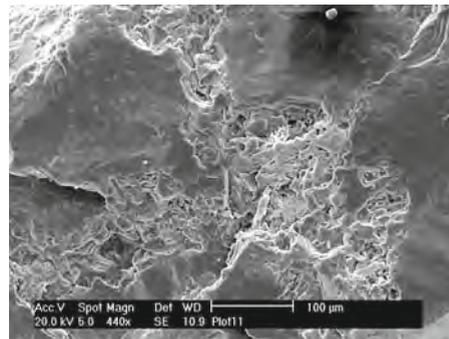


f) I - 9 SG:
Trace de chocs anciens, figure émoussée et dépôts

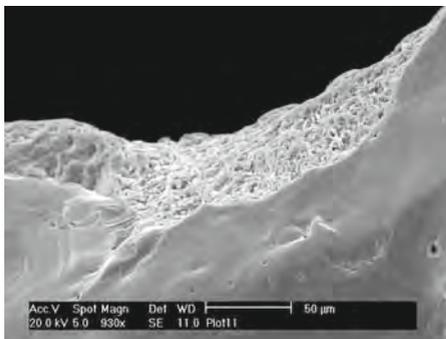
Figure 10 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, I 9, Sables Grossiers et Sables Moyens.



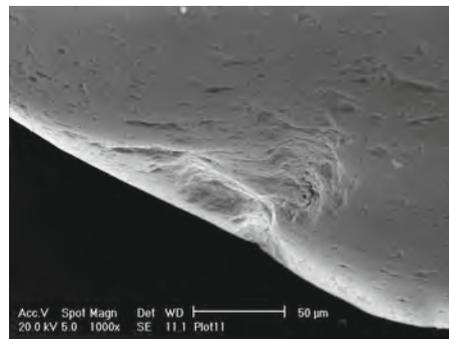
a) I - 6 SG:
Quartz de type émoussé luisant



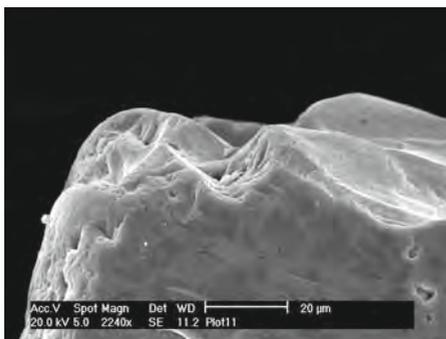
b) I - 6 SG:
Réseau de dissolution



c) I - 6 SG: Zone sur laquelle se développe un réseau de dissolution



d) I - 6 SG: Ancienne cupule de choc en passe de s'effacer sur un émoussé luisant

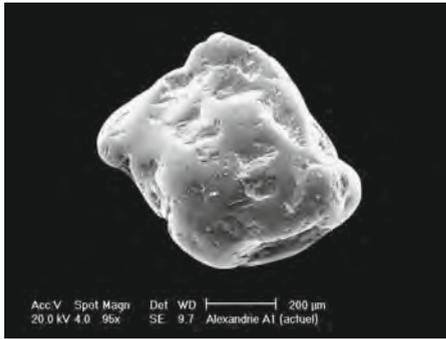


e) I - 6 SG: Les traces de chocs se trouvent presque uniquement situées sur les sommets des grains

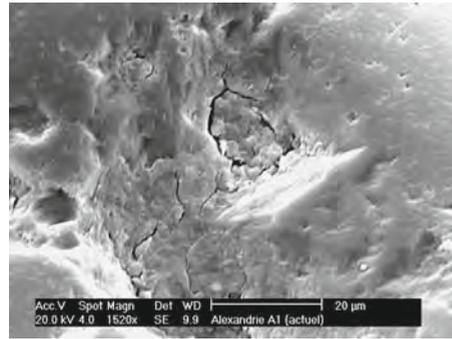


f) I - 6 SG: Les traces de chocs se trouvent presque uniquement situées sur les sommets des grains

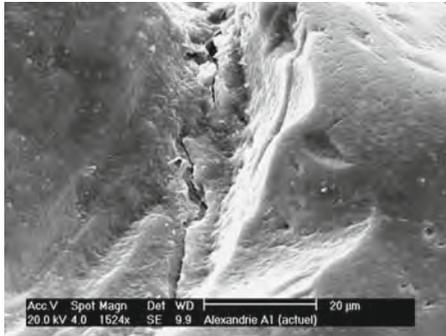
Figure 11 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, I 6, Sables Grossiers.



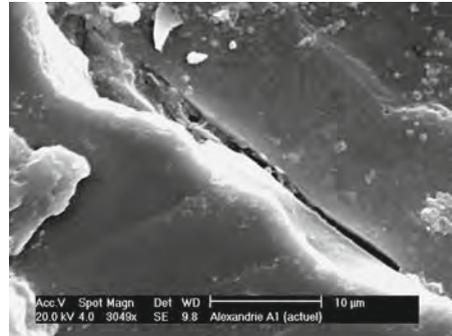
a) Alexandrie actuel :
Émoussé luisant



b) Alexandrie actuel :
Zone de craquelures



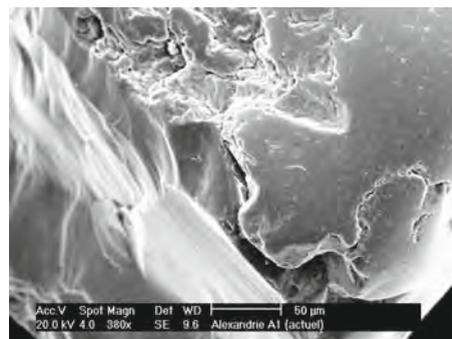
c) Alexandrie actuel :
Fracture rectiligne



d) Alexandrie actuel :
Ligne de fracture de dimension réduite



e) Alexandrie actuel :
Trace de choc d'origine indéterminée



f) Alexandrie actuel :
Réseau de dissolution en bordure d'un quartz cassé

Figure 12 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandria, Actuel, Sables Grossiers et Moyens.

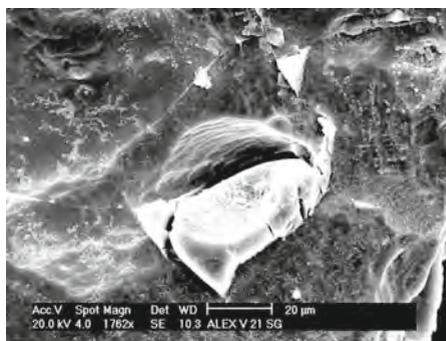
4.7 Exoscopie des quartz de l'unité grossière de la carotte C V

Les quartz de l'échantillon V 21, qui appartiennent au sommet de l'unité grossière C de la carotte V, ont été analysés en exoscopie afin d'être comparés à ceux observés dans l'unité B de la carotte C I. L'unité B de C I semble être le pendant du sommet de l'unité C de C V.

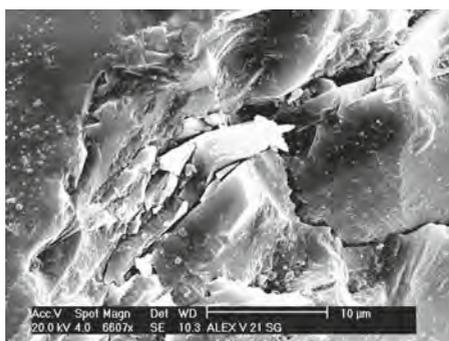
- Les quartz grossiers présentent des traces de fracturation fraîches et très nombreuses. Par endroit, la surface du quartz est parsemée de micro-éclats. Si un grand nombre de ces écailles est parti, il semble que celles qui sont restées, l'aient été en raison de leur petite taille (entre 10 μm et 60 μm). Sur les clichés a et b de la [figure 13](#), on en observe quelques spécimens. Il est difficile de discerner s'ils appartiennent à la structure cristalline disloquée en surface ou s'il s'agit de dépôts anciens récemment fracturés en plaques. Les fracturations existent sous forme rectiligne ou légèrement courbe ([figure 13 a, c](#)). Les fracturations à orientation triple génèrent le plus grand nombre d'écailles ([figure 13 c](#)). Enfin, un dernier type d'impact se caractérise par des zones de broyage ([figure 13 b](#)).



a) V - 21 SG:
Zone disloquée à écaillage



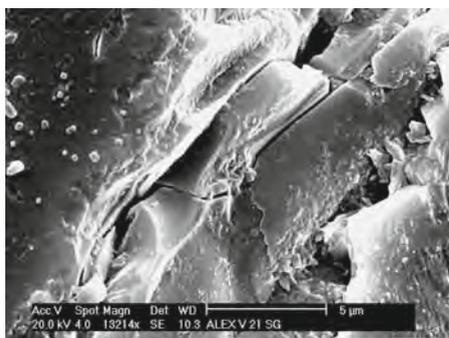
b) V - 21 SG:
Zone de broyage (fragilisée par une inclusion?)



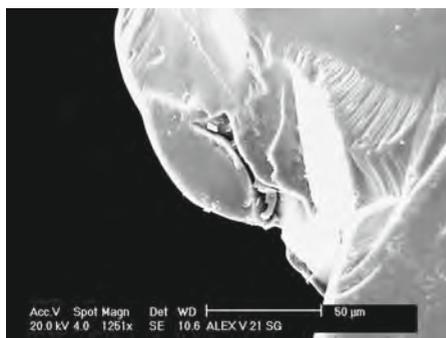
c) V - 21 SG:
Zone de fracturations multiples et écailles

Figure 13 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, V 21, Sables Grossiers.

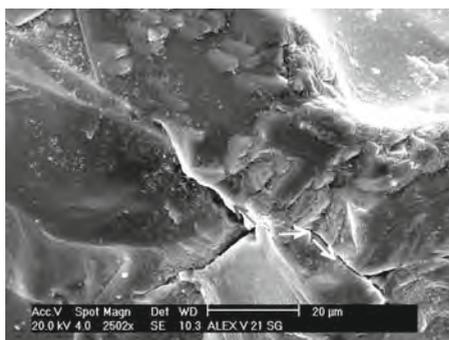
- Le lot de quartz moyens se singularise par l'abondance de fracturations à orientation souvent triple (figure 14 a, c). Ces fracturations génèrent de la dislocation en blocs de taille diverse, entre 10 µm et 40 µm (figure 14 a, d). Des lignes de fractures rectilignes et assez longues (50 µm à 60 µm) sont repérées (figure 14 b-c). Quelques coups de gouge de dimension modeste sont repérés au cœur d'une vaste section fraîchement fracturée (figure 14 d).



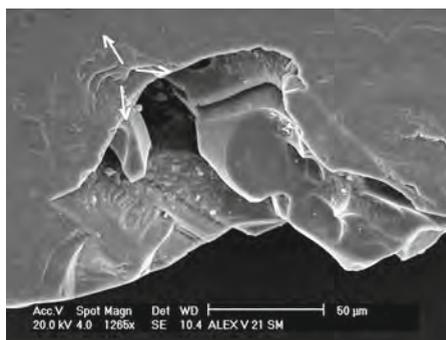
a) V - 21 SG: Linéaments parallèles avec zone de fracturations multiples et dislocation



b) V - 21 SG: Traces de chocs et ligne de fracture



c) V - 21 SG: Fracturations à orientation triple



d) V - 21 SM: Section de choc fraîche de grande amplitude et dislocation (cf. flèche)

Figure 14 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Alexandrie, V 21, Sables Grossiers et Moyens.

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS ET ESSAI DE TYPOLOGIE POUR CI

À partir des relevés et des clichés réalisés sur les traces de chocs les plus importantes des quartz de la carotte C I et par comparaison avec les quartz contenus dans le substrat et issus de l'actuel, l'unité B apparaît comme la plus affectée par des traces fraîches de chocs, multiples et de grande ampleur. Ces traces se retrouvent autant sur les sommets du grain

que sur ses arêtes ou ses faces. À l'inverse, les quartz des unités A, C, D, de l'actuel et du substrat, enregistrent préférentiellement ces marques sur les sommets ou sur les arêtes. La diversité des formes de chocs observés sur les grains de l'unité B peut être classée :

- 1) des cupules de chocs de grande amplitude. L'ampleur de la forme permet de distinguer ces quartz des cupules de chocs habituellement observées dans un contexte modal.
- 2) des zones de broyage et de dislocation. Le broyage intervient lorsque la violence du choc est forte ou si la zone d'impact n'a pas permis au quartz de se « libérer ».
- 3) des fracturations: L'orientation peut être, soit simple avec de longs linéaments, soit multiple et divergente, soit organisée en réseaux parallèles et sécants. Certaines fracturations pouvant se terminer de façon légèrement arquée.
- 4) des plaques de desquamation ou d'écaillage: la plupart des quartz ne possède plus que l'empreinte. Pour d'autre, la plaque est en partie décollée. Certaines plaques se maintiennent du fait de leur petite taille. Dans ce cas, nous avons qualifié d'écaille ce type de plaque.
- 5) dislocation en blocs ou fragmentation dans certains secteurs.
- 6) des coups de gouges sous la forme de longues traces, curvilignes et en creux.

Si l'on établit un rapprochement entre morphoscopie et exoscopie, l'unité B montre clairement que toutes les classes morphoscopiques sont affectées par des marques de chocs. Il apparaît également que même les ronds mats sont touchés alors que cette classe est la seule à demeurer intacte dans l'unité C. Les ronds mats de l'unité B, ne sont cependant affectés que par un seul type de marque: les cupules de chocs de grande amplitude. Il semble que la rotondité des quartz limite l'impact ou confère au grain une résistance relative grâce à cette forme particulière qu'il a acquise.

Le fait que les traces de choc soient fraîches à la surface des quartz (notamment les plaques ou écailles de desquamation) peut servir d'argument attestant la rapidité de la fossilisation du dépôt.

Les unités A, C, D, les milieux de sédimentation actuels et fossiles du substrat ne possèdent pas de traces de choc, significatives d'un épisode hydrodynamique majeur. Et cela, contrairement aux quartz appartenant à l'unité B où une série de marques de chocs frais a été décelée. À terme, il serait nécessaire d'étudier les quartz provenant du large à partir des prélèvements sous-marins effectués à différentes profondeurs. Cette démarche devrait être quantifiée et basée sur des analyses statistiques intégrant les critères de la typologie.

6. COMPARAISON AVEC DES QUARTZ PROVENANT DE DÉPÔTS DE TSUNAMI ATTESTÉS

Afin de valider ou d'infirmer l'hypothèse avancée selon laquelle le dépôt grossier B a été mis en place par un tsunami, il nous fallait plusieurs échantillons de référence issus de dépôts attestés de tsunami. Pour rendre l'étude exoscopique des quartz la plus significative possible, plusieurs dépôts de tsunamis ont été récoltés à travers le monde, afin de reconnaître s'il existait une ubiquité et une spécificité des marques de chocs provoquées sur les grains de quartz par un tsunami. Les facteurs locaux engendrent bien sûr des différenciations interrégionales, en fonction de l'origine pétrographique des stocks de quartz ou de l'intensité du tsunami (figure 15).

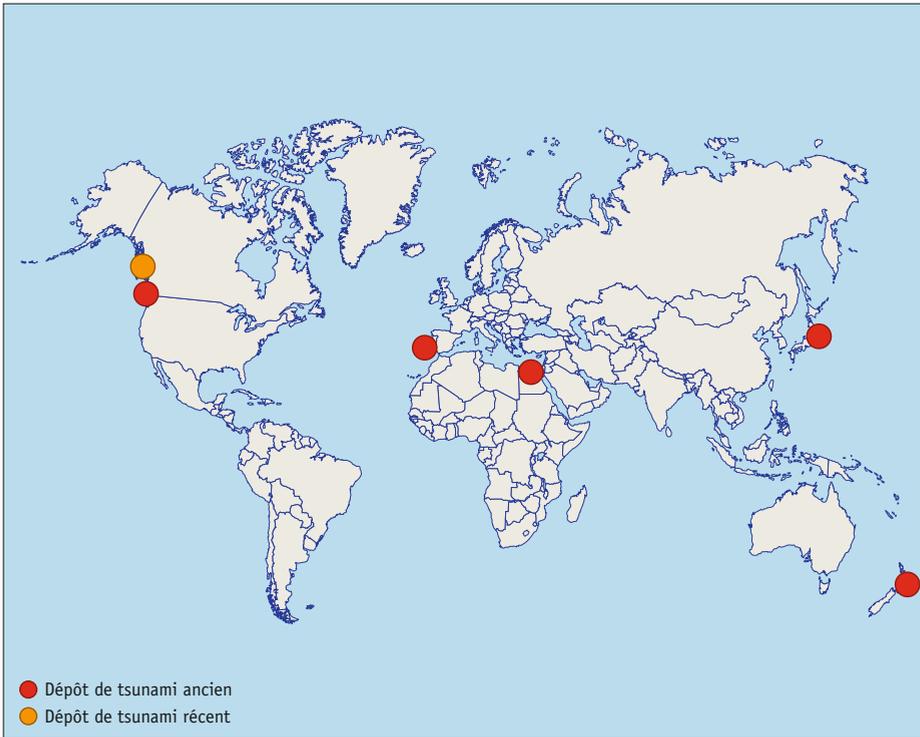


Figure 15 - Localisation des échantillons des dépôts de tsunami étudiés au MEB.

Plusieurs collaborations universitaires ont été établies (Canada, Japon, Royaume-Unis, Portugal) mais nous n'avons pas encore obtenu de prélèvements dans l'actuel sur chaque site. Ces échantillons sont importants afin d'obtenir un référentiel des quartz modaux.

6.1 Dépôts de tsunami au Canada : en 1700 et en 1964

Cadre de l'étude

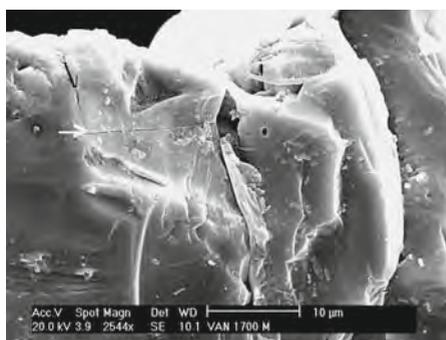
À l'échelle séculaire, de violents tsunamis viennent frapper la côte de la Colombie Britannique en raison de séismes profonds engendrés le long de la zone de subduction Cascaadienne. Les échantillons de ces dépôts de tsunamis attestés ont été prélevés par le Dr. Ian Hutchinson (Department of Geography and Institute for Quaternary Research, Simon Fraser University). L'un de ces dépôts de tsunami est daté de 1700 AD, l'autre de 1964 AD. Il s'agit de tsunamis ayant affecté tous deux le secteur de Louie Bay sur la côte ouest de Vancouver Island. Cette île de 400 km de long a été sévèrement touchée en 1700 ap. J.-C. par un tsunami d'une hauteur de 5 à 15 m. Mais le tsunami le plus dévastateur reste celui de 1964 avec 3 vagues successives d'une hauteur minimale de 4,3 m (hauteur maximale pouvant être mesurée par le marégraphe de Port Albertini).

Exoscopie des quartz du dépôt de 1700

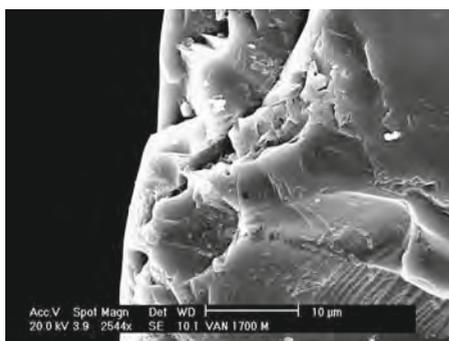
Si de nombreuses traces de chocs sont attestées, leurs dimensions sont légèrement inférieures à celles observées sur les quartz de l'unité C I B d'Alexandrie. De nombreuses diatomées, brisées ou presque intactes, sont repérées sur la moitié du lot de quartz. Plusieurs types d'impacts sont à énumérer : des réseaux de fractures (figure 16 b-c), d'amples cupules de choc (figure 16 d) notamment inscrites sur les ronds mats, ainsi que des zones de broyage et d'écaillage (figure 16 a-b). Enfin un nouveau type de forme apparaît (figure 16 c-d) : il s'agit de surfaces ciselées et cannelées dont la finesse indique l'état de fraîcheur.



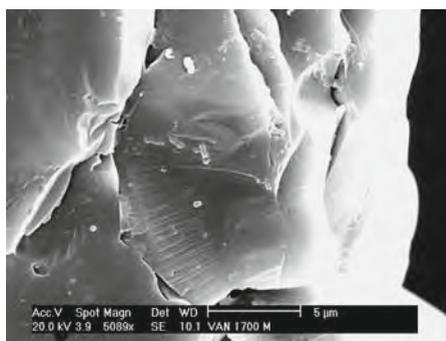
a) Vancouver 1700 SM :
Traces d'un large impact frais sur un rond mat



b) Vancouver 1700 SM :
Réseau de fractures orthogonales



c) Vancouver 1700 SM : Zone de broyage, d'écaillage
et grandes lignes de fractures

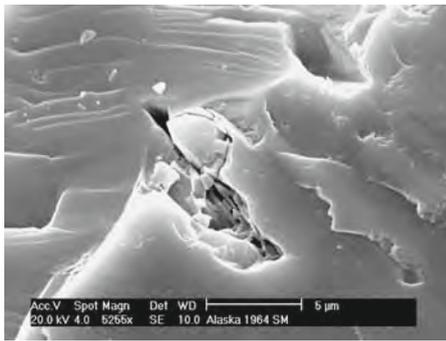


d) Vancouver 1700 SM : Aire d'impact frais
avec 4 lignes de fractures parallèles entre elles

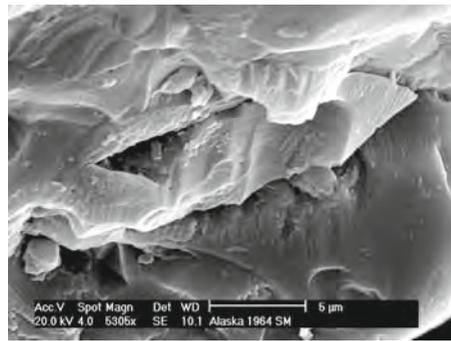
Figure 16 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Vancouver, 1700, Sables Moyens.

Exoscopie des quartz du dépôt de 1964

Par rapport au dépôt de 1700, les diatomées ne sont plus observées à la surface des quartz de 1964, un seul frustule disloqué a été observé. Dans la série des quartz grossiers, les fractures et les dislocations semblent affecter en priorité les zones sombres des quartz évolués. Des zones d'impact frais générant de petites écailles apparaissent sur les clichés, tandis que l'on retrouve à nouveau les surfaces cannelées et ciselées observées en 1700 (figure 17 a-b). Enfin, une fracture fraîche sur un coté du quartz présente une cassure parallèle à l'orientation d'une face.



a) Vancouver 1964 SM:
Très net impact générant de la dislocation



b) Vancouver 1964 SM: Zone excavée avec traces d'impact frais, ligne de fracturation et coups de gouges

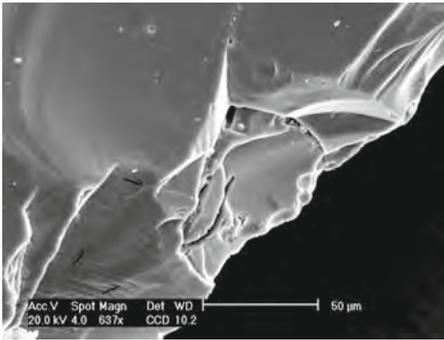
Figure 17 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Vancouver, 1964, Sables Moyens.

Les quartz de taille moyenne se caractérisent par un écaillage important (figure 19 a-b). Des plaques de grandes dimensions et en voie de décollement sont présentes (figure 19 c-d). Des zones disloquées, de taille réduite, mais bien individualisées sont notées (figure 19 e). La figure 19 f met en évidence des fracturations.

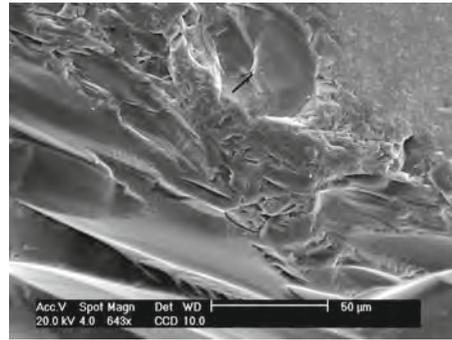
6.2 Dépôt de tsunami au Japon en 869 ap. J.-C.

Les quartz de la fraction des sables grossiers font apparaître des lignes de fracture fines mais longues (figure 18 a). On note des cupules de chocs (figure 18 b) ainsi que des successions de chocs frais le long des arêtes (figure 18 c, f) ou de certaines faces (figure 18 d). Des surfaces ciselées et cannelées sont également remarquées (figure 18 e-f). Enfin la présence de nombreuses inclusions tend à fragiliser la structure cristalline de ce cortège de quartz (figure 18 a, f).

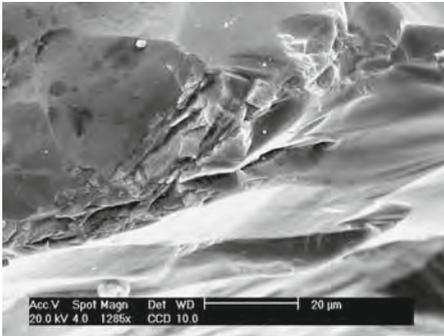
La fraction moyenne des quartz étudiés comporte toujours de nombreuses inclusions (figure 19 a). Les impacts relevés font souvent apparaître de belles plaques de décollement (figure 19 b-c). Des traces curvilignes de chocs frais caractérisent les ronds mats (figure 19 d). Enfin de vastes réseaux de fracturation multidirectionnels sont observés (figure 19 e-f).



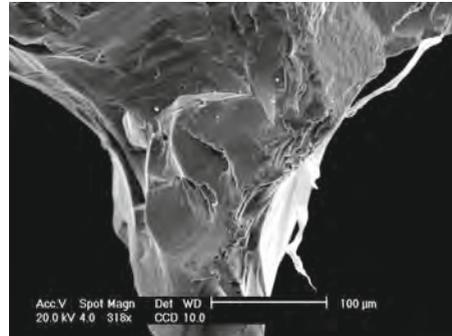
a) Japon 869 SG: Grandes lignes de fracture à gauche. Présences d'inclusions.



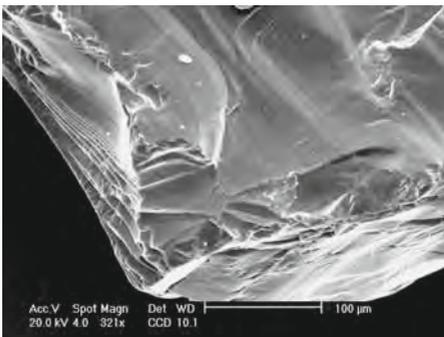
b) Japon 869 SG: Zone d'impact en haut (cf. flèche) et traces de chocs frais



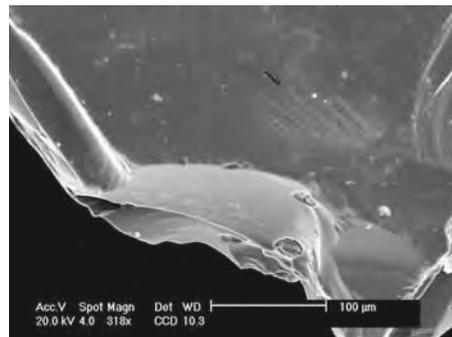
c) Japon 869 SG: Ligne de chocs continue le long de l'arête



d) Japon 869 SG: Fraicheur de l'impact attesté sur l'ensemble des faces et arêtes du quartz

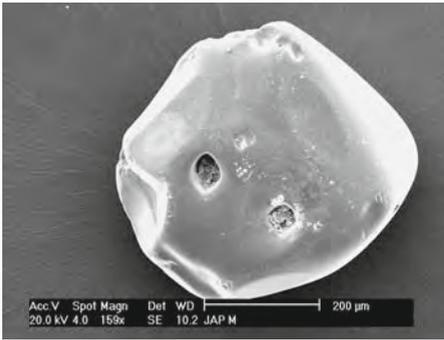


e) Japon 869 SG: Surface ciselée et cannelées à gauche

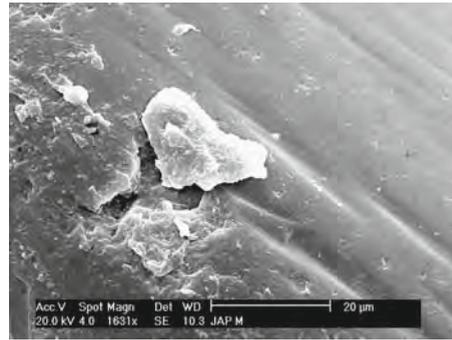


f) Japon 869 SG : Arrête marquée par un impact. Forme en creux incurvée, arquée, avec inclusions. On distingue des cannelures (cf. flèche)

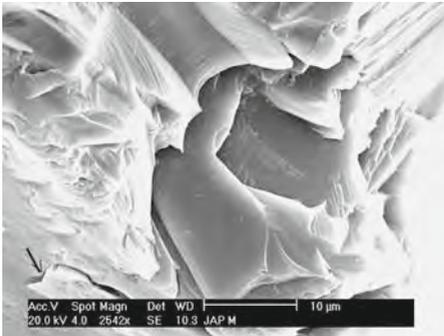
Figure 18 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Japon, 869, Sables Grossiers.



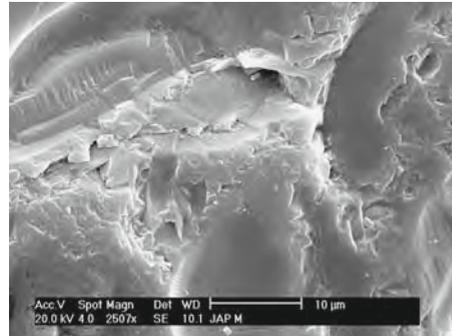
a) Japon 869 SM :
Quartz émousé luisant avec inclusions



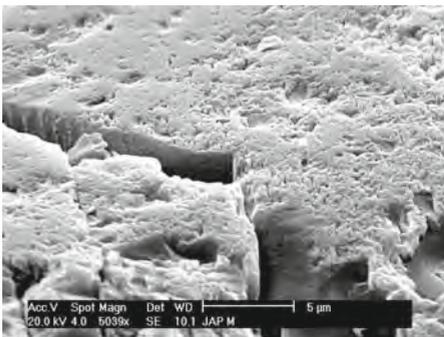
b) Japon 869 SM :
Zone d'impact avec très belle plaque de décollement



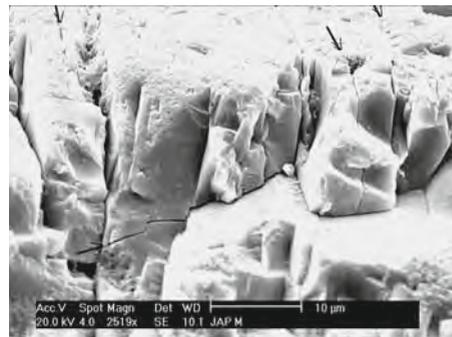
c) Japon 869 SM : Impact frais et net. Fracturations et plaque de décollement en bas à gauche



d) Japon 869 SM :
Formes curvilignes d'impacts sur un rond mat



e) Japon 869 SM : Grande ligne de fracturation affectant une face d'un quartz émousé terne



f) Japon 869 SM :
Réseau de fractures multi-directionnel

Figure 19 - Clichés de quartz vus au MEB, échantillon Japon, 869, Sables Moyens.

6.3 Un dépôt de tsunami au Portugal en 1755

Ce dépôt de tsunami est lié au séisme qui a secoué Lisbonne le 1^{er} novembre 1755 avec une magnitude de l'ordre de 8.5 (Andrade, Hindson 1999). Ce séisme a engendré un tsunami qui a touché les côtes ouest et sud du Portugal ainsi qu'une partie de l'Espagne et du Maroc. La hauteur de la vague est estimée entre 10 et 15 m.

Les quartz du tsunami de 1755 proviennent d'un prélèvement effectué en 1998 par Christophe Morhange, dans une coupe nord-sud réalisée au bulldozer, dans la plaine littorale de Boca do Rio. Le prélèvement se positionne dans le supralittoral à environ 1 m au-dessus du niveau marin actuel. Les analyses morphoscopiques révèlent l'importance des stocks d'émoûssés luisants et de ronds mats, tandis que les Non Usés Evolués ne représentent que 15% environ du lot (Bruzzi, Prone 2000). La signature exoscopique du tsunami permet d'établir une typologie basée sur quatre classes :

- des zones de décollement en plaque de taille conséquente ;
- des figures de desquamation avec de nombreuses écailles ;
- des zones de fracturation orientée ;
- des cupules de chocs de grandes dimensions.

7. TYPOLOGIE DES IMPACTS ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

7.1 Les quartz du Japon

Les quartz provenant du dépôt de tsunami ayant frappé les côtes japonaises en 869 sont automorphes et bi-pyramidés non-usés et légèrement émoûssés pour les $\frac{3}{4}$ du stock. Cela leur confère une plus haute résistance face aux chocs hydrodynamiques. Cependant la présence de nombreuses inclusions tend à les fragiliser. Dans ce contexte, il est difficile de savoir quel est le paramètre majeur. Sont-ils plus ou moins résistants que les quartz d'Alexandrie? On retrouve en partie la typologie en six groupes établie à Alexandrie.

- des croissants de chocs de grande amplitude. Ces croissants sont également les seuls à être observés sur les ronds mats ;
- des zones de desquamation avec plaque de décollement ;
- des réseaux de fracturation ;
- enfin un nouveau type de marque est fréquemment observé, il s'agit de surfaces ciselées et cannelées. Ces surfaces marquées ne sont pas forcément à rapprocher d'une singularité génomorphique, directement liée au processus de cristallisation.

7.2 Les quartz du Canada

Les quartz issus du dépôt de 1700 comportent trois types d'impacts :

- les croissants de chocs, également les seules marques affectant les ronds mats ;
- les réseaux de fractures ;
- des traces d'écaillage.

Les quartz du dépôt de 1964 possèdent en plus trois autres types de chocs :

- des dislocations affectant principalement les non usés évolués ;
- des zones de broyage ;
- des plaques de décollement (plus grandes qu'un simple écaillage).

Il est important de noter à la fois la fraîcheur des impacts et l'abondance de débris de diatomées dont certaines sont encore presque intactes dans le dépôt de 1700, alors qu'elles sont rares dans le dépôt de 1964. En raison de leur petite taille, il n'est pas étonnant de trouver des diatomées à la surface de ces quartz. En revanche, leur abondance en 1700 et leur quasi-absence en 1964 suggère un tsunami plus violent en 1964.

7.3 Les quartz du Portugal

Quatre types d'impacts de forte énergie sont observés (Bruzzi, Prone 2000) :

- des zones de décollement de plaque de grande taille ;
- des figures de desquamation de surface qui détache des écailles ;
- des zones de fracturation parfois orientées ;
- des cupules de chocs de grande dimension.

Les auteurs ont réalisé une comparaison avec un dépôt de tempête provenant du littoral Camarguais. Cette typologie se retrouve autant sur les quartz du dépôt de tempête que du dépôt de tsunami. Si la fraîcheur des chocs est sans équivoque, les marques semblent cependant être relativement plus fraîches sur les quartz de la tempête que sur ceux du tsunami. Le caractère sub-fossile de ce dernier dépôt pourrait en être la cause.

Finalement, si tous les types de chocs n'apparaissent pas de façon systématique sur chaque lot de quartz des différents tsunamis, certains semblent cependant ubiquistes. On remarque trois types de chocs constamment présents :

- des croissants de chocs de grande amplitude ;
- des réseaux de fracturation ;
- des zones de desquamation avec plaque de décollement.

Les autres marques (broyage, dislocation...) semblent dépendre d'autres paramètres locaux et plus spécifiques comme la nature cristalline du cortège de quartz, la configuration du site ou l'ampleur du tsunami.

7.4 Synthèse comparative avec les quartz d'Alexandrie de C I B

Sur le plan des similitudes, on ne retrouve pas entièrement la typologie établie à partir des quartz de l'unité C-I-B d'Alexandrie sur les lots du Japon, du Canada en 1700 et du Portugal. En revanche il existe une grande similitude entre les quartz de C-I-B d'Alexandrie et ceux du dépôt de 1964 au Canada. Si la typologie est semblable, il n'en est pas de même pour l'ampleur des chocs. Les marques de chocs observées à Alexandrie sont légèrement plus importantes que celles du Canada-1964. Cela induit-il une énergie au moment des chocs plus importante? Faudrait-il prendre en compte l'origine minéralogique des quartz et leur histoire paléoenvironnementale antérieure pour comprendre s'ils ont pu acquérir des zones de faiblesse. D'autres facteurs doivent également avoir un rôle déterminant : la hauteur de vague, le contexte géographique et bathymétrique dans lequel l'onde se propage, ainsi que l'intensité et le lieu d'amorce du tsunami.

Il semble, en tous cas, que l'environnement de sédimentation ne joue pas sur la conservation des traces; il ne semble pas y avoir d'évolution post-sédimentaire importante sur les quartz. Les chocs sont frais sans dépôt ou usure, ce qui signifie que ces traces ont été les dernières à marquer l'histoire du quartz.

DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Une recherche a été menée afin de savoir si l'occurrence d'un tsunami était répertoriée vers la fin de l'Antiquité Romaine à Alexandrie. Il apparaît qu'au cours des 2000 dernières années, les textes recensent une série de huit tsunamis venant frapper la côte d'Alexandrie (Guidoboni *et al.* 1994; Ambraseys 1962; Kebeasy 1990, Antonopoulos 1980) (figure 5).

Les deux datations au radiocarbone réalisées sur le dépôt estimé de tsunami sont trop vieilles. Devant l'impossibilité de dater le dépôt lui-même, les niveaux sus et sous-jacent ont été datés. Mais le terme supérieur de l'unité de vase sous-jacente ayant pu être tronqué par l'arrivée de la vague, ces dates sont à considérer comme un terminus ante quem.

Le toit supérieur des vases de C I est daté entre 560 et 730 ap. J.-C.; en revanche, le toit des vases de C V est daté entre 775 et 1020. Il semble donc qu'une troncature sommitale ait affecté le dépôt de C I. Le terminus ante quem est donc 775 ap. J.-C. Certaines datations ¹⁴C directement à base de l'unité de sables sous-jacente sont toujours en attente. L'échantillon V 17 indique 1020 à 1170 ap. J.-C. et se positionne 2,5 m au-dessus du dépôt grossier. Le terminus post quem est donc 1170 ap. J.-C. Autrement dit, la mise en place de l'unité grossière est datée entre 775 et 1170 ap. J.-C.

Au cours de cette période de quatre siècles, entre la fin du VIII^e et la fin du XII^e siècle, un seul tsunami est recensé dans les textes anciens : il s'agit du tsunami de 881 ap. J.-C. Ce tsunami frappe la côte de Palestine et d'Égypte : « Un raz de marée est observé à Akko. Le niveau de la mer s'est élevé à Alexandrie et des bateaux furent projetés au delà de la plage » (Soloviev *et al.* 2000; Tholozan 1879; Willis 1928; Sieberg 1932a-b; Amiran 1951, 1952). Des recherches récentes (Soloviev *et al.* 2000) ont montré que la date du tsunami souvent référencée en 811 est en fait une possible erreur de transcription et qu'il faille plutôt lire 881. Mais l'occurrence de ce tsunami au IX^e siècle n'est en aucun cas remise en cause.

Sur les huit tsunamis référencés dans les textes qui viennent toucher Alexandrie, seul celui du IX^e siècle ap. J.-C. (811 ou 881) semble être attesté sédimentologiquement en ayant laissé la trace de son passage. Plusieurs explications sont à envisager :

- les chroniqueurs anciens ont pu pour certains exagérer un épisode de tempête et l'interpréter comme un tsunami. Autre possibilité de confusion : Alexandrie est citée comme ayant été touchée par le tsunami de 365 ap. J.-C. (Jacques, Bousquet 1984; Stiros 2000). Or à cette époque on assiste à un dépôt continu de vases plastiques portuaires sans aucune perturbation. Certains chercheurs s'accordent à penser qu'il ne s'agirait en fait pas de l'Alexandrie d'Égypte mais de l'Alexandrie Troas en Asie Mineure (Ambraseys 1962; Soloviev *et al.* 2000). De nombreux scientifiques ont travaillé sur cette période (Pirazzoli 1986; Pirazzoli *et al.* 1996; Taher 1998; Stanley *et al.* 2001; Stanley, Bernasconi 2006);
- le problème de la conservation d'un dépôt de tsunami dans l'infralittoral doit être évoqué. À ma connaissance, aucune recherche sur les dépôts de tsunamis mis en place et conservés dans l'infralittoral n'a été publiée. D'autres types de sédiments traduisant le passage de tsunami ont été répertoriés et référencés dans le bassin profond de Méditerranée Orientale. Les carottages et études sismiques ont mis en évidence des unités stratigraphiques liées au passage d'un tsunami et qualifiées d'homogénites (Kastens, Cita 1981). La plupart des dépôts de tsunami sont échantillonnés dans le supralittoral. L'étage infralittoral est, quant à lui, parcouru par des courants et ne constitue pas un

contexte favorable à la conservation d'un dépôt soudain et épisodique. Par contre, Alexandrie bénéficie à cette époque d'aménagements portuaires hérités de l'époque gréco-romaine. Ces structures ont dû favoriser la conservation partielle du dépôt grossier.

Il reste donc difficile de préciser davantage la nature de l'événement hydrodynamique violent qui a affecté le littoral d'Alexandrie vers la fin de l'époque romaine. S'agit-il d'une grande tempête ou d'un tsunami? Pour le moment aucun dépôt de tempête provenant d'Alexandrie n'a été étudié et comparé au MEB.

L'importance du processus hydrodynamique a cependant définitivement mis un terme à plus de 9 siècles d'accumulation limono-argileuse dans un bassin portuaire. Autrement dit, cet événement possède une faible récurrence à l'échelle séculaire et libère tout à la fois une puissante énergie hydromécanique à laquelle le complexe portuaire antique n'a pu faire face, le dépôt corrélatif de ce processus se retrouvant dans C I et dans C V, distant de 600 m.

Reste maintenant à poursuivre une approche pluridisciplinaire et à croiser les indicateurs texturaux, exoscopiques et textuels avec les bio-indicateurs comme la macro et la microfaune.

REMERCIEMENTS

Cealex USR 3134, Université d'Alexandrie, Institut Français d'Archéologie Orientale. Merci à Gérard Panczer et Bernard Champagnon du Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux Luminescents - UMR 5620 ainsi qu'à A. Prone, Université Aix-Marseille I, pour leurs remarques. Merci à Elisa Pleuger pour son aide à la mise en forme finale du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ambraseys 1962

Ambraseys N., *Data for the investigation of the seismic sea-waves in the eastern Mediterranean*, Bulletin of the Seismological Society of America, 52 (4), p. 895-913.

Amiran 1951

Amiran D. H. K., *A revised earthquake catalogue of Palestine*, Israel Exploration Journal, 1, p. 223-246.

Amiran 1952

Amiran D. H. K., *A revised earthquake catalogue of Palestine*, Israel Exploration Journal, 2, p. 48-62.

Andrade, Hindson 1999

Andrade C., Hindson R. A., *A short field-trip guide to the tsunamigenic deposits of the Boca do Rio lowland western Algarve, Portugal*, European Research Conferences, Albufeira, 18 february, 24 p.

Antonopoulos 1980

Antonopoulos J., *Data from investigation on seismic Sea waves events in the Eastern Mediterranean from 1000 to 1500 A.D.*, Part 3, Annali di Geofisica, 33, p. 179-198.

Bruzzi 1998

Bruzzi C., *Les tempêtes et l'évolution morphosédimentaire des plages orientales du delta du Rhône*, Thèse de Doctorat de Géographie Physique, université Aix-Marseille I, 325 p.

Bruzzi, Prone 2000

Bruzzi C., Prone A., *Une méthode d'identification sédimentologique des dépôts de tempête et de tsunami: l'exoscopie des quartz, résultats préliminaires*, Quaternaire, 11 (3-4), p. 167-177.

Clocchiatti 1975

Clocchiatti R., *Les inclusions vitreuses des cristaux de quartz. Étude optique, thermo-optique et chimique. Applications géologiques*, SGF-Paris, 96 p.

Culver et al. 1983

Culver S. J., Bull P. A., Campbell S., Shakesby R. A., Whalley W. B., *Environmental discrimination based on quartz surface textures: a statistical investigation*, Sedimentology, 30, p. 129-136.

Font et al. 2010

Font E., Nascimento C., Omira R., Baptista M. A., Silva P. F., *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 182 (3-4), p. 187-198.

Goiran 2001

Goiran J.-P., *Recherches géomorphologiques dans la région littorale d'Alexandrie en Égypte*, Thèse de Doctorat en Géographie physique, université Aix-Marseille I, 262 p.

Georges 2004

Georges K., *Méthode de traitement statistique appliquée à l'exoscopie des quartz - Environnements fluviaux et littoraux de Provence*, université Aix-Marseille I, 350 p.

Goiran, Morhange 1999

Goiran J.-P., Morhange C., *Nouvelles données sédimentologiques et biologiques sur le tombolo et dans le port antique d'Alexandrie, Égypte*, Bulletin de Correspondance Hellénique, 123, p. 560-566.

Goiran, Morhange 2003

Goiran J.-P., Morhange C., *Géoarchéologie des ports antiques de Méditerranée: problématiques et études de cas*, Topoi, 11, p. 645-667.

Goiran et al. 2005

Goiran J.-P., Marriner N., Morhange C., Abd El-Maguib M. M., Espic K., Bourcier M., Carbonel P., *Évolution de la géomorphologie littorale à Alexandrie (Égypte) au cours des six derniers millénaires*, Méditerranée, 104, p. 61-64.

Goiran et al. 2008

Goiran J.-P., Djeghri N., Ollier N., *Les ports antiques en Méditerranée. Approche géoarchéologique: Problématiques, méthodes, terminologie et études de cas*, Actes du Colloque International du 12-14, mai 2005 sur Ressources et activités maritimes dans l'Antiquité, Université du Littoral, Boulogne, Éditeur J. Napoli, p. 473-493.

Guidoboni et al. 1994

Guidoboni E., Comastri A., Traina G., *Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean Area up to the 10th century*, Istituto Nazionale di Geofisica, Bologna, 504 p.

Jacques, Bousquet 1984

Jacques F., Bousquet B., *Le Raz de Marée du 21 Juillet 365: du cataclysme local à la catastrophe cosmique*, MEFRA, 96, p. 423-461.

Kastens, Cita 1981

Kastens K. A., Cita M. B., *Tsunami-induced sediment transport in the abyssal Mediterranean Sea*, Geological Society of America Bulletin, Part I, 92, p. 845-857.

Kebeasy 1990

Kebeasy R., *Seismicity*, The geology of Egypt, Rotterdam, p. 51-59.

Le Ribault 1977

Le Ribault L., *L'exoscopie des quartz*, Éditions Masson, Paris, 200 p.

Le Ribault 1980

Le Ribault L., *Exoscopie des quartz: fiches signalétiques et interprétation des principaux caractères phénomorphiques*, Thèse de doctorat d'État ès-Sciences, soutenue le 7 juin 1980, 2286, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay, 427 p.

Le Ribault 1984

Le Ribault L., *Une méthode pour déterminer l'histoire des grains de sable: l'exoscopie*, Bulletin de la Société d'Anthropologie du Sud-Ouest, IX (2), p. 123-137.

Marriner et al. 2010

Marriner N., Morhange C., Goiran J.-P., *Coastal and ancient harbour geoarchaeology*, *Geology Today*, 26, Issue 1, p. 21-27.

Morhange et al. 2000

Morhange C., Goiran J.-P., Bourcier M., Carbonel P., Le Campion J., Rouchy J.-M., Yon M., *Recent Holocene Paleo-environmental evolution and coastline changes of Kiton, Larnaca, Cyprus, Mediterranean sea*, *Marine Geologie*, 170, p. 205-230.

Pirazzoli 1986

Pirazzoli P.A., *The Early Byzantine Tectonic Paroxysm*, *Z. Geomorph. N.F., Suppl.* 62, p. 31-49.

Pirazzoli et al. 1996

Pirazzoli P.A., Laborel J., Stiros S.C., *Earthquake clustering in the Eastern Mediterranean during historical times*, *Journal of Geophysical Research*, 101, p. 6083-6097.

Prone 1980

Prone A., *Les quartz de la Provence Occidentale, étude exoscopique et endoscopique, implications paléogéographiques*, *Atlas*, Thèse de Doctorat, université de Provence, 215 p.

Sieberg 1932a

Sieberg A., *Untersuchungen über Erdbeben und Bruchschollenbau im östlichen Mittelmeergebiet*, Denkschriften der med.- naturw. Ges. zu Jena, 18, p. 161-273.

Sieberg 1932b

Sieberg A., *Erdbebengeographie*, in *Handbuch der Geophysik*, Band IV, ed. B. Gutenberg, Berlin, p. 687-1005.

Soloviev et al. 2000

Soloviev S.L., Soloviev O.N., Go C.N., Khen K.S., Shchetnikov N.A., *Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D.*, Kluwer Academic Publishers, 237 p.

Stanley et al. 2001

Stanley D.J., Goddio F., Schnepf G., *Nile flooding sank two ancient cities*, Nature, 412, p. 293-294.

Stanley, Bernasconi 2006

Stanley D.J., Bernasconi M.P., *Holocene Depositional Patterns and Evolution in Alexandria's Eastern Harbor, Egypt*, Journal of Coastal Research, 22, Issue 2, p. 283-297.

Stiros 2000

Stiros S.C., *The AD 365 Crete earthquake and possible seismic clustering during the fourth to sixth centuries AD in The Eastern Mediterranean: a review of historical and archaeological data*, Journal of Structural Geology, 23, p. 545-562.

Taher 1998

Taher M.A., *Les séismes à Alexandrie et la destruction du phare, Alexandrie médiévale 1, Etudes alexandrines*, Institut Français d'archéologie orientale, 3, p. 51-56.

Tholozan 1879

Tholozan J.D., *Sur les tremblements de terre qui ont eu lieu en Orient du VII^e au XVII^e siècle*, Compte rendus de l'Académie des Sciences, 88, p. 1063-1066.

Willis 1928

Willis B., *Earthquakes in the Holy land*, Bulletin of the Seismological Society of America, 23, p. 88-89.

