

Université Lumière-Lyon 2
Faculté de Géographie, Histoire, Histoire de l'Art et Tourisme
Master 1 Interface Nature-Sociétés
Parcours Hydrosystèmes
Archéorient - UMR 5133



Mémoire de M1 de géographie présenté par Marion LECONTE

Directeurs de recherche : M. Bernard Geyer et M. Jean-Philippe Goiran

Date de soutenance : Septembre 2010

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à Bernard Geyer et Jean-Philippe Goiran sans qui l'occasion d'écrire un telle page ne m'aurait même pas été donnée.

Je voudrais les remercier tout d'abord pour leur encadrement, leurs réponses toujours rapides à mes très nombreuses interrogations, et pour m'avoir aidé dans ce travail complètement nouveau d'organisation d'un raisonnement à l'écrit.

Je souhaite également leur exprimer toute ma reconnaissance pour m'avoir fait découvrir autant de facettes de « la Recherche » au CNRS en m'intégrant dans les activités de l'équipe qui travaille sur la Syrie. Je n'avais pas espéré avoir l'opportunité de faire autant de choses en un an ! En quelques mots : merci de m'avoir motivée à poursuivre en master 2.

Merci également à toutes les personnes qui m'ont aidé durant la rédaction de ce mémoire : Laurent Schmitt (merci pour l'organisation du master 1 !), Nick Marriner qui a déterminé l'ensemble des coquillages, George Willcox qui a déterminé les graines, Hala qui m'a aidé à photographier les graines et les coquillages, Vincent Gaertner pour tout le temps qu'il a passé à nous expliquer les mystères du fonctionnement du granulomètre laser et autres techniques de tamisage et Pierre Carbonel pour toute son aide et pour ses explications concernant l'étude des « bestioles ».

Merci à la Direction Générale des Antiquités et des Musées de Syrie ainsi qu'à la Mission Syro-française d'Ougarit qui contribuent à l'existence de ce travail.

Naturellement, merci à mes parents pour la relecture, l'attention, l'aide inconditionnelle et à Maëlle, Marine et Maod pour leur soutien.

Un petit mot également pour Camille, inattendue collègue ougaristique et pour tous les camarades du laboratoire : Ferréol, Hugo, Pauline, Julie, Maël, Ghada (شكراً جزيلاً غادة !).

Et bien entendu, un grand merci à Karen, Coralie, Morgane et Laura pour les séances d'imitation des cailloux, la pause de 12h30, la pasta et tout le reste.

Pour terminer : merci à Jimmy et bon courage pour la thèse !

INTRODUCTION.....	5
I. L'INTÉRÊT D'UNE ÉTUDE PALÉOENVIRONNEMENTALE À RAS IBN HANI.....	8
<i>I.1. Les caractéristiques géographiques.....</i>	8
I.1.a. Un climat méditerranéen.....	8
I.1.b. La presqu'île au contact direct de la mer Méditerranée.....	10
<i>I.2. Un site d'un grand intérêt archéologique.....</i>	11
I.2.a. Deux palais de l'âge du Bronze liés au royaume d'Ougarit.....	11
I.2.b. La découverte d'une chaussée fossilisée.....	12
I.2.c. Des vestiges témoins d'occupation humaine après l'âge du Bronze.....	13
<i>I.3. Un site littoral témoin des variations de la ligne de rivage.....</i>	13
I.3.a. Définition de la ligne de rivage et de l'espace littoral.....	13
I.3.b. L'étagement caractéristique du littoral.....	13
I.3.c. Etude des variations de la ligne de rivage.....	14
<i>I.4. L'hypothèse d'un tombolo à l'origine de la presqu'île d'Ibn Hani.....</i>	16
I.4.a. Les formations géologiques ne sont pas toutes contemporaines.....	16
I.4.b. L'hypothèse de P. Sanlaville.....	17
I.4.c. L'hypothèse de S. Daoud et H. Ghazi.....	19
I.4.d. La formation d'un tombolo entre l'île et le continent.....	22
II. ANALYSE STRATIGRAPHIQUE DE LA CAROTTE RIH III.....	23
<i>II.1. L'intérêt du carottage pour étudier les sédiments.....</i>	23
II.1.a. Extraire des archives sédimentaires.....	23
II.1.b. Reconstituer des couches stratigraphiques homogènes.....	24
II.1.c. Un inconvénient principal : le manque de représentativité.....	24
<i>II.2. Localisation du site du carottage RIH III.....</i>	25
II.2.a. Présentation de la presqu'île.....	25
II.2.b. Choix du carottage étudié.....	25
<i>II.3. Objectifs de l'étude d'un carottage de sédiments.....</i>	26
II.3.a. Connaitre le mode de transport des sédiments et les condition de leur dépôt.....	26
II.3.b. Isoler les différents indicateurs présents dans les sédiments.....	27
II.3.c. Reconstituer et dater les milieux de sédimentation.....	27
<i>II.4. Analyse granulométrique.....</i>	28
II.4.a. Principes.....	28
II.4.b. Analyse texturale.....	28
II.4.c. Granulométrie laser.....	31
<i>II.5. Etude des ostracodes (réalisée par P. Carbonel).....</i>	40
II.5.a. Les principes de la détermination.....	40
II.5.b. Les méthodes utilisées.....	40

II.5.c. Résultats et interprétation.....	42
II.6. Analyse malacologique (réalisée par N. Marriner).....	45
II.6.a. Principes et apports de l'analyse malacologique.....	45
II.6.b. La signification des différents étages en terme de milieu.....	46
II.6.c. Résultats et interprétation.....	47
II.7. Analyse des restes végétaux.....	50
II.7.a. Etude palynologique.....	50
II.7.b. Présence de graines.....	50
II.7.c. Réaction à l'attaque à l'eau oxygénée.....	51
II.7.d. Présence de ruppia.....	51
II.7.e. Interprétation.....	51
II.8. Autres éléments repérés.....	51
II.8.a. Couleur des échantillons.....	51
II.8.b. Débris de beach-rock.....	52
II.8.c. Gypse.....	52
II.9. Datation des échantillons.....	52
II.9.a. Principes de la datation radiocarbone.....	52
II.9.b. Résultats.....	54
III. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSION.....	55
III.1. Description des unités stratigraphiques identifiées.....	57
III.1.a. Méthode de découpage des unités stratigraphiques.....	57
III.1.b. Unité A.....	57
III.1.c. Unité B.....	57
III.1.d. Unités C, D et C'.....	58
III.1.e. Unité E.....	59
III.1.f. Unité F.....	59
III.1.g. Interprétation de la succession des unités stratigraphiques.....	59
III.2. Présentation des hypothèses de variations relatives du niveau marin à Ras Ibn Hani	60
III.2.a. Intérêt pour la présente étude.....	60
III.2.b. Résultats de deux études de terrain.....	60
III.2.c. Confrontation avec les données du carottage RIH III.....	63
III.3. Comparaison des résultats de plusieurs carottages réalisés sur la presqu'île.....	63
CONCLUSION.....	65
BIBLIOGRAPHIE.....	66
TABLE DES FIGURES.....	69
ANNEXES.....	71

Introduction

La presqu'île d'Ibn Hani, étudiée dans ce mémoire, se situe en Syrie, sur la côte méditerranéenne, à environ 8 kilomètres au nord de la ville de Lattaquié, et peut être localisée grâce aux cartes ci-dessous :

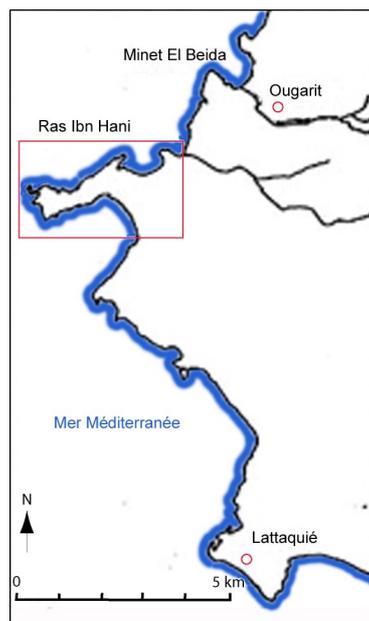


Figure 1 : Cartes de localisation

Les géographes étudient la presqu'île d'Ibn Hani dans le cadre d'un travail en collaboration avec les archéologues. La presqu'île présente avant tout un grand intérêt archéologique par sa proximité avec le site de Ras-Shamra, l'antique Ougarit, et parce que des traces de constructions monumentales datées de l'âge du Bronze y ont été retrouvées.

Sur le site de Ras-Shamra Ougarit, des vestiges d'une ampleur exceptionnelle ont été découverts. Ils sont les témoins d'une occupation continue allant du Néolithique (8^e millénaire avant J.-C.) jusqu'à l'âge du Bronze (2^e millénaire avant J.-C.).

Les recherches archéologiques réalisées à Ras Ibn Hani ont également mis au jour des traces d'installations humaines de différentes époques. Des vestiges architecturaux, dont les plus conséquents sont datés de l'âge du Bronze, semblent avoir un lien avec ceux de la même époque trouvés à Ougarit (Lagarce, Bounni, 1998). La découverte de tessons de céramiques, de pièces de monnaie ainsi que de tablettes permettent de dater et de mieux connaître les modes d'appropriation du site apparemment occupé pendant l'âge du Bronze (14^e - 12^e siècle av J.-C.), l'âge du Fer (8^e - 5^e siècle av J.-C.) et l'époque hellénistique (3^e siècle av J.-C.). Toutes ces découvertes sont étudiées par les archéologues afin de mieux connaître le fonctionnement des sociétés dans le passé.

Dans le but de préciser l'interprétation de ces découvertes archéologiques, il est intéressant de connaître le contexte environnemental dans lequel ces structures et artefacts ont existé et de faire pour cela une étude paléoenvironnementale sur la presqu'île. Une telle étude nécessite de s'intéresser aux milieux de sédimentation passés mais aussi aux variations relatives du niveau marin. En effet, les changements de paysage dans les régions littorales, comme c'est le cas de Ras Ibn Hani, sont notamment liés aux changements de lignes de rivage qui dépendent de nombreux paramètres combinés et qu'il sera nécessaire de définir.

A l'occasion de prospections archéologiques réalisées au centre de la presqu'île, la première étude géomorphologique du cap a été effectuée par P. Sanlaville en 1976, dans le but d'obtenir des renseignements sur les lignes de rivages anciennes de la Méditerranée orientale. Cette étude a été reprise en 1977 par P. Sanlaville et R. Dalongeville. En 1991, une nouvelle étude menée par P. Pirazzoli, J. Laborel, R. Dalongeville et P. Sanlaville a apporté des précisions aux précédentes investigations et des datations (Lagarce J. et E., 1995).

Toutes ces études ont déjà montré l'existence de dépôts en recul de la ligne de rivage actuelle ou au contraire de formes en creux sur les falaises, qui témoignent de périodes de progradation et d'érosion. Ces changements dans le tracé et l'altitude de la ligne de rivage indiquent une variation relative du niveau marin.

Pour compléter ces études géomorphologiques et obtenir d'avantage d'éléments de comparaison, plusieurs campagnes de carottages ont été envisagées en différents points du littoral syrien dans le cadre d'un programme portant sur les ports du littoral syrien, réalisé avec la mission archéologique syro-française de Ras Shamra. Les premiers carottages étudiés sont ceux réalisés à Ras Ibn Hani.

La presqu'île se compose à l'ouest d'une formation rocheuse antérieure à l'holocène (miocène ou pléistocène). La partie orientale de la presqu'île est composée de sables plus récents, probablement holocènes. Ces sables, qui font un lien entre la formation rocheuse et le littoral syrien, semblent avoir été déposés par des processus marins. Il semble que dans le passé la partie rocheuse de la presqu'île a été successivement liée au littoral puis séparée de lui par un bras de mer. L'origine de ces sables ainsi que les conditions de leur dépôt sont inconnus. L'étude des carottages réalisés à Ras Ibn Hani peut apporter des renseignements sur les processus ayant entraîné ces dépôts holocènes.

Dans le cadre de ce mémoire, c'est la carotte RIH III qui sera étudiée. Nous essayerons de distinguer des phases de dépôts sédimentaires homogènes pour essayer à comprendre ces processus. L'étude permettra éventuellement d'obtenir des éléments permettant à terme, après comparaison avec les résultats obtenus pour l'ensemble des carottages de la presqu'île, d'essayer de connaître l'environnement végétal et climatique dans le passé.

L'analyse a été construite en trois parties. La première partie permettra de tenter de justifier le choix du site de Ras Ibn Hani pour la présente étude, en exposant les nombreuses spécificités qui le caractérisent. Dans une deuxième partie, plus méthodologique, toutes les méthodes utilisées seront expliquées et les résultats seront présentés analyse par analyse. La troisième partie permettra de faire la synthèse des résultats obtenus et de discuter leur interprétation.

I. L'intérêt d'une étude paléoenvironnementale à Ras Ibn Hani

I.1. Les caractéristiques géographiques

I.1.a. Un climat méditerranéen

La Syrie est un pays protégé des descentes directes d'air polaire ou arctique par la présence des deux chaînes élevées situées en Anatolie (le Taurus) et en Iran (le Zagros). La majorité du territoire syrien bénéficie d'un climat semi aride très sec hormis le littoral qui bénéficie d'un climat méditerranéen (Sanlaville, 2000).

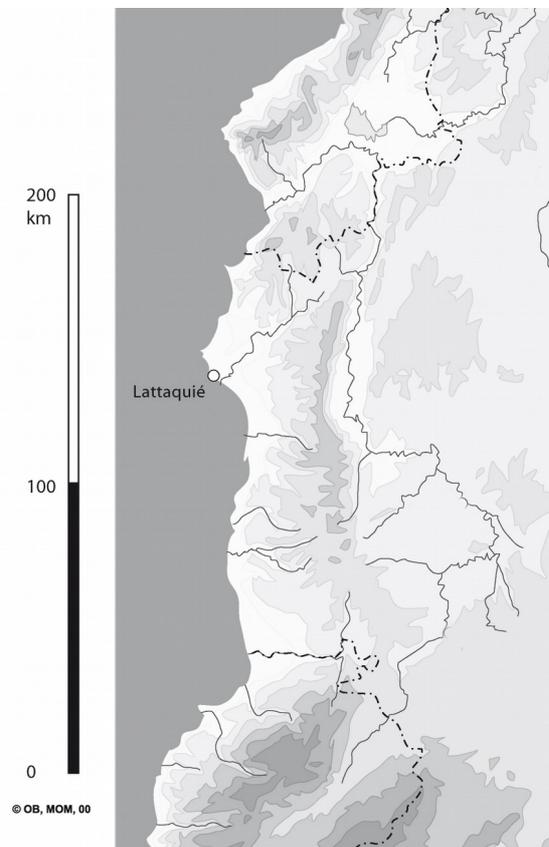
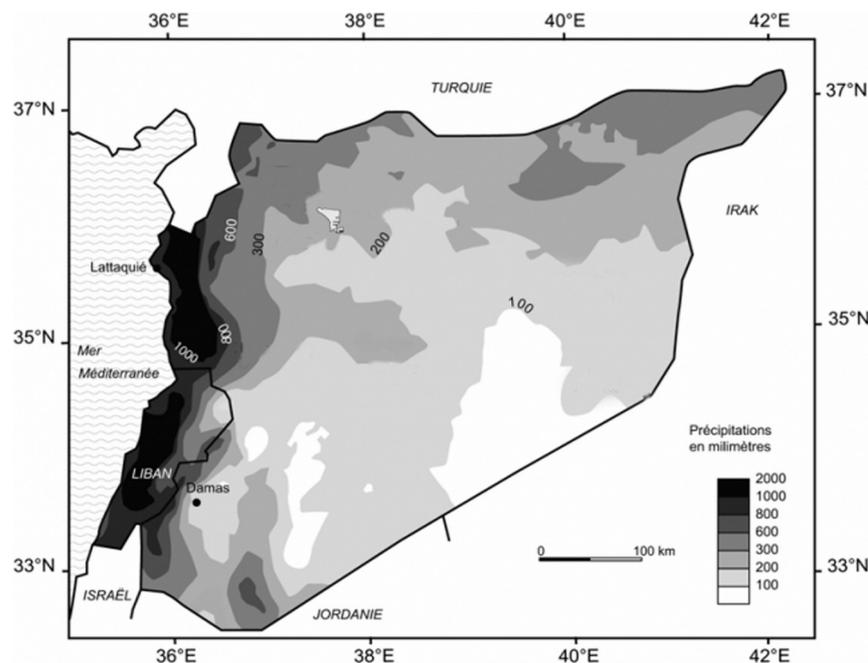


Figure 2 : Topographie

La plaine littorale est protégée par la présence à l'est d'une chaîne de montagne qui culmine à environ 1586 mètres (cf Figure 2). La proximité directe de la mer Méditerranée associée à la présence de ce massif montagneux confère à la plaine littorale une forte humidité atmosphérique et une amplitude thermique diurne et annuelle plus faible qu'à l'intérieur des terres syriennes.

Cette région littorale abritée bénéficie d'un climat méditerranéen marqué par un hiver pluvieux et doux de décembre à mars. Les précipitations sont concentrées et tombent en un petit nombre de jours : 82 jours de pluie de plus de 1 mm ont été comptés à Lattaquié. La moyenne annuelle des précipitations y est de 800 mm environ. L'importance des précipitations peut s'expliquer par le phénomène des précipitations orographiques lié à l'ascendance des masses d'air à la rencontre de l'obstacle des montagnes orientales (Sanlaville, 2000).

Les précipitations diminuent rapidement au printemps et la sécheresse estivale est marquée avec une absence presque totale de précipitations de juin à septembre. A Lattaquié la saison sèche (c'est-à-dire quand les précipitations sont inférieures au double de la température moyenne mensuelle) dure 5 mois (Sanlaville, 2000).



**Figure 3 : Précipitations moyennes annuelles 1960-1961 à 1989-1990
(J.-B. Rigot d'après Traboulsi et Laborde 2001)**

Sur le littoral, le vent est fréquent et parfois fort. En été les étésiens arrivent de la mer Egée par le sud-sud-ouest. En hiver, il peut y avoir des vents d'est, du nord ou du nord est (Daoud et Ghazi, 2004-2005) et le type de temps est caractéristique d'une masse d'air polaire continental (Sanlaville, 2000).

I.1.b. La presque île au contact direct de la mer Méditerranée

La mer Méditerranée est une mer semi-fermée profonde, comprise entre le 30°N et le 40°N. Le plateau continental est dans l'ensemble étroit et pentu. En effet, les montagnes sont très proches de la côte et l'isobathe de 2000 m n'est pas loin du trait de côte (Sanlaville, 2000).

Le marnage est faible et à peine sensible. La marée, de rythme semi-diurne, a une amplitude de 0,40 m en syzygie (marée de vive eau) et de 0,20 m en quadrature (marée de morte eau), mais les changements de pression et les vents peuvent aussi entraîner des variations temporaires du niveau marin de l'ordre de 0,40 m (Sanlaville, 2000).

La circulation de l'eau s'effectue d'ouest en est le long de la côte africaine puis du sud au nord le long de la côte levantine (Sanlaville, 2000).

La mer Méditerranée est caractérisée par une très forte évaporation d'environ un mètre par an. L'évaporation n'est pas compensée par le ruissellement et les précipitations. C'est pourquoi c'est un bassin dont le bilan hydrique est négatif. Le renouvellement de l'eau est faible car on estime son volume à 3,7 millions de km³. Il est donc d'environ 1 % par an (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994). La compensation se fait par entrée d'eau atlantique.

Les eaux qui entrent de l'Atlantique sont légères, elles vont donc s'étaler en surface. Cette eau atlantique subit les effets climatiques : sa salinité et sa densité vont croître au fur et à mesure qu'elle va progresser vers l'est et vers le nord. Les eaux atlantiques se répandent progressivement dans toute la Méditerranée sur une épaisseur de quelques dizaines de mètres, entre 150 et 200 m de profondeur. Leurs caractéristiques persistent très longtemps (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Les vents de secteur est, sud-est ou d'ouest sont moins importants pour l'hydrodynamique générale de la mer. Néanmoins les vents d'est et de sud-est fonctionnent comme des vents de mer et provoquent un relèvement du niveau du plan d'eau. Les vents de sud à sud-ouest soulèvent parfois de fortes houles susceptibles de modifier les fonds.

I.2. Un site d'un grand intérêt archéologique

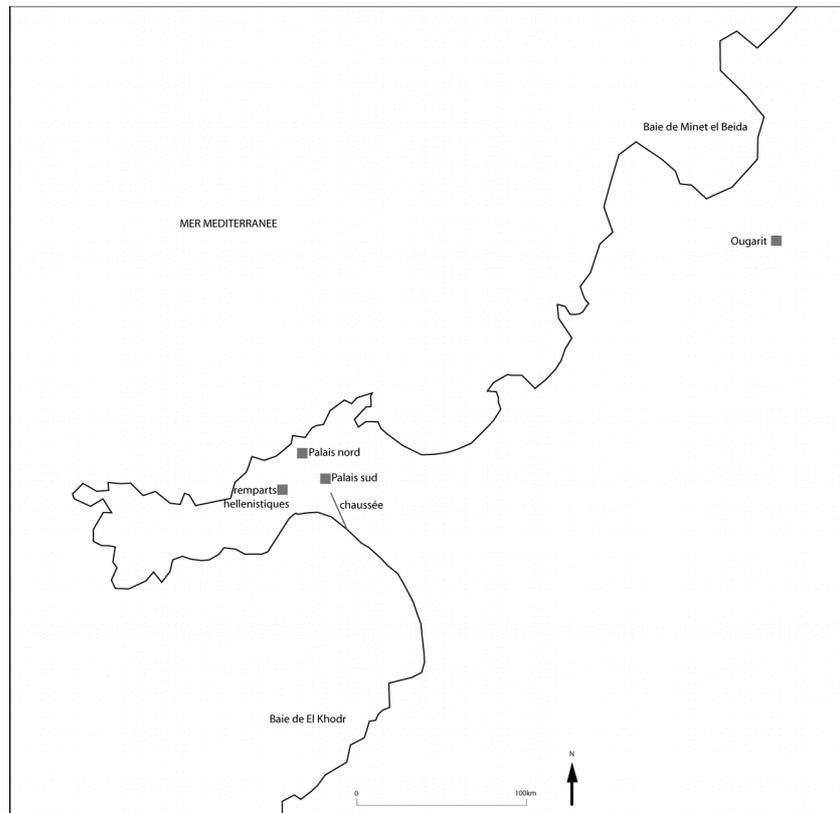


Figure 4 : Localisation des sites archéologiques cités

I.2.a. Deux palais de l'âge du Bronze liés au royaume d'Ougarit

Pendant l'âge du Bronze la presqu'île d'Ibn Hani faisait partie intégrante du vaste royaume d'Ougarit. La ville de Ras Shamra, l'antique Ougarit, était la capitale éponyme du royaume. Beaucoup de vestiges architecturaux, des artefacts (par exemple les pointes de flèches, cf le mémoire de C. Boulland, 2010) ainsi qu'un grand nombre de tablettes permettent aux archéologues de comprendre le fonctionnement de cette ville aux différentes époques de son occupation, principalement à l'âge du Bronze.

A proximité de la côte septentrionale de la presqu'île, sur une zone située à environ neuf mètres d'altitude, un ensemble de palais de l'âge du Bronze a été découvert par les archéologues (cf Figure 4). D'après les découvertes archéologiques et l'étude des textes, leur fondation semble remonter à la deuxième moitié du 14^e siècle ou au 13^e siècle avant J.-C. et ils ont été détruits entre le milieu du 13^e siècle et le début du 12^e siècle, à la même période que la destruction des bâtiments découverts à Ougarit.

L'ensemble des vestiges les plus au nord a été nommé Palais nord par les archéologues. Plus au sud, le Palais sud pourrait avoir été le palais du roi de Ras Shamra - Ougarit. Les

palais abritaient vraisemblablement des bureaux de l'administration royale et des ateliers de métallurgie avec moules à lingots cuivre (Lagarce J. et E., 1995). Des tablettes rédigées en ougaritique ont été retrouvées dans le Palais nord. C'est la seule trace d'ougaritique retrouvée hors de la capitale Ras Shamra - Ougarit.

Le choix de localisation d'un tel ensemble peut sûrement être expliqué par la proximité avec la mer Méditerranée qui procure un avantage climatique mais aussi économique car la présence de la mer permet la pêche et le contrôle de la production du sel. C'est également un emplacement stratégique puisque l'emplacement permettait la surveillance du trafic commercial et militaire.

Les raisons pour lesquelles ces palais ont été construits ne sont pas bien connues. La ville d'Ougarit possédait déjà un port de commerce dans la baie de Minet el-Beida, sur le site de Mahadu (Lagarce J. et E., 1995). La baie située au nord-est de l'ensemble des palais (cf Figure 4) est plus abritée des houles dominantes de l'WSW que ne l'est la baie de Minet el-Beida (Sanlaville, 1978). Le site de Ras Ibn Hani disposait peut-être de qualités portuaires ?

I.2.b. La découverte d'une chaussée fossilisée

Un empièchement large de six mètres a été découvert au sud de l'ensemble des palais (cf Figure 4). L'étude géomorphologique menée par P. Sanlaville (1978) ayant montré qu'un bras de mer séparait l'extrémité occidentale de la presqu'île (où se trouvent les vestiges architecturaux) du rivage syrien, cet empièchement a été interprété comme une chaussée. Au regard d'une analyse stratigraphique, P. Sanlaville a émis l'hypothèse que la chaussée est antérieure au tombolo et à la période hellénistique.

La découverte de cette chaussée a permis d'apporter des renseignements sur la topographie du site et son accessibilité depuis la terre ferme au Bronze récent (1600-1200 avant J.-C.). A l'époque où elle a été repérée, cette chaussée disparaissait au sud-est sous les eaux de la baie du Khodr. A l'époque de sa construction, son rôle était probablement de permettre l'accès au site à travers des zones recouvertes par la mer sur une faible profondeur (Lagarce J. et E., 1995).

La chaussée renseigne sur les possibles cheminements ayant existé au sud de la presqu'île. Cependant, il y a peu d'informations concernant la topographie du soubassement rocheux sous le sable dans la partie nord du tombolo et il n'est pas possible de savoir si d'autres cheminements, naturels ou aménagés, permettaient de relier l'île au littoral (Lagarce, Bounni,

1998). La campagne de carottage effectuée pourrait peut être permettre d'obtenir des éléments d'information.

I.2.c. Des vestiges témoins d'occupation humaine après l'âge du Bronze

Le site semble avoir été réoccupé à l'âge du Fer (800 – 400 av J.-C.) car des vestiges construits ont été retrouvés au-dessus des vestiges de l'âge du Bronze (Lagarce, 1978).

Des fortifications et des sépultures de l'époque hellénistique (3^e siècle avant J.-C.) ont été découvertes, à l'ouest du Palais sud (cf Figure 4).

Au sommet du rempart hellénistique, des habitations de l'époque romaine ont été découvertes.

I.3. Un site littoral témoin des variations de la ligne de rivage

I.3.a. Définition de la ligne de rivage et de l'espace littoral

La ligne de rivage est la ligne de contact instantané entre l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère qui varie en fonction de la marée. Le long des côtes méditerranéennes, le trait de côte est défini par le niveau maximal hivernal car la marée exerce peu d'influence (Joly, 1997).

L'espace littoral correspond au domaine géographique où se déplace la ligne de rivage. Il peut être divisé en plusieurs étages différenciés par leur altitude (Joly, 1997).

I.3.b. L'étagement caractéristique du littoral

Les différents étages ont été définis par les biologistes en fonction des critères de la lumière et de l'humectation qui sont les critères déterminant les biotopes des êtres vivants dans l'espace littoral.

• L'étage supralittoral

Il s'agit de la partie du littoral située au-dessus du niveau de la haute mer mais soumise à l'influence marine (Foucault, Raoult, 2005). Sa partie supérieure correspond à la limite des domaines marins et terrestres (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994). Cet étage n'est recouvert par la mer qu'en cas d'événements exceptionnels (tempêtes, tsunamis).

- **L'étage médiolittoral**

C'est la zone de marnage, c'est à dire la zone de battement des marées (Foucault, Raoult, 2005).

Les limites de cet étage sont difficiles à trouver en Méditerranée car le marnage est d'amplitude très faible. Les fluctuations du niveau de la mer sont limitées aux mouvements des vagues et aux variations liées au vents et à la pression atmosphérique (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994). En Méditerranée cet étage mesure en moyenne 0,20 mètres.

- **L'étage infralittoral**

Cet étage correspond à la partie du littoral submergée en permanence (Foucault, Raoult, 2005). La limite supérieure correspond souvent au 0 biologique dans les études sur les variations du niveau marin. Sa limite inférieure est dépendante de la diminution de la lumière en profondeur et peut aller jusqu'à 70 m de profondeur (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

I.3.c. Etude des variations de la ligne de rivage

- **Deux causes possibles des variations : tectonique et eustatisme**

La ligne de rivage correspond à une position d'équilibre du niveau de l'eau et de la lithosphère à un moment donné. Elle fluctue au cours du temps car le niveau de l'eau et la lithosphère évoluent selon des dynamiques qui leur sont propre.

L'épirogénèse définit l'ensemble des lents mouvements continus de montée ou de descente des domaines continentaux. Quand ils se soulèvent, pour un niveau marin constant, il y a régression car la ligne de rivage paraîtra plus basse qu'avant. A l'inverse, on parle de transgression si la masse continentale s'enfonce car la ligne de rivage sera marquée à un niveau plus haut (Foucault, Raoult, 2005). Dans le cas du littoral libano-syrien, la masse continentale a tendance à se soulever.

Les variations de la masse d'eau terrestre peuvent également provoquer une variation de la ligne de rivage entraînant des phases de régression ou de transgression. La formation ou la fusion des calottes glaciaires provoquent respectivement diminution et augmentation de la quantité d'eau dans les mers, tout comme des phénomènes qui pourraient modifier la forme et la capacité des bassins océaniques. On parle alors d'eustatisme (Foucault, Raoult, 2005).

• Les indicateurs de variation de la ligne de rivage

Pour reconstituer les anciens rivages de la mer, il est possible de s'appuyer sur des formes littorales émergées ou immergées ou bien d'étudier les dépôts de faciès littoral qui ne sont plus au bord de la mer (Guilcher, 1954).

L'étude des dépôts deltaïques et du beach-rock peut apporter des informations. Ce dernier est formé de sédiments de plage consolidés par un ciment calcaire. La cimentation des sables commence sous la plage actuelle et s'accroît brutalement quand cette dernière est enlevée par l'érosion (Sanlaville, 2000).

La corrosion marine se traduit par la formation d'encoches ou de trottoirs correspondant à des périodes de stabilité de la ligne de rivage (Müller Celka, Dalongeville, 2006). Les encoches sont des entailles horizontales situées au pied de la falaise (Joly, 1997), l'horizontalité de ces cavités est significative de l'origine marine de leur formation (Coque, 1998).

Sur le littoral syrien, la côte est fréquemment rocheuse, la falaise ne dépasse guère en général quelques mètres de hauteur. Elle est battue en permanence par la houle de beau temps et son pied est accompagné d'un trottoir horizontal large en moyenne d'un à trois mètres taillé dans la roche (Sanlaville, 2000). La position altitudinale des trottoirs de corrosion correspond à l'étage médiolittoral, soit à la tranche de marnage d'amplitude moyenne très faible (0,20 m) (Müller Celka, Dalongeville, 2006)

L'étude de constructions biologiques tels que les biohermes à vermetes apporte également des renseignements sur la position de la ligne de rivage car les vermetes et les algues constitutifs de ces constructions vivent au niveau de l'étage infralittoral supérieur (Sanlaville, 2000) voire de l'étage médiolittoral (Dalongeville, *et al.* 1993).

• Dater les variations observées

Les formes de corrosion, les constructions organogènes, les coquillages, les sédiments qui permettent la reconstruction d'une stratigraphie et les vestiges archéologiques jouent le double rôle de « marqueurs dateurs » qui donnent des indices de temporalité et indiquent également l'évolution altitudinale du niveau marin (Dalongeville, Fouache, 2005).

Les supports des datations sont de nature différente selon qu'il s'agit de ciment marin, de constructions organogènes ou de marques de corrosion. Chaque processus a son rythme particulier de mise en place, plus ou moins long, qu'il faut prendre en compte pour les utiliser pour définir une position altitudinale du niveau marin (Dalongeville *et al.*, 1993).

I.4. L'hypothèse d'un tombolo à l'origine de la presqu'île d'Ibn Hani

I.4.a. Les formations géologiques ne sont pas toutes contemporaines

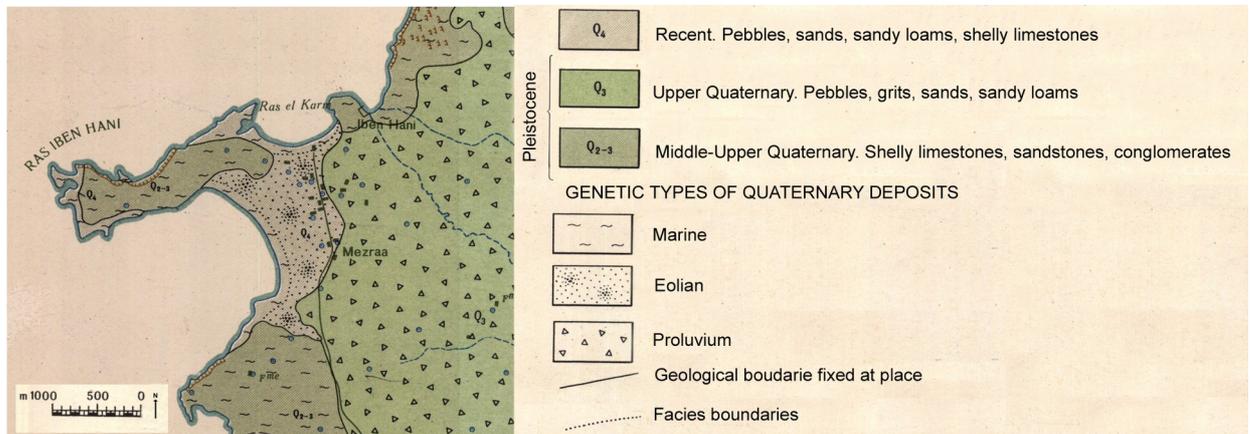


Figure 5 : Extrait de Geological map of Syria, échelle 1:50 000, 1962, Région de Ras Ibn Hani



Figure 6 : Chronologie des différents périodes qui constituent le Quaternaire (d'après Cubizolle, 2009)

L'extrait de la carte géologique (Figure 5) montre que trois ensembles différents ressortent nettement.

D'une part, des sédiments deltaïques datant du Pleistocène récent constituent la formation géologique la plus orientale sur la carte.

Les formations rocheuses situées à l'extrémité occidentale de la presqu'île, ainsi que le long du littoral au nord et au sud de cette presqu'île sont formés par des sédiments d'origine marine qui sont plus anciens puisqu'ils datent du Pleistocène moyen.

La partie orientale de la presqu'île, enserrée entre ces deux formations géologiques, est formée par des sédiments holocène avec une origine marine en bordure littorale et éolienne au centre.

Cette carte montre que les processus à l'origine du dépôt des sédiments ne sont pas semblables sur toute la presqu'île. Elle met également en relief l'absence de contemporanéité entre les dépôts à l'origine de la presqu'île. Les sédiments qui affleurent dans la partie centrale de la presqu'île sont plus récents que les autres.

I.4.b. L'hypothèse de P. Sanlaville

• Contexte de publication de l'article

P. Sanlaville est géomorphologue et spécialiste du littoral libano-syrien. Il a publié en 1978 dans la revue *Syria* un article intitulé *Note sur la géomorphologie de la presqu'île d'Ibn Hani (Syrie)* dans lequel il fait un bilan des observations faites en septembre 1975, puis en juin et octobre 1976. Il s'agit des premières recherches géomorphologiques menées sur la presqu'île, et sur le littoral syrien. Ces recherches ont été publiées dans le cadre du premier rapport de fouilles concernant la région archéologique de Ras Ibn Hani.

• Observations faites sur le terrain

Géologie du substrat

Une observation géologique a montré que la partie occidentale de la presqu'île est rocheuse. Le substrat est anté-quadernaire. Il est composé de calcaire miocène (constitués il y a 5 Ma à 23 Ma) ou éocène (constitués il y a 33 Ma à 55 Ma) (cf Figure 7). Il est recouvert d'un calcaire grésodétritique déposé vraisemblablement au cours de « l'avant-dernier Interglaciaire » (-350 000 à -300 000) appelé Mindel-Riss.

L'élévation artificielle due pour l'essentiel aux vestiges des installations humaines sur le tell culmine à 9,40 mètres au-dessus du niveau de la mer (tell archéologique). A l'est du tell archéologique, ce calcaire disparaît sous une couche de sable épaisse, suivant une ligne SW-NE (cf Figure 7).

Présence de hautes dunes de sable isolant une zone déprimée humide

Deux bourrelets sableux bordaient la baie méridionale et la baie septentrionale (cf Figure 7). La dune située au nord, récemment détruite du fait de travaux de construction avait une altitude de 9 m. Les dunes étaient apparemment séparées par une légère dépression, humide en hiver.

Des mûles et une chaussée marqués par la corrosion

Des mûles et une chaussée ont été retrouvés fossilisés sous le sable de la baie méridionale (cf Figure 7). Ces constructions portent des marques d'érosion biochimique (façonnement d'un trottoir et développement de lapiés) à une altitude supérieure au niveau marin actuel. Des organismes marins (algues calcaires, vermetes) ont été retrouvés, ils liaient les blocs par un ciment biologique. Ceci permet à P. Sanlaville d'affirmer que ces structures ont connu une phase d'immersion après leur construction.

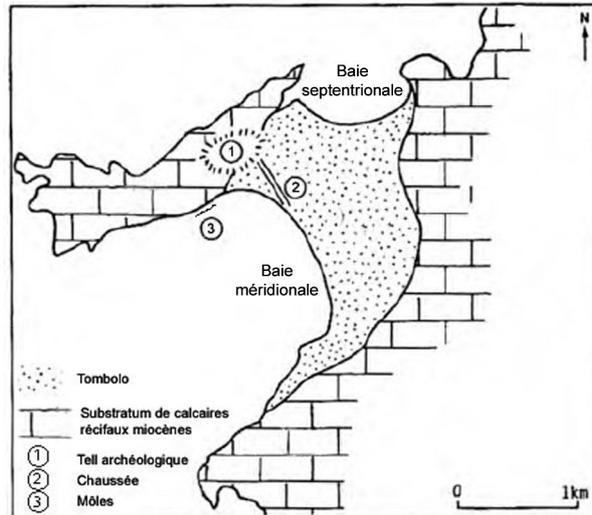


Figure 7 : Géologie de la presqu'île de Ras Ibn Hani et emplacement des vestiges archéologiques (Dalongeville *et al.*, 1993 ; modifiée par M. Leconte)

• **Hypothèses de reconstitution des étapes de formation de la presqu'île**

Les observations faites sur le terrain ont permis à P. Sanlaville de mettre en évidence la marque de deux niveaux marins différents du niveau marin actuel. Il a repéré des traces indiquant un niveau marin situé à +0,80 m au-dessus du niveau actuel de la mer et d'autres traces indiquant un niveau marin situé à +1,50 m au-dessus du niveau actuel.

La partie centrale de la presqu'île, constituée de sable, est une formation géologique plus récente que la partie rocheuse à l'ouest de la presqu'île. Le bloc rocheux s'est constitué il y a plus de 5 millions d'années. Cette observation confirme les informations fournies par la carte géologique (cf Figure 5) et permet à P. Sanlaville de supposer que l'extrémité rocheuse était séparée du littoral par un bras de mer et avait la forme d'une île.

Le bras de mer a ensuite été colmaté par l'apport de sables marins coquilliers dont la provenance n'est pas connue. Le niveau de la mer s'est abaissé progressivement. Ces deux mouvements d'apport de sables et de baisse du niveau de l'eau combinés permettent à l'auteur d'expliquer la formations des dunes situées le long de la baie septentrionale et méridionale (cf Figure 7). Entre les deux dunes, une lagune était isolée. La lagune a été peu à peu comblée par le sable jusqu'à former la presqu'île actuelle (cf Figure 8).

Il n'est pas possible de donner une chronologie précise de ce mouvement toutefois, selon P. Sanlaville, il semblerait qu'il se soit produit à l'époque historique.

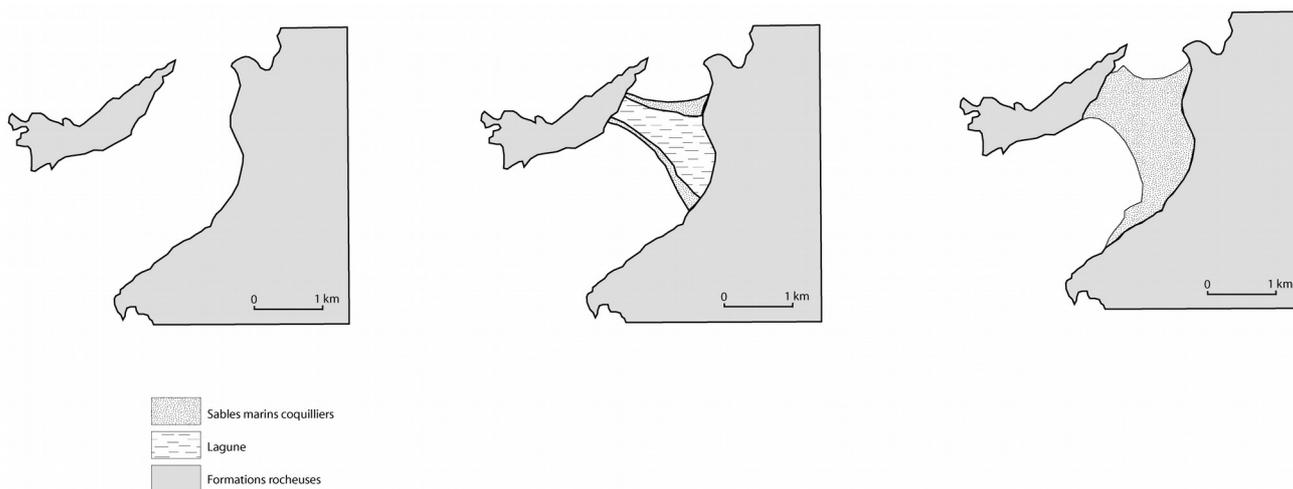


Figure 8 : Illustration schématique de l’hypothèse d’évolution de la presqu’île décrite dans l’article de P. Sanlaville (schéma réalisé par M. Leconte)

I.4.c. L’hypothèse de S. Daoud et H. Ghazi

• Contexte de publication de l’article

L’article, rédigé par deux géomorphologues syriens et publié en 2004-2005 dans les *Annales Archéologiques Arabes Syriennes*, expose les résultats d’une prospection géologique et géomorphologique réalisée sur la presqu’île ainsi que d’une observation en laboratoire de sédiments prélevés en trois points différents. Les auteurs font une étude géoarchéologique de la presqu’île. Ils se basent sur l’hypothèse d’une île rattachée récemment au littoral et tentent de comprendre comment s’est formée la partie orientale de la presqu’île.

Cet article est paru en arabe et c’est grâce à l’aide de la mission française et de personnes qui ne sont pourtant pas spécialistes du sujet abordé que nous avons pu bénéficier d’une version traduite en français. C’est cette version qui a été résumée, ce qui peut toutefois expliquer le manque de précision de certaines données.

• Observations faites sur le terrain

Prospection géologique

Une prospection géologique a permis aux auteurs de distinguer deux formations géologiques principales. Le substrat rocheux datant du Haut Pleistocène comprend la pointe occidentale de la presqu’île et une petite pointe au nord-est de la presqu’île. Une petite région au sud-ouest de la presqu’île ainsi que toute la partie orientale sont composées de sédiments holocènes (Figure 9 carte modifiée ; Annexe 1 carte initiale).

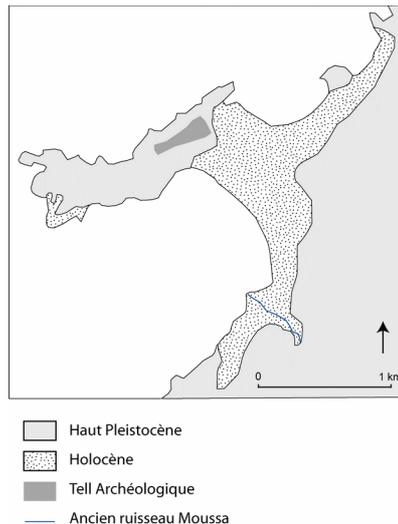


Figure 9 : Carte géologique de la région actuelle de Ras Ibn Hani (d'après Daoud et Ghazi, modifiée par M. Leconte)

Des observations géomorphologiques du littoral

Les auteurs ont observé les formations situées sur le littoral et ils ont repéré trois faciès littoraux différents.

D'une part des barres rocheuses calcaires larges de 1 à 4 mètres et hautes d'environ 2 mètres. Elle ont un aspect irrégulier (succession de reliefs et de creux).

A l'extrême nord-ouest de la presqu'île ainsi qu'au sud-ouest se trouve une surface rocheuse calcaire dont la forme est liée à l'action des marées et des tempêtes.

Une couverture sableuse se trouve le long du littoral de la baie septentrionale et de la baie méridionale.

Une dénivellation à l'est de la presqu'île

A l'est de la presqu'île les auteurs ont repéré une plaine plus basse d'environ un mètre. Il semble y avoir une discontinuité morphologique qui isole cet espace au milieu du substrat rocheux Pléistocène. Ils ont délimité cette plaine grâce à la disparition du substrat rocheux.

L'observation au microscope des sédiments prélevés dans cette plaine ont permis d'identifier un mélange de conglomérats dont le diamètre varie entre 1 et 1,5 cm, pour la mise en mouvement desquels une énergie élevée est nécessaire et de sédiments fins qui se déposent dans un milieu à faible énergie.

• Bilan des observations faites sur le terrain

L'ensemble des observations ainsi que l'analyse d'échantillons de sédiments ont permis aux auteurs de démontrer l'existence d'une zone semblant correspondre à une formation

sédimentaire récente, qui était un bassin peu profond séparant l'extrémité rocheuse à l'ouest de la presqu'île du littoral à l'est. Les auteurs émettent l'hypothèse que les sédiments qui ont comblé cette zone ont été apportés par le ruisseau de Moussa, aujourd'hui disparu (cf Figure 9).

La présence de ce bassin, les observations géomorphologiques faites sur le littoral ainsi que la prospection dans des puits situés à l'ouest et à l'est du bassin leur ont permis d'émettre une hypothèse sur l'ancien tracé de la ligne de rivage (Figure 10 carte modifiée ; Annexe 1 carte initiale).

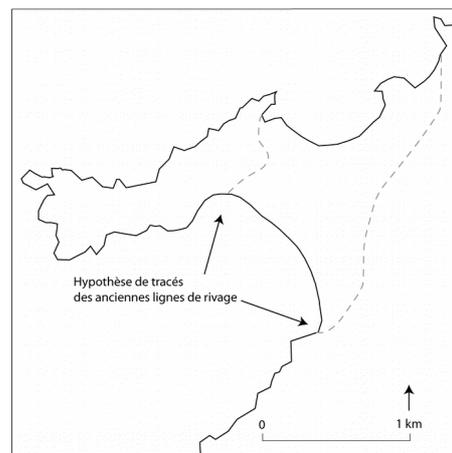


Figure 10 : Hypothèse de tracé des lignes de rivage présentée dans l'article de Daoud et Ghazi (carte modifiée par M . Leconte)

• **Hypothèses de reconstitution des étapes de formation de la presqu'île**

L'ensemble de ces observations a permis aux auteurs de faire une proposition de reconstitution géoarchéologique de la presqu'île. Les auteurs se basent sur l'hypothèse qu'un bras de mer séparait l'extrémité rocheuse à l'ouest de la presqu'île et le littoral à l'est.

Lorsque le niveau marin a baissé, une lagune isolée s'est mise en place à l'est de la presqu'île et l'île rocheuse était alors sûrement reliée au littoral en été. Ensuite, l'île a été rattachée complètement au littoral jusqu'à former un cap.

Les auteurs décrivent ensuite une nouvelle traversée par la mer de la partie orientale de la presqu'île sous forme d'un chenal orienté NE-SW. Ce phénomène s'est peut être produit à l'époque romaine, entre la fin du 1^{er} et le début du 4^e siècle. C'est au 1^{er} et 2^e siècles que l'immersion aurait été maximale.

Les auteurs envisagent ensuite une phase de baisse du niveau marin et un dépôt de sédiments éoliens composés de sables fins à l'origine des dunes parallèles à la baie septentrionale.

Ainsi, les auteurs démontrent que la partie orientale de la presqu'île a connu une alternance de phases d'immersion et d'émersion. Après avoir confronté leurs résultats avec les découvertes archéologiques, ils montrent que l'île rocheuse était déjà rattachée au littoral à l'époque hellénistique. Avant et après cette période, jusqu'à aujourd'hui, la partie orientale de la presqu'île était immergée.

I.4.d. La formation d'un tombolo entre l'île et le continent

• Définition d'un tombolo

Dans les deux études évoquées ci-dessus, l'idée qui revient est que la partie orientale de la presqu'île constitue un tombolo.

Un tombolo est une avancée de sable ou de galets qui joint une île à la côte adjacente jusqu'à former une presqu'île. Il s'agit donc de la partie située entre l'île et le littoral (Guilcher, 1954). Les tombolos se développent là où l'eau est peu profonde et où suffisamment d'apports sédimentaires, couplés avec l'action des vagues et du vent favorisent le développement d'une plage (Marriner, Goiran, Morhange, 2008).

• Les étapes de formation d'un tombolo

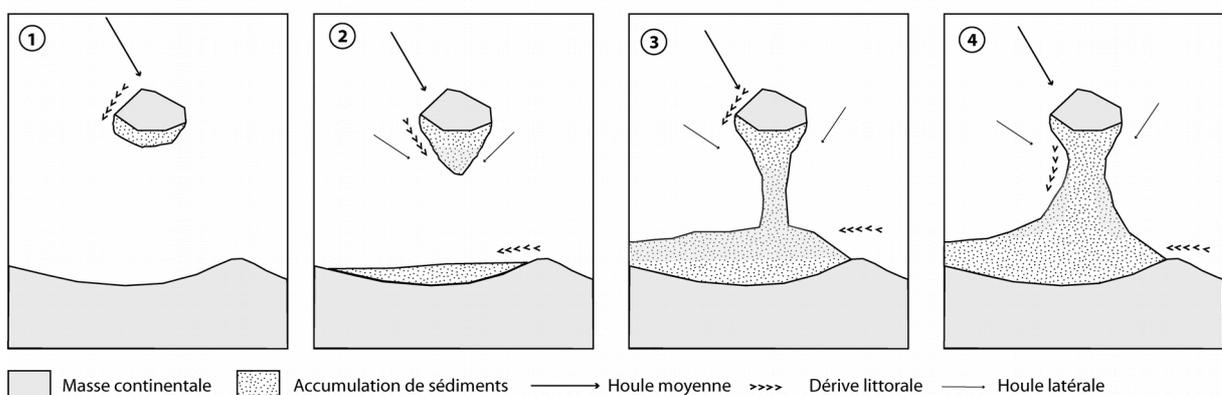


Figure 11 : Les étapes de formation d'un tombolo par diffraction de la houle (d'après J.-P. Pinot, Encyclopedia Universalis)

Il est possible de rendre compte de l'édification des tombolos par la réfraction des vagues derrière l'île si les isobathes ont un tracé adéquat. Les ondes changent de direction, elles pénètrent dans une zone abritée et s'amortissent rapidement. Ou bien par leur diffraction de chaque côté de l'île qui provoque le dépôt de matériaux au point de rencontre des deux trains d'ondes diffractées et amorties (Guilcher, 1954).

La houle moyenne correspond à la houle de part et d'autre de laquelle les forces obliques s'équilibrent. Les sédiments sont déposés par des houles obliques par rapport à la direction de la propagation de la houle moyenne mais ils s'accumulent suivant la direction de la houle moyenne (cf Figure 11).

Lorsque l'accumulation des sédiments s'allonge au point de rejoindre le rivage, la dérive littorale tend à combler le rentrant formé au point de raccordement et à faire grossir le tombolo (cf Figure 11 images 3 et 4). La partie la plus épaisse du tombolo formée par la dérive littorale est celle qui est la plus récemment constituée (J.-P. Pinot, Encyclopedia Universalis).

La dérive littorale (Figure 12) est le transport des particules sédimentaires le long du littoral essentiellement sous l'action d'une houle arrivant obliquement sur le rivage (Foucault, Raoult, 2005).

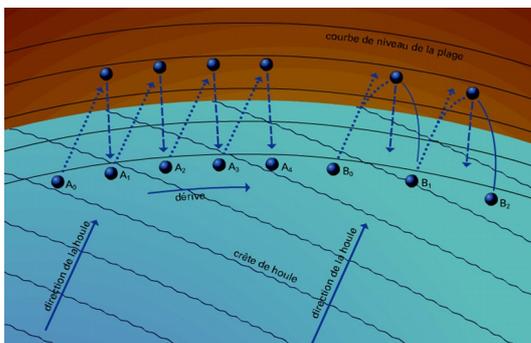


Figure 12 : Dérive littorale (Encyclopedia Universalis)

II. Analyse stratigraphique de la carotte RIH III

II.1. L'intérêt du carottage pour étudier les sédiments

II.1.a. Extraire des archives sédimentaires

L'étude de coupes stratigraphiques et l'extraction de sédiments par carottage sont deux méthodes pour obtenir des informations sédimentaires.

La présence de constructions modernes, de routes et des vestiges archéologiques empêchent de creuser dans la presqu'île pour réaliser des coupes et y lire la stratigraphie. Le carottage est la méthode la plus appropriée pour obtenir une succession de dépôts sédimentaires sur plusieurs km de long car ce mode de prélèvement permet d'extraire des colonnes de sédiments ponctuelles sans que cela ne nécessite de grands travaux de

creusement. De plus, la proximité de la nappe ne permettrait pas de réaliser des sondages profonds.

II.1.b. Reconstituer des couches stratigraphiques homogènes

Une fois la carotte de sédiments extraite, l'objectif est de mettre en évidence des ensembles homogènes en fonction de plusieurs critères : couleur, granulométrie des sédiments, présence de restes végétaux ou animaux.

La carotte est divisée en différentes unités stratigraphiques qui serviront de base pour tenter de reconstituer les paléoenvironnements. Pour cela, chaque couche stratigraphique est associée à un milieu de sédimentation particulier, défini par des caractéristiques biologiques, végétales, climatiques etc. qui lui sont propres et qui permettent d'émettre des hypothèses sur l'environnement passé.

II.1.c. Un inconvénient principal : le manque de représentativité

En bordure du littoral comme en domaine continental il est possible que le sédiment ait été remanié. En l'occurrence ici il a pu l'être par la mer lors de variations relatives du niveau marin. Ces remaniements peuvent effacer certaines phases de dépôts sédimentaires. L'analyse des sédiments ne fournit donc pas forcément des archives exhaustives de toutes les périodes de sédimentation qui ont pu exister.

Une autre limite essentielle de cette méthode est la faible épaisseur du prélèvement. En effet, le carottier utilisé possède un diamètre de 5 cm seulement, ce qui peut rendre délicate la définition du périmètre au sein duquel peut s'appliquer l'interprétation des dépôts sédimentaires.

Une unité stratigraphique peut correspondre à une phase de sédimentation très étendue qui se retrouve dans d'autres carottages réalisés à proximité. Il est aussi possible que cette couche corresponde à un phénomène localisé, qui peut par exemple être dû à une accumulation ponctuelle, dont il est intéressant de connaître les causes, mais qui ne permet pas de comprendre la sédimentation de l'ensemble.

Pour obtenir une stratigraphie la plus complète possible, il est nécessaire de faire plusieurs carottages en plusieurs points et de comparer ensuite les séquences sédimentaires de chaque carottage.

II.2. Localisation du site du carottage RIH III

II.2.a. Présentation de la presqu'île

C'est l'un des principaux accidents du tracé de la côte syrienne. La presqu'île s'avance d'est en ouest sur 3 km dans la mer et sa largeur du nord au sud se situe entre 0,5 et 1 km.

Sa hauteur maximale par rapport à la mer à marée haute est de 9 m (Daoud et Ghazi, 2004-2005). La partie médiane correspondant à la zone sombre au nord du carottage RIH V sur la Figure 13, est plus élevée de 3 à 6 m et correspond au tell archéologique (Lagarce, 1978).

La bordure littorale de la presqu'île est constituée d'une pointe rocheuse calcaire avec une falaise déchiquetée au nord ainsi que de deux baies : une au nord qui est bien abritée des houles dominantes de l'ouest-sud-ouest et l'autre située au sud, plus vaste que la précédente, avec une plage de sable fin (Sanlaville, 1978).

La nappe phréatique n'est pas profonde car lorsqu'on creuse un puits à un niveau sensiblement égal à celui de la mer, on tombe sur de l'eau douce (Lagarce, 1978).

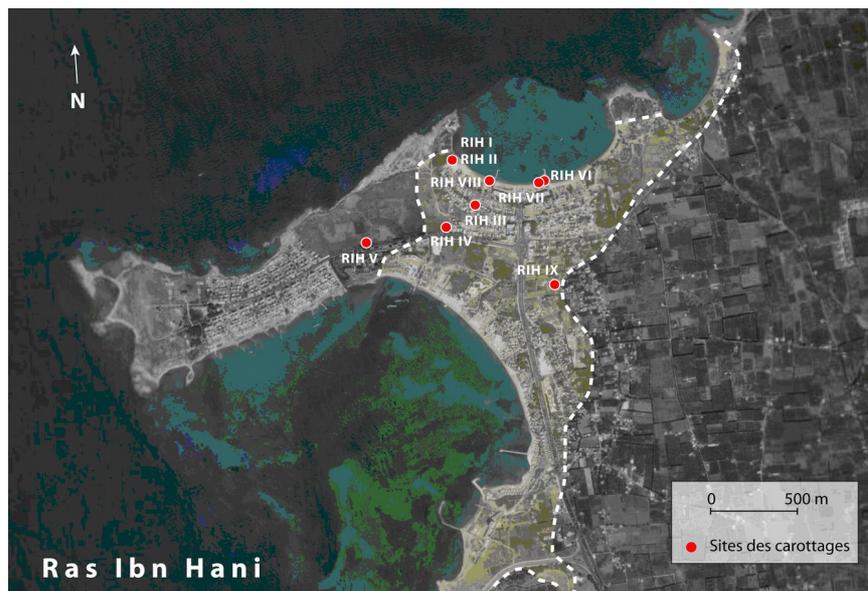


Figure 13 : Localisation des carottages effectués sur la presqu'île en mai 2009

II.2.b. Choix du carottage étudié

Une campagne de carottage a été réalisée en mai 2009 sur trois sites portuaires antiques du littoral syrien : Ras Ibn Hani, Tell Soukas et Nahr el-Sinn. Deux types de carottiers ont été utilisés : une tarière manuelle du CNRS (Lyon) et un carottier portatif de la DGAM.

Sur le tombolo de Ras Ibn Hani, huit carottages ont été réalisés par Bernard Geyer, Jean-Philippe Goiran, Nick Marriner et Xiaozhong Huang, accompagnés d'un représentant de la

DGAM. La majorité des carottages est située sur la partie orientale de la presqu'île, à proximité de la baie septentrionale, d'accès plus aisé. Leur étude permettra de mieux comprendre comment s'est formé le tombolo (cf Figure 13).

La stratigraphie observée dans les carottes juste après l'extraction a permis d'identifier quatre étapes successives, avec une chronologie indicative, basée sur une comparaison avec l'évolution des sites côtiers du Liban (Marriner, 2009) :

- A la base, une unité argileuse marron caractérise un environnement marécageux (estimée vers 8000 BP ; remontée du niveau des mers au Post-glaciaire).

- Des sédiments vaso-argileux se déposent. Les coquillages observés indiquent qu'il s'agit d'une lagune (estimée vers 7000-6000 BP)

- Une unité composée de sables marins grossiers se met en place, il peut s'agir de la base sédimentaire du tombolo (estimées vers 5000-4000 BP).

- Dans la partie sommitale s'accumulent des sables dunaires déposés par les vents, le tombolo passe d'un stade immergé à un stade émergé (estimée après 2500 BP).

Les pointillés sur l'image satellite figurent les traits de côte supposés avant l'accrétion du tombolo. Les carottes RIH IV, RIH V et RIH IX ont été prélevées dans le but de préciser l'extension occidentale et orientale du tombolo. Les carottages RIH IV et RIH IX est actuellement étudié par Nick Marriner au Cerege.

Dans ce mémoire, la carotte RIH III sera étudiée. Elle est localisée dans la partie centrale du tombolo, près de la baie septentrionale, à la longitude 35°35'25.34"N et à la latitude 35°44'30.56"E. Le prélèvement s'est arrêté à une profondeur de 7 m. Pour permettre le transport du sédiment, la carotte a été découpée en plusieurs échantillons en fonction de la couleur et de la texture observées sur le site. Les échantillons ont été rapportés de Syrie dans 71 sachets d'une vingtaine de grammes.

II.3. Objectifs de l'étude d'un carottage de sédiments

II.3.a. Connaitre le mode de transport des sédiments et les condition de leur dépôt

Le sédiment est un ensemble en grande partie constitué par un dépôt de particules issues de l'altération des roches ou de la précipitation d'éléments dissous. Toutefois, au moment du

dépôt, des morceaux de coquilles marine, des coquillages ou des restes végétaux peuvent être présents et sédimenter en même temps que les particules.

Les particules peuvent avoir été transportées par l'eau ou par le vent. La sédimentation définit l'ensemble des processus qui permettent la transition entre le transport et le dépôt des particules.

Il existe plusieurs méthodes pour définir la sédimentation. Parmi elles, on peut citer la morphoscopie (examen de la forme) et l'exoscopie (examen de la surface), basées sur l'observation des grains de quartz, le micromorphologie (observation de l'agencement des grains) ou bien l'analyse granulométrique, qui consiste à mesurer la taille des particules.

II.3.b. Isoler les différents indicateurs présents dans les sédiments

Le carottage permet d'extraire une colonne de sédiment. Ce sédiment contient beaucoup de marqueurs environnementaux. La première étape consiste à isoler les différents marqueurs en fonction de leur nature.

Les carapaces microscopiques d'ostracodes ou de foraminifères par exemple ainsi que toutes les coquilles de coquillages peuvent permettre d'identifier des espèces animales.

Les restes végétaux constitués des grains de pollen ou de graines permettent d'identifier des espèces végétales.

Il est également possible de chercher à déterminer la lithologie des particules minérales (la nature de la roche qui les compose), de faire une analyse micromorphologique pour regarder leur agencement, de quantifier l'humidité interstitielle pour connaître la porosité, ou encore de mesurer leur taille.

II.3.c. Reconstituer et dater les milieux de sédimentation

Chaque espèce animale et végétale vit dans un biotope caractéristique. Après avoir observé le degré d'usure de ces restes animaux ou végétaux (coquilles, graines etc.) pour s'assurer que les espèces ont bien sédimenté dans leur milieu de vie, leur identification permet de connaître leur biotope et d'obtenir des indices sur la nature du milieu.

Il existe deux types de datation utilisées dans l'étude des paléoenvironnements. La datation relative permet de dater une unité stratigraphique par rapport à une autre. En règle générale, une unité stratigraphique située vers la partie sommitale du carottage est plus récente qu'une unité stratigraphique située en profondeur.

La datation absolue est basée sur le matériel archéologique, les vestiges architecturaux et sur des analyses en laboratoire. La plus couramment utilisée consiste à mesurer le carbone 14 présent dans les organismes vivants (une coquille marine, un reste végétal, un os etc.).

La datation pose plusieurs questions : La succession des unités stratigraphiques reflète-t-elle l'ordre réel dans lequel elles ont sédimenté ? Toutes les phases de sédimentation sont-elles représentées ? Les éléments utilisés pour la datation carbone 14 proviennent-ils du milieu ou bien ont-ils été simplement déposés à un moment donné ? La datation d'un seul élément d'une couche stratigraphique (une coquille, un charbon par exemple) peut elle permettre de dater l'ensemble de la couche stratigraphique ?

II.4. Analyse granulométrique

II.4.a. Principes

L'analyse granulométrique permet de connaître le diamètre de l'ensemble des particules composant le carottage. Connaître le diamètre des particules est une étape qui permet ensuite, et c'est l'objectif principal de l'analyse granulométrique, d'étudier la répartition granulométrique (prépondérance de particules grossières, de particules fines ou répartition égale de toutes les tailles de diamètre).

Le mode de transport, la durée du transport et l'agent de transport diminuent la dimension des particules par des mécanismes d'abrasion et de fragmentation. Par exemple, l'abrasion dans l'air est beaucoup plus importante que dans l'eau (Chamley, 1987).

D'après la courbe de Hjulström (cf Annexe 2), la transition entre le transport et la sédimentation se produit lorsque la vitesse (exprimée en cm/seconde) diminue. La vitesse de transition entre le transport et le dépôt varient selon la taille des particules. L'analyse granulométrique peut donc renseigner sur les conditions de dépôt des particules.

II.4.b. Analyse texturale

• Distinction de trois classes granulométriques

Cette méthode ne permet pas de mesurer le diamètre de chacune des particules d'un échantillon, elle permet de connaître la répartition des particules dans trois classes granulométriques (aussi appelées fractions) définies au préalable en fonction de leur diamètre : la fraction limono-argileuse, la fraction sableuse et la fraction grossière.

Les dénominations des classes granulométriques varient selon les écoles tout comme certaines valeurs limites entre deux classes (Cubizolle, 2009).

Pour cette étude les valeurs limite des classes granulométriques choisies sont les suivantes : les limons-argiles comprennent les sédiments dont le diamètre est inférieur à 63 μm , les sables comprennent les sédiments dont le diamètre est compris entre 63 μm et 2 mm et la fraction grossière, aussi appelée « ballast », se compose de tous les sédiments dont le diamètre est supérieur à 2 mm.

• **Tamisage du sédiment**

Pour répartir les particules dans ces trois fractions, un tamisage humide a été réalisé. Le tamisage permet de trier les particules en fonction de leur axe médian, appelé axe b, qui correspond à la maille théorique des tamis.

La colonne de tamis utilisée était constituée de deux tamis superposés : un tamis de maille 63 μm et un tamis de maille 2 mm. Un échantillon sur deux a été tamisé.

Le tamisage constitue une étape importante de l'analyse des sédiments car c'est à ce moment qu'il est possible de remarquer la présence éventuelle de coquilles, de graines ou de charbons par exemple, qui ne sont pas toujours visibles quand le sédiment est sous forme de carotte.

• **Expression de la texture**

L'échantillon entier est pesé avant le tamisage puis chaque résidu de tamis, correspondant chacun à une classe granulométrique, est pesé. La texture exprime la proportion de sédiments grossiers, sableux et limono-argileux pour chaque échantillon.

Le tamisage humide ne permet pas de conserver la fraction argilo-limoneuse. La proportion de limons et argiles n'a donc pas été pesée, elle a été calculée par soustraction des deux autres fractions du poids total.

Pour la représentation graphique ce sont les fréquences cumulées qui ont été utilisées, afin de faciliter la lecture.

• Résultats

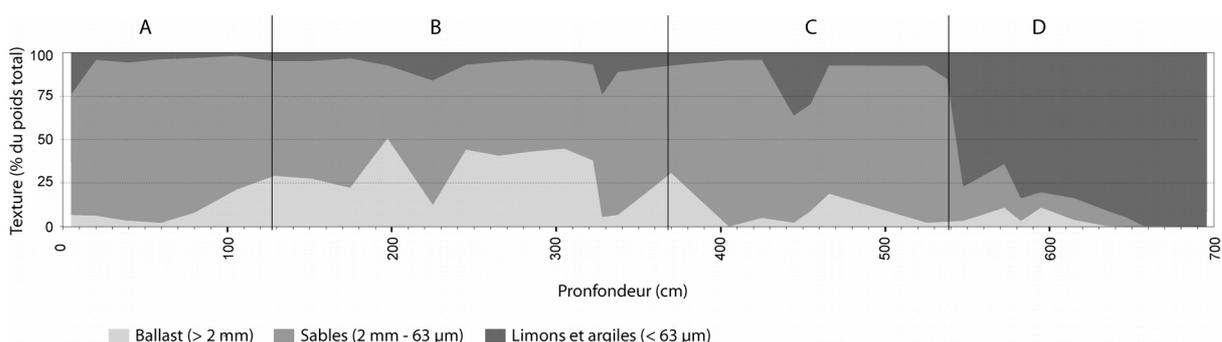


Figure 14 : Texture des sédiments en fonction de la profondeur

La Figure 14 montre les courbes de répartition des sédiments dans les trois fractions ballast, sables et limons-argiles.

Ce sont les sables qui prédominent (plus de 50 % de l'échantillon) dans les parties du graphique nommées A et C.

La fraction grossière est surtout présente entre -1 et -4 m (partie B). Elle n'est pas présente de manière continue : elle constitue près de 50 % de l'échantillon entre -2,3 m et -3,3 m mais à -2,2 m et à -3,3 m environ elle représente moins de 20 % de l'échantillon.

A partir de -5,5 m (partie D) la fraction limono-argileuse est largement majoritaire (plus de 70 % de l'échantillon) et l'absence totale de fraction grossière et sableuse à partir de -6,6 m est notable.

• Interprétation

La lecture de la courbe montre un changement granulométrique majeur à -5,5 m. Les sédiments situés au dessus sont hétérogènes, c'est-à-dire qu'ils sont caractérisés par une alternance de sables et de grossiers, alors qu'en dessous de 5,5 m ils deviennent homogènes et très fins.

Lorsque les sédiments sont transportés par un cours d'eau la vitesse de transport s'exprime en cm/s. D'après la courbe de Hjulström (cf Annexe 2), les sédiments grossiers se déposent quand la vitesse est supérieure à 10 cm/s, les sables se déposent à un vitesse de 1 à 5 cm/s environ, alors que les limons argiles se déposent si l'hydrodynamisme est nul (vitesse de 0 cm/s).

Ainsi, si les sédiments ont été transportés par un cours d'eau, le changement de granulométrie observé à -5,5 m peut refléter un changement d'hydrodynamisme. L'hydrodynamisme qui a permis le dépôt des sédiments fins et homogènes situés entre -5,5 m

et -7 m était très faible ou nul. Il peut s'agir d'un lac, d'un marais ou d'une lagune par exemple. En revanche, les sédiments hétérogènes situés au dessus de -5,5 m reflètent un hydrodynamisme plus important et peuvent avoir été déposés par un bras de mer ou un cours d'eau.

II.4.c. Granulométrie laser

• Principe de la mesure

La mesure effectuée par le granulomètre laser est basée sur le principe physique de diffusion d'un faisceau lumineux au contact d'un matériau, en l'occurrence une particule.

Lorsque le faisceau laser émis par la machine éclaire une particule de l'échantillon, une partie de ce rayon est diffusée. La diffusion se fait dans trois directions différentes puisque le rayon peut être réfléchi, diffracté, ou réfracté. Le granulomètre laser mesure la taille des particules en fonction de l'angle de diffraction capté, sachant que plus les particules sont grosses et plus l'angle de diffraction est grand.

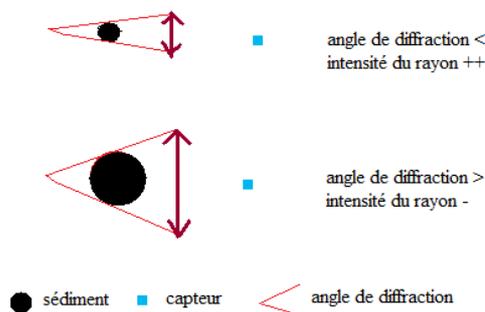


Figure 15 : Principe de la mesure réalisée par le granulomètre laser

Les principaux avantages de la mesure par granulométrie laser sont la grande précision de la mesure effectuée, le grand nombre d'échantillons qui peuvent être traités en un temps assez court et le peu de matériel nécessaire puisque quelques milligrammes suffisent.

Ce dernier avantage pose aussi le problème de la représentativité de la mesure puisqu'on généralise les résultats obtenus pour quelques grammes de sédiments à l'ensemble de l'échantillon qui pèse plusieurs dizaines de grammes. Pour réduire ce biais, le laboratoire de Bron est équipé d'un diviseur d'échantillons qui permet d'obtenir une division homogène des échantillons.

• Préparation et mesure des échantillons

- Principe

Le but des techniques préparatoires est d'isoler les particules détritiques insolubles (généralement des sédiments sableux formés de quartz) du ciment qui les entoure et qui est constitué de matières organiques, de minéraux argileux, de carbonates, de sels, de sulfures, d'hydrates et d'oxydes (Rivière, 1977).

- Tamisage et prélèvement d'échantillon

Le granulomètre laser ne mesure que les particules fines, c'est-à-dire celles dont le diamètre est inférieur à 2 mm, c'est pourquoi les échantillons doivent être tamisés avant d'être mesurés.

Pour cette étude c'est un tamis de maille 1,6 mm qui a été utilisé par précaution. Le tamis a des mailles carrées or les particules ne sont pas toutes des sphères, elle peuvent avoir une forme ovoïde de dimensions inégales. Le tamis dont les mailles mesurent 2 mm risquerait de laisser passer des particules d'une dimension supérieure à 2 mm.

Le résidu de tamis est mis à sécher puis il est pesé. Le poids total de l'échantillon ayant été noté au préalable, le pourcentage de particules fines est calculé par rapport au poids total de l'échantillon.

Ensuite, 3,5 g de ces particules fines ont été prélevées et utilisées pour la mesure. 16 échantillons ont été analysés.

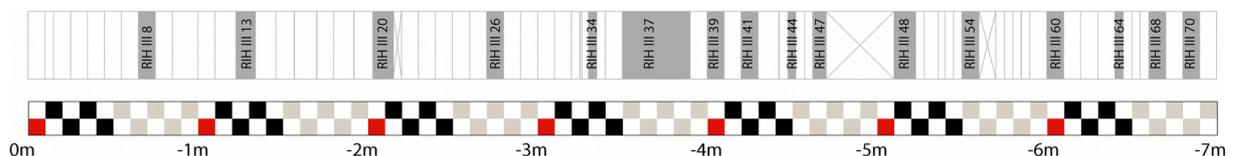


Figure 16 : Echantillons analysés par granulométrie laser

- Destruction de la matière organique

Les échantillons de 3,5 g ont ensuite subi une attaque à l'eau oxygénée à chaud sur un bain de sable à 60°C pour faire disparaître la matière organique.

- Défloculation

La troisième étape consiste à éliminer les ions calcium naturellement présents entre les particules. Ces ions ont tendance à précipiter et à faire un ciment liant les particules entre elles. On dit alors que les sédiments sont floculés c'est-à-dire agglomérés. La présence de ce ciment grossit la taille apparente des particules car ce sont des agrégats de particules qui sont mesurés.

Toutefois, les caractéristiques de transport et de dépôt dépendent essentiellement de la taille des particules et un agglomérat de particules fines peut avoir les mêmes caractéristiques de transport et de dépôt qu'une seule particule grossière.

Etant donné que les particules peuvent être floculées naturellement, mesurer la taille des particules défloculées ne correspond pas forcément à la taille réelle du matériel transporté puis déposé, ce qui peut peut-être poser problème lors de l'interprétation.

- Mesure des échantillons

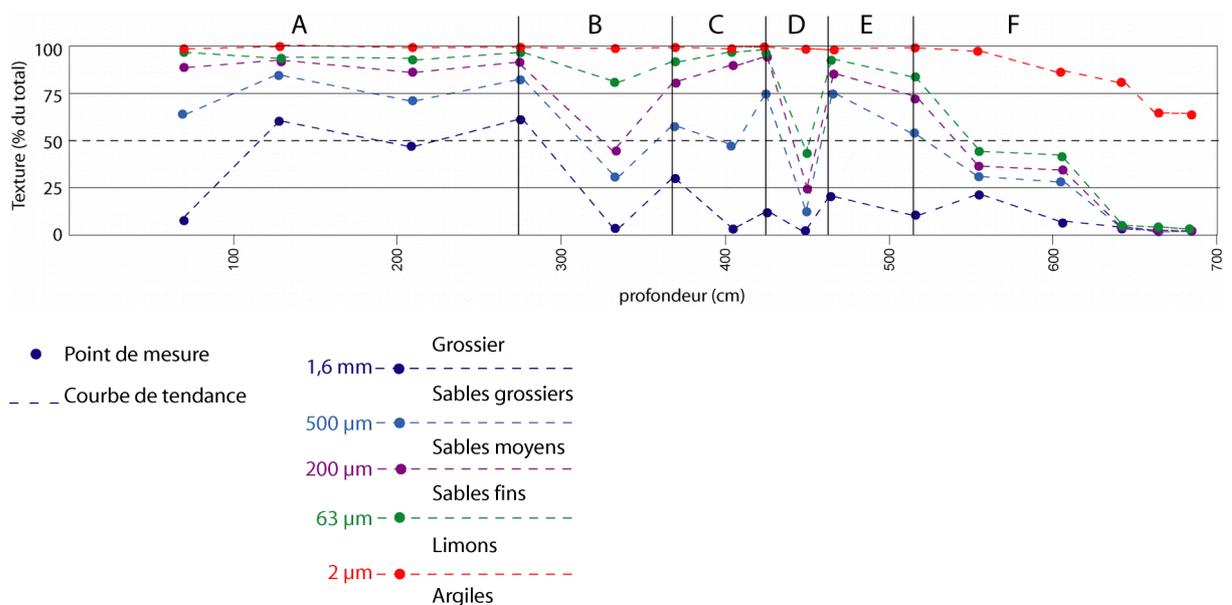
Le granulomètre laser mesure la taille de l'ensemble des particules de l'échantillon. Les résultats sont donnés sous forme d'un tableau excel. Il est ensuite possible de regrouper les particules en classes granulométriques et de faire des calculs de fréquence ou d'indices.

• Expression des résultats

- Distinction de plusieurs classes granulométriques

Comme pour la texture, les sédiments ont été regroupés en trois classes granulométriques : les sables (2 mm - 63 µm), les limons (63 µm - 2 µm) et les argiles (< 2 µm).

Pour affiner la répartition des sables, ceux-ci ont été divisés en trois sous classes granulométriques : les sables grossiers (2 mm - 500 µm), les sables moyens (500 µm - 200 µm) et les sables fins (200 µm - 63 µm).



La fraction supérieure à 1,6 mm a été estimée grâce aux données obtenues lors du tamisage. Etant donné que le granulomètre mesure malgré tout la taille des particules jusqu'à 2 mm et qu'il est possible que des particules d'un diamètre supérieur à 1,6 mm aient été mesurées, le point de mesure correspondant au diamètre 1,6 mm est approximatif, il a été placé sur la figure à titre indicatif.

Les échantillons étudiés par granulométrie laser sont trop peu nombreux pour permettre d'analyser l'évolution précise du diamètre du grain. La courbe reliant les points a donc été tracée en pointillés car elle n'indique qu'une tendance imprécise. Il est possible de remarquer que la répartition granulométrique est sensiblement la même que celle visible sur la courbe de texture précédente ().

La partie A correspond à une prépondérance de sédiments grossiers et de sables grossiers jusqu'à -2,8 m environ.

De -2,8 m à -5,3 m les sédiments sont plus hétérogènes et c'est la fraction sableuse qui prédomine. Les parties B et D correspondent à deux pics de sédiments fins (sables fins et limons). Les parties C et E sont caractérisées par une prépondérance des sables grossiers.

La fraction des limons-argiles de la peut être analysée plus précisément : les limons d'une part (diamètre compris entre 63 μm et 2 μm) et les argiles d'autre part (diamètre inférieur à 2 μm). Les dépôts argileux sont peu importants (toujours inférieurs à 50 % de l'échantillon) et ces dépôts sont tous situés de -5,5 m à -7m.

- *Calculs d'indicateurs*

Les résultats fournis par le granulomètre laser se présentent sous la forme d'un tableau de nombre contenant, pour chaque échantillon, les valeurs de tous les diamètres représentés ainsi que le nombre de particules d'un même diamètre.

La connaissance expérimentale des granulométries de sédiments actuels déposés dans des conditions définies peut permettre d'interpréter ces données granulométriques brutes à l'échelle de l'échantillon. Il est plus difficile de donner une interprétation générale pour toute une série stratigraphique ancienne (Rivière, 1977).

Les indices granulométriques calculés à partir des données brutes doivent aider à interpréter les résultats en terme de classement et de corrélations pour toute une série stratigraphique, dans le but de reconstituer les mécanismes de dépôt.

Le diamètre médian

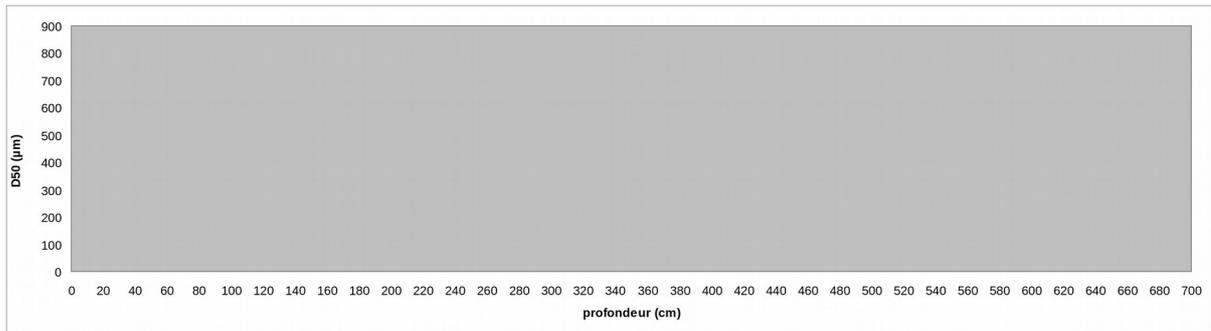


Figure 18 : Diamètre médian (D50) en fonction de la profondeur

Le diamètre médian est une valeur qui indique que 50 % des sédiments de l'échantillon ont un diamètre supérieur à cette valeur et que 50 % des sédiments de l'échantillon ont une valeur inférieure à cette valeur.

Le graphique permet de visualiser de manière plus explicite l'évolution décrite à partir de la Figure 17. Il met également en évidence les changements brutaux de répartition granulométrique. Notamment le pic de sédiments très fins (inférieurs 50 µm) à -4,5 m et de -5,5 m à -6,9 m.

Indice de classement de Trask (sorting index)

Le classement granulométrique permet de connaître l'importance des actions de tri au cours du transport et du dépôt (Chamley, 1987). Un bon classement signifie que la taille des particules est homogène (une plage ou un dépôt éolien par exemple) alors qu'un mauvais classement est caractérisé par un dépôt de particules de toutes tailles (c'est le cas des dépôts glaciaires par exemple).

L'indice de classement de Trask donne la dispersion des tailles par rapport à la moyenne de l'échantillon et indique si le classement est bon ou mauvais (Chamley, 1987). L'indice égale à 1 en cas de classement parfait. Plus l'indice est élevé et plus le classement est mauvais (Rivière, 1977).

Le calcul s'effectue à l'aide de la formule suivante : $\sqrt{(Q75/Q25)}$ où Q75 et Q25 sont les quartiles correspondant respectivement à 75 % et 25 %.

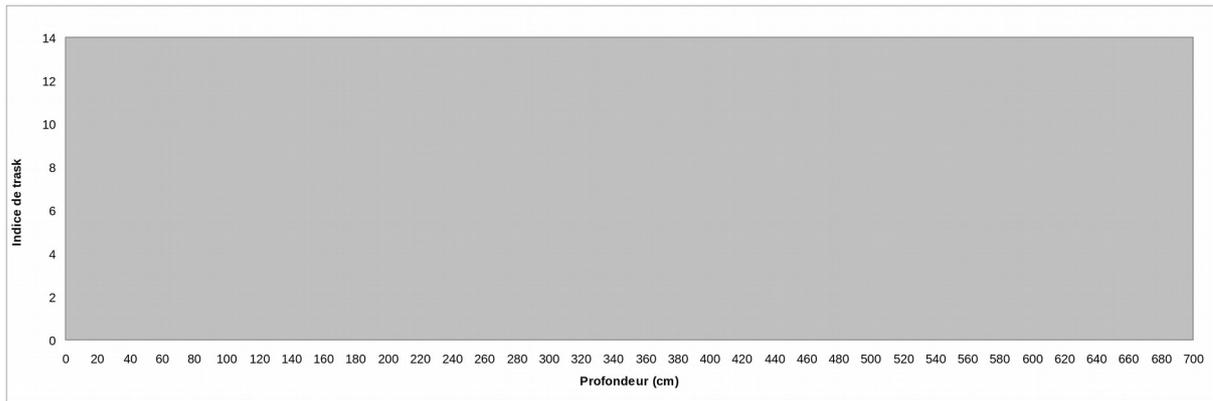


Figure 19 : Indice de classement de Trask en fonction de la profondeur

Le graphique montre que dans l'ensemble, le classement est plutôt bon puisque la valeur de l'indice varie entre 1,5 et 3,5.

A 3,3 m ainsi qu'à 4,5 m deux valeurs sont légèrement supérieures aux autres valeurs, ce qui signifie que le classement est moins bon.

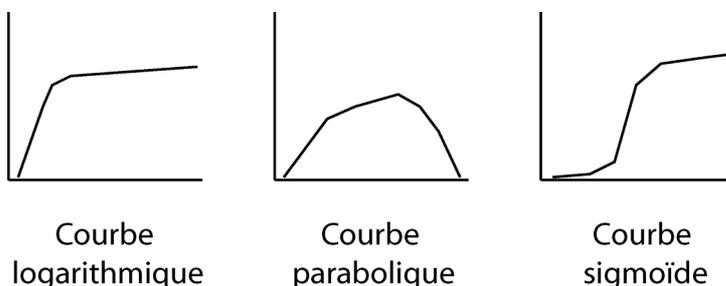
A 6 m un pic est identifiable avec une valeur de 12, ce qui signifie que le classement est mauvais et que c'est un dépôt de particules de tailles hétérogènes.

Fréquences

La fréquence exprime le pourcentage des différentes tailles de particules présentes dans l'échantillon. Les résultats sont présentés sur la Figure 20.

La courbe de fréquence simple relie tous les points de fréquence et permet de visualiser si la répartition granulométrique d'un échantillon est homogène ou hétérogène. Dans le cas d'une répartition homogène, la courbe permet d'identifier rapidement le mode, c'est-à-dire la taille de particule qui est la plus représentée dans l'échantillon.

La courbe des fréquences cumulées peut prendre trois formes théoriques :



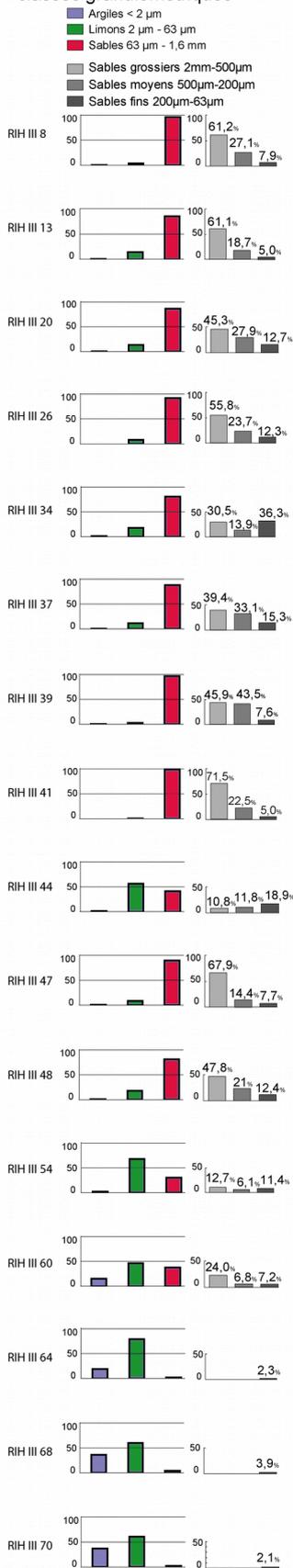
- La courbe logarithmique : plus la courbe est redressée et moins la proportion de fines est importante. Cette courbe indique que le matériel n'est pas trié, chaque fraction étant représentée dans des proportions similaires. Aucun processus particulier n'est venu influencer

le transport et le dépôt des particules. Ce type de courbe correspond donc à des dépôts qui se sont effectués en vrac (Cubizolle, 2009).

- La courbe parabolique suppose un ralentissement brutal, un dépôt rapide de la partie la plus grossière du matériel alors que les particules fines continuent leur chemin. Ce qui peut arriver quand la pente diminue rapidement (Cubizolle, 2009).

- La courbe sigmoïde implique une variation modeste de la capacité de transport qui amène l'eau ou le vent à abandonner une partie seulement des sédiments transportés. La section droite de la courbe matérialise les classes granulométriques déposées. Les fractions les plus fines ont continué leur chemin alors que les fractions les plus grossières ont été peu mobilisées faute d'énergie suffisante (Cubizolle, 2009).

Répartition des sédiments dans les différentes classes granulométriques



Répartition des sédiments en fonction de leur diamètre

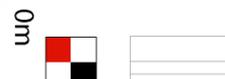
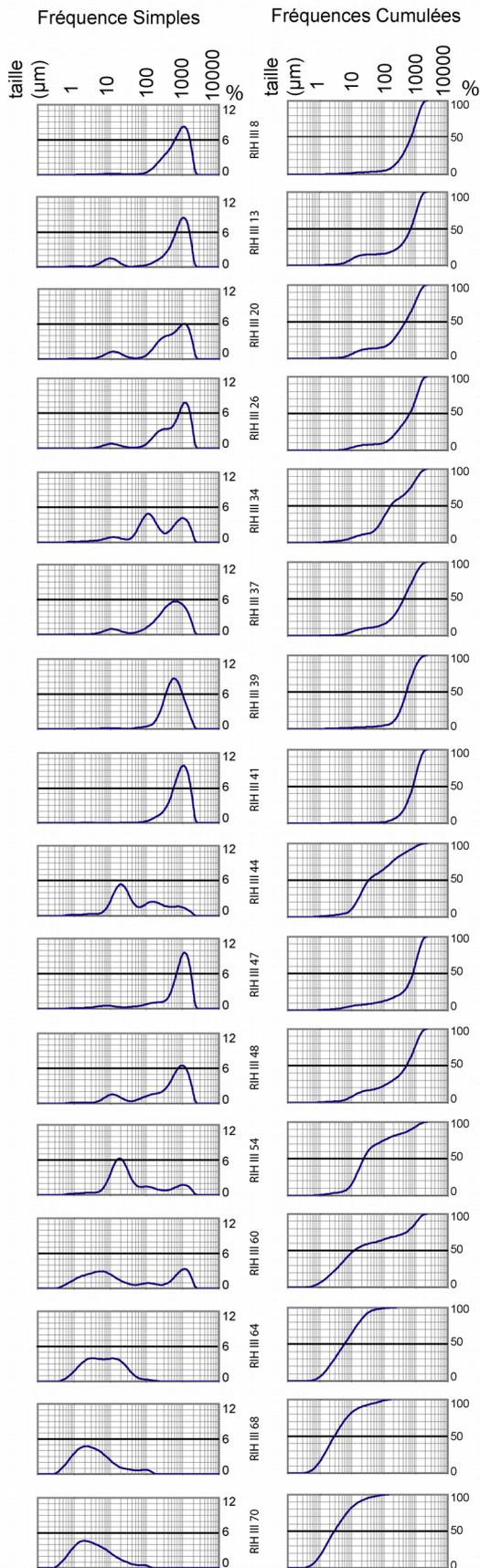


Figure 20 : Fréquences simples et cumulées (résultats des mesures par granulométrie laser)

- **Une interprétation limitée**

Les dépôts sont calibrés, transportés, accumulés en fonction des apports des rivières, des actions hydrodynamiques, de la viscosité, de la topographie de la côte, notamment de la pente du plateau (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994). Des différences de granulométrie peuvent indiquer qu'un ou plusieurs de ces paramètres diffère.

Tous les indicateurs granulométriques permettent donc de définir les échantillons les uns par rapport aux autres pour tenter de savoir si les dépôts sédimentaires se sont produits suite à un même processus ou bien s'il est possible de discriminer des différences granulométriques révélatrices de processus de dépôt différents.

Cependant, l'analyse granulométrique seule ne permet pas de répondre de manière certaine à la question du mode de dépôt des sédiments.

D'une part parce que connaître la taille des sédiments uniquement ne permet pas de discriminer un dépôt éolien d'un dépôt marin ou fluviatile, il faut pour cela réaliser des études complémentaires (par exemple étudier la morphoscopie des quartz).

Et d'autre part car chaque dépôt sédimentaire est déterminé par une association très complexe de paramètres (nature de la roche d'origine, distance parcourue par les sédiments, agent de transport etc.) que l'étude granulométrique des sédiments d'un seul carottage ne peut permettre de déterminer avec exactitude.

Quelques lois générales existent pour les sédiments actuels qui évoluent dans un contexte précis et connu. Par exemple, les sédiments déposés dans une lagune seront de la taille des argiles alors qu'une fleuve transporte surtout des éléments grossiers et sableux. En revanche, lorsque les sédiments sont anciens et qu'ils appartiennent à des milieux dont aucune trace n'est plus visible, il est très difficile d'interpréter les résultats granulométriques sans se tromper, car un même résultat peut avoir plusieurs interprétation. Par exemple un lagune d'eau de mer, un lac saumâtre ou un marais pourront avoir laissé la même empreinte granulométrique.

D'autres analyses (ostracodes, macrofaune et restes végétaux) ont donc été effectuées afin d'essayer d'interpréter les différences granulométriques observées en terme de milieu de dépôt. Elles sont présentées ci-dessous.

II.5. Etude des ostracodes (réalisée par P. Carbonel)

II.5.a. Les principes de la détermination

Les ostracodes sont des crustacés microscopiques vivant dans les eaux marines ou continentales. Ils vivent à l'interface eau-sédiment et sont souvent enfouis dans les premiers centimètres du sédiment. Ils peuvent également vivre sur des plantes ou à leur pied.

Ils ont le corps enfermé dans une carapace bivalve composée de deux valves articulées par une charnière. Grâce à sa composition en calcite magnésienne cette carapace peut se conserver dans les dépôts sédimentaires après la mort de l'animal.

La forme, l'ornementation externe de ces valves ainsi que les caractéristiques internes varient d'une espèce à l'autre. La détermination des espèces d'ostracodes est basée sur l'observation de ces critères (Cubizolle, 2009).

Chaque population d'ostracode a son propre biotope. Connaissant les différents paramètres biotiques et abiotiques (dynamisme, salinité, température de l'eau, niveau trophique etc.) nécessaires au développement et à la vie de chacune des espèces, il est possible d'interpréter la présence d'une espèce ou d'une association de plusieurs espèces en termes de milieu. Ceci constitue un indice pour reconstituer les paysages contemporains des sites archéologiques étudiés (Bodergat, 2002).

II.5.b. Les méthodes utilisées

• Extraction des ostracodes

La taille des ostracodes est variable. Les plus petits adultes peuvent mesurer moins de 500 μm alors que certains adultes mesurent plus de 3 mm. La majorité des ostracodes, adultes et juvéniles mélangés, a une dimension située dans la fourchette 125 μm - 1000 μm . En dessous de 125 μm ce sont surtout de petits fragments ou des juvéniles indéterminables qui sont trouvés.

Pour la présente étude, un tamisage des sédiments a été réalisé à sec pour observer uniquement la fraction comprise entre 125 μm et 500 μm .

Après tamisage, l'échantillon obtenu a été quarté afin d'obtenir une portion homogène de l'échantillon. Cette portion a été pesée avant l'extraction des ostracodes.

• Le comptage des ostracodes

Un ostracode vivant est bivalve. Pour faire un comptage exact il faudrait deux valves, soit une carapace, pour un individu.

Cependant, dans 90 % des cas, lorsque l'ostracode meurt, les deux valves se séparent et sont éloignées l'une de l'autre par divers agents. Il est donc peu probable qu'elles se retrouvent à proximité l'une de l'autre. Pour cette raison il est conventionnellement admis qu'une valve compte pour un individu.

Les fragments eux posent question. Ils peuvent être comptés chacun comme un individu dans le cas où la faune est pauvre. Lorsque la faune est riche, on peut essayer de faire correspondre un certain nombre de fragments à un individu, mais cette méthode n'est pas très fiable. On peut conventionnellement ajouter un pourcentage de 5 à 10 % à chaque espèce concernée par la présence de fragments. Dans la présente analyse, n'importe quel fragment déterminable est compté comme un individu car il est très improbable de trouver le fragment manquant du même individu.

Ceci explique qu'un comptage n'est pas un chiffre rigoureusement exact et qu'il est important de considérer un nombre d'individus suffisamment important pour en faire un comptage statistiquement valable. Par convention, il faut au minimum 33 individus.

• La densité faunique : indicateur du dynamisme et du niveau trophique du milieu

Le calcul de la densité faunique fait intervenir le nombre d'ostracodes prélevés, le poids du sédiment trié et le poids total de l'échantillon, y compris la fraction limono-argileuse.

Pour pouvoir comparer les différents échantillons entre eux on rapporte le nombre d'ostracodes à une unité de poids commune à tous les échantillons. La valeur de densité est souvent exprimée pour 10 grammes de sédiment.

Le nombre obtenu n'est pas une valeur exacte, c'est un ordre de grandeur qui permet de constater la concentration d'ostracodes. Plus la valeur de densité faunique est élevée et plus la concentration d'ostracodes est importante. La densité permet de rendre compte du dynamisme du milieu et de son niveau trophique (Carbonel, 1980).

Il est important de connaître la répartition des sédiments dans les différentes classes granulométrique (sables et limons) pour pouvoir bien interpréter les valeurs de la densité faunique.

Une fois la densité connue, il est nécessaire de regarder si le nombre d'espèces est important ou bien si la faune est monospécifique. Ce paramètre est également important pour interpréter une densité faunique car une forte concentration d'ostracodes appartenant à plusieurs espèces n'a pas la même signification paléoenvironnementale qu'une forte concentration d'ostracodes monospécifiques.

- **La diversité spécifique des espèces, expression de la stabilité du milieu**

Chaque population d'ostracodes a sa propre dynamique : abondance, cycle de vie des individus etc. Dans un milieu stable, la communauté benthique composée de l'ensemble des populations est organisée selon une certaine structure. Elle est régulée par la stabilité chimique du milieu (salinité, pH, niches écologiques).

Un dépôt de sédiment brutal (une turbidite ou un dépôt de tempête par exemple) peut provoquer un stress au sein de la communauté benthique qui va modifier sa structure. Certaines espèces vont disparaître, laissant un espace vide qui sera colonisé par des espèces opportunistes.

Les variations de salinité de l'eau ont également des conséquences sur la structure de la communauté benthique (Carbonel, 1984 ; Annexe 3 : figure de Remane & Schlieper) car peu d'espèces sont capables de réguler leur perméabilité cellulaire, donc leurs échanges avec l'extérieur. Lorsqu'il y a des variations de salinité, un grand nombre d'espèces disparaissent ce qui entraîne la prolifération des espèces (ou de l'unique espèce) capables de s'adapter.

La diversité spécifique est le nombre qui rend compte du nombre d'espèces contenues dans une population. Dans cette étude, étant donné que le nombre d'espèces représenté est faible, la diversité spécifique n'a pas été calculée et elle est rendue directement par le nombre d'espèce.

II.5.c. Résultats et interprétation

- **Les facteurs favorables à l'implantation des ostracodes**

Pour qu'une ostracofaune se développe de façon optimale, il lui faut de l'oxygène pour respirer, de la nourriture et une dynamique pas trop agressive. La présence de matière organique labile est souvent un paramètre favorable au développement des populations d'ostracodes. C'est pourquoi, et à condition que la ventilation y soit suffisante, la concentration d'ostracodes est plus importante dans les milieux limono-argileux que dans les sables, où la présence de matière organique est souvent moins importante.

L'agitation est un facteur limitant à l'implantation de beaucoup d'espèces, c'est également pour cette raison que les concentrations d'ostracodes sont souvent plus importantes dans les biotopes limono-argileux, plus calmes que les biotopes sableux.

La stabilité chimique du milieu favorise la biodiversité. Au contraire, les milieux à salinité variable abritent souvent des populations peu diversifiées voire monospécifiques.

• Répartition des espèces et des associations dans les échantillons RIH III

L'analyse a porté sur 31 échantillons du carottage RIH III, soit un échantillon sur deux. L'échantillon 1 correspond à la partie sommitale du carottage.

Les espèces d'ostracodes ont été regroupées en cinq communautés (cf Figure 21). La présence à la fois d'adultes et de juvéniles, d'entiers non usés et de fragments fait penser que les ostracodes ont sédimenté dans leur milieu de vie (Carbonel, 1980).

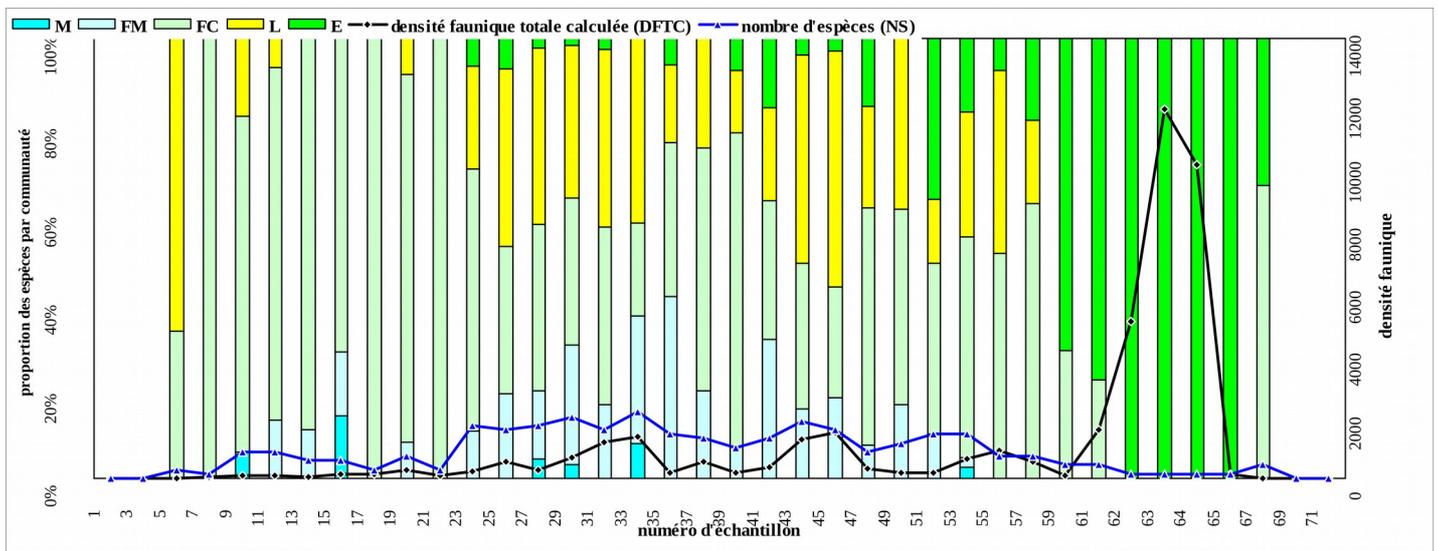


Figure 21 : Répartition des cinq communautés d'ostracodes en fonction de la profondeur

Les communautés sont décrites ci-dessous en partant de la plus éloignée de la côte, à celle qui se trouve la plus proche du littoral. Les communautés retrouvées dans le carottage RIH III recourent ce qui a été retrouvé dans d'autres sites de Méditerranée.

La communauté M correspond à un milieu marin franc. Elle est composée de quatre espèces vivant habituellement dans des zones de plateforme continentale située de 3 à 90 m de profondeur.

La communauté FM correspond à un milieu phytal marin. Elle est composée de neuf espèces vivant dans les herbiers infralittoraux de 3 à 30 m de profondeur.

La communauté FC correspond à un milieu phytal côtier. Elle est composée de cinq espèces vivant dans des herbiers immergés la plupart du temps mais avec des périodes d'émersions possibles.

La communauté L correspond à un milieu lagunaire ouvert. Elle est composée de trois espèces de lagunes côtières avec faible dessalure, c'est-à-dire une réduction de la salinité de l'eau de mer résultant soit d'un mélange d'une eau marine avec une eau continentale, soit de la pluie.

Et enfin, la communauté E correspond à un milieu laguno-estuarien composé d'une espèce vivant dans des eaux à forte fluctuation de la salinité, souvent en monospécifisme.

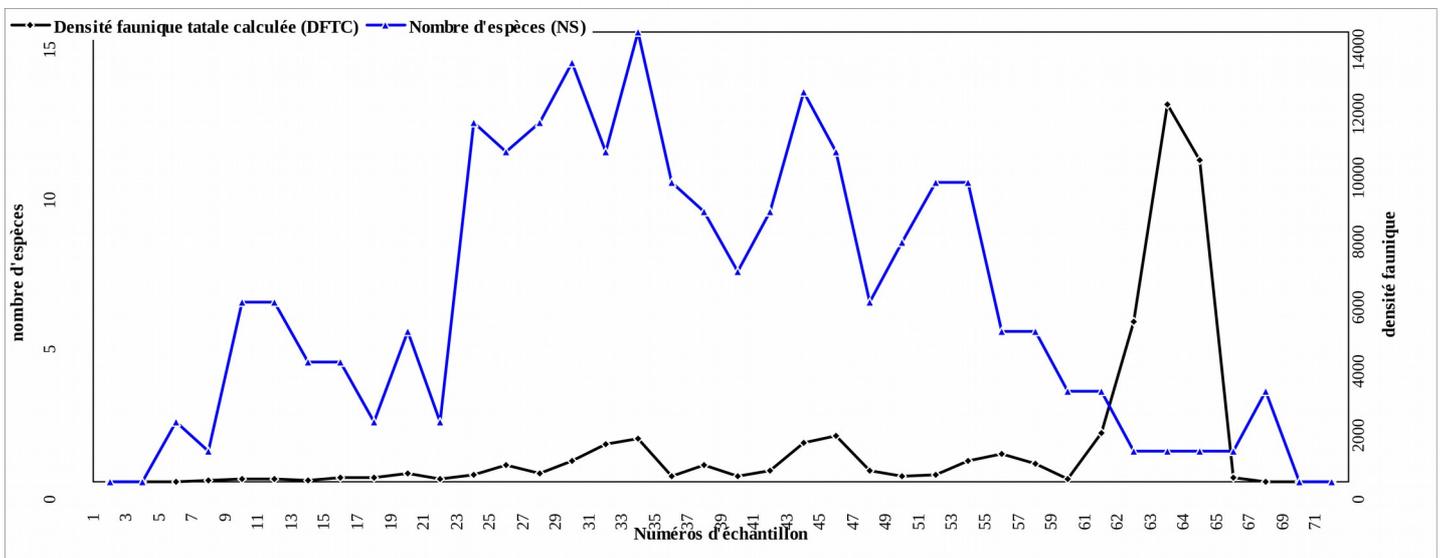


Figure 22 : Densité faunique et nombre d'espèces en fonction de la profondeur

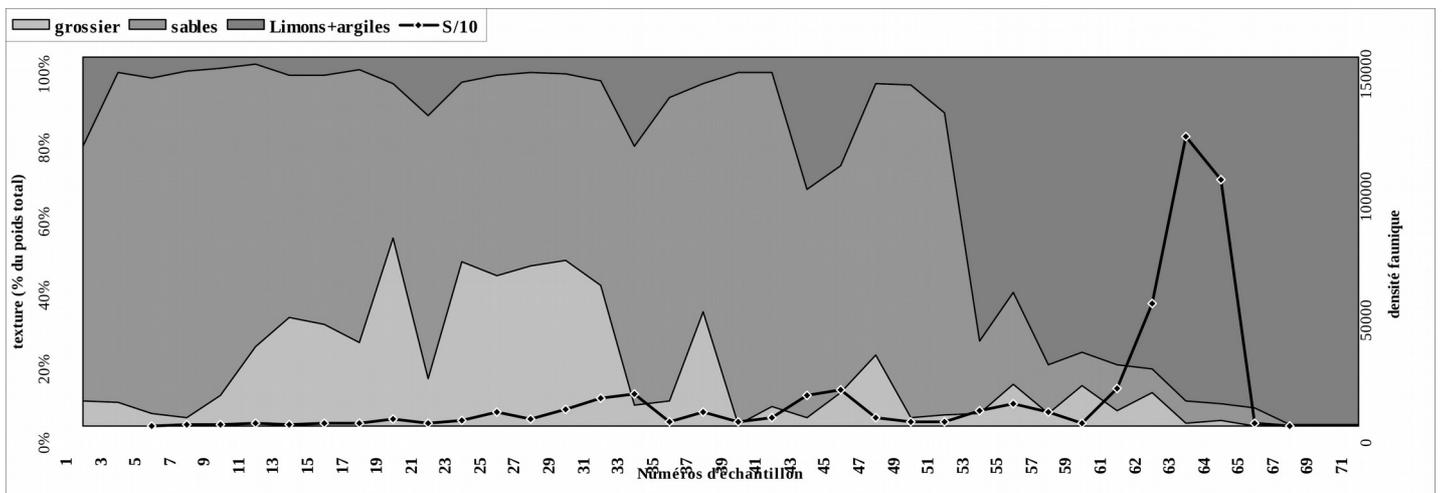


Figure 23 : Densité faunique et texture des sédiments en fonction de la profondeur

• **Interprétation**

L'observation de la répartition des espèces dans les communautés, confrontée avec le nombre d'espèces par échantillon et avec la densité faunique, permet d'identifier trois phases, en partant de la plus ancienne pour aller jusqu'à la plus récente :

1) éch. 67-59 : une lagune fermée

D'abord un milieu de lagune estuarienne à cyprideis quasiment monospécifique (1-3 espèces) avec une très forte densité.

La lagune est constituée d'eau de mer à salinité variable. L'eau ne vient pas d'un cours d'eau continental car on ne trouve pas d'espèces d'ostracodes d'eau douce.

La lagune semble sans communication avec la mer pour ce qui concerne les échantillons 63 et 65 puis à partir de l'échantillon 65 la lagune s'ouvre progressivement à la mer.

2) éch. 57-23 : une lagune ouverte

La diversité spécifique est beaucoup plus élevée. Le milieu est d'abord lagunaire puis le nombre d'espèces augmente (5 à 10 espèces). Le milieu devient de plus en plus côtier.

3) éch. 21 jusqu'au sommet : une zone côtière

Il s'agit d'une phase « marine côtière ». Quelques individus lagunaires sont présents mais de manière épisodique uniquement.

Ce niveau correspond à une chute de la diversité qui peut s'expliquer par un changement brutal du milieu de vie des ostracodes. Ce changement peut être naturel, il peut aussi être lié à une activité anthropique.

II.6. Analyse malacologique (réalisée par N. Marriner)

II.6.a. Principes et apports de l'analyse malacologique

Tout comme les ostracodes, chaque coquillage vit dans son propre biotope. Il est possible d'associer un milieu caractéristique à chaque espèce ou association d'espèces malacologiques. L'étude de l'usure des coquilles permet de garantir que les coquilles étudiées ont sédimenté dans leur milieu de vie et qu'elles n'ont pas été déposées a posteriori.

La distribution des organismes dépend de la porosité du substrat, c'est-à-dire du volume de vides entre les particules, qui détermine la bonne oxygénation du milieu et la circulation de l'eau et des organismes. La porosité est conditionnée par la taille des particules, leur morphologie (plates, arrondies, anguleuses etc.) et leur composition minéralogique.

Les organismes vivent dans des milieux bien oxygénés et où la circulation est assurée. Il est donc possible de faire un lien entre la répartition des organismes et la taille des particules. Dans les zones à hydrodynamique faible se déposent des sédiments colmatés, fins à l'intérieur desquels la circulation de l'eau et des animaux reste précaire alors qu'inversement, dans les zones à hydrodynamique élevée les sédiments sont grossiers, bien triés et avec une forte porosité (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

L'étude des mollusques peut apporter des renseignements sur l'épaisseur de la tranche d'eau, sur la présence de végétation, sur la durée des périodes d'exondation notamment.

II.6.b. La signification des différents étages en terme de milieu

• Les critères de définition des étages

Le système de classement des communautés marines benthiques (vivant sur ou dans le sol) le plus utilisé en Méditerranée est un étagement en fonction de facteurs tels que l'humectation et la lumière, qui sont directement liés à la profondeur, et d'autres facteurs comme l'hydrodynamique, la salinité, la nature du substrat et la température (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

• Les étages supralittoral et médiolittoral

Ces deux étages ont pour point commun une grande importance de l'émersion.

Les particules qui se trouvent à ces étages sont très mobiles et sont remaniées en permanence. Les facteurs qui vont déterminer l'intensité de leur remaniement sont l'altitude par rapport au niveau de la mer, l'exposition des vents dominants de même que leur force et leur fréquence (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Dans une zone fortement battue par le vent, les sédiments seront essentiellement des graviers alors qu'en zone calme et très abritée ce sont des vases qui pourront sédimenter (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Les plages de sable sont les structures sédimentaires dominantes de ces étages. Elles sont le résultat d'un classement granulométrique souvent très sélectif qui élimine les particules fines argileuses (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

L'étage supralittoral est la zone d'interface entre le milieu marin et le milieu terrestre où se produit le contact des faunes des deux domaines. L'étage médiolittoral correspond à la zone de marnage (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

• L'étage infralittoral

Biocénose des sables fins de haut niveau

Du haut de l'étage infralittoral jusqu'à environ 2,5 m à 3 m de profondeur, on trouve la biocénose des sables fins de haut niveau caractérisée par des sédiments souvent hétérogènes : surtout des sables fins, mais aussi une petite fraction grossière (coquilles mortes, petits graviers) (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Biocénose des sables fins bien calibrés

De 3m à 20m de profondeur se trouve la biocénose des sables fins bien calibrés granulométriquement. Elle est composée de sables fins uniquement car les coquilles mortes sont rejetées à la côte. L'hydrodynamisme est moins intense que dans les niveaux supérieurs (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Biocénose des sables grossiers et fins graviers sous influence des courants de fond

Jusqu'à 70 m de profondeur, on trouve la biocénose composée de sables grossiers, de petits graviers qui est dépourvue de fraction fine (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Biocénose des sables vaseux de mode calme

La biocénose des sables vaseux de mode calme se trouve dans les fonds colonisés par les végétaux. C'est la zone de transition entre les peuplements précédents et les peuplements purement marins (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

II.6.c. Résultats et interprétation

Les coquillages ont été extraits de la fraction grossière (> 2 mm) obtenue lors du tamisage humide effectué pour l'analyse texturale. La détermination du genre et des espèces a été réalisée par Nick Marriner au Cerege.

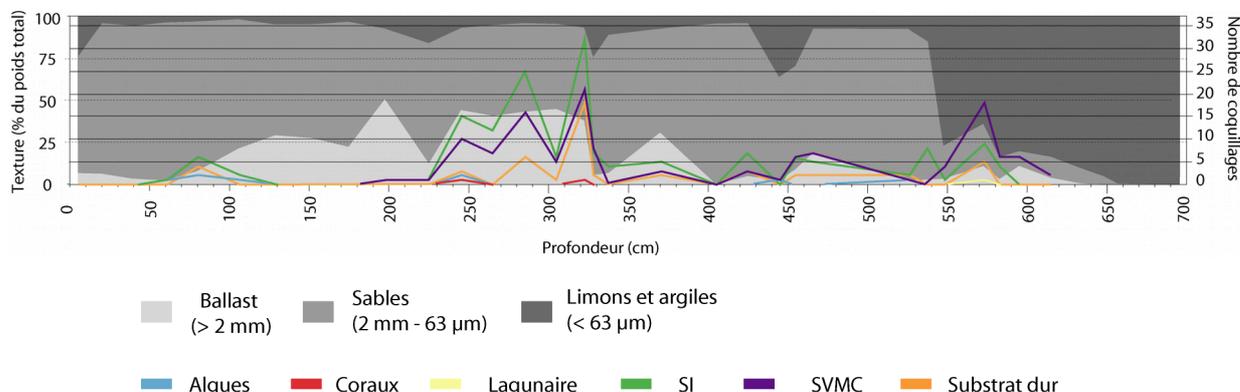


Figure 24 : Texture des sédiments et répartition du nombre de coquillages, répartis par biocénose, en fonction de la profondeur

Sur la figure ci-dessus (Figure 24) il est possible de voir que ce sont les coquillages des biocénoses des sables infralittoraux (SI) ainsi que des sables vaseux de mode calme (SVMC) qui prédominent. Ces deux biocénoses sont présentes à l'étage infralittoral. Les coquillages vivant sur substrat dur sont aussi présents en grande quantité.

Entre 0 et 2,2 m de profondeur, il n'y a quasiment pas de coquillages. Quelques coquillages des biocénoses des sables infralittoraux et des sables vaseux de mode calme ainsi que des algues ont été identifiés autour de 0,9 m.

Le graphique montre une forte concentration de coquillages entre 2,5 m et 3,2 m de profondeur avec deux pics importants : le premier à 2,9 m et le second à 3,1 m.

Les biocénoses les plus représentées sont la biocénose des sables infralittoraux (159 individus) et la biocénose des sables vaseux de mode calme (130 individus). La biocénose des sables fins de haut niveau regroupe 29 individus. Ces trois biocénoses correspondent à des profondeurs différentes mais elles sont toutes caractéristiques de l'étage médiolittoral, soit l'étage immergé en permanence, de 0 à -70 m environ.

II.7. Analyse des restes végétaux

II.7.a. Etude palynologique

Une analyse palynologique est actuellement réalisée par Xiaozhong Huang en Chine. L'objectif est d'étudier les pollen de fleurs qui se sont déposés dans les sédiments des lacs, marécages, tourbières où ils ont fossilisé. L'étude palynologique aide à connaître la composition végétale d'un paléoenvironnement (Riser, 1999).

Seule la paroi résistante des grains de pollen est préservée au cours de la fossilisation. Elle présente de nombreuses ornementsations et des caractéristiques de structure qui permettent d'attribuer le pollen fossile à la plante qui l'a produit (Riser, 1999).

II.7.b. Présence de graines



Figure 26 : Graines de l'échantillon RIH III 63

Dans l'échantillon 63 des graines ont été trouvées. Elles ont été déterminées par George Willcox membre de l'équipe archéorient. Morphologiquement ces graines sont proches de celles de *Ceratophyllum submersum* qui est une plante aquatique dont les tiges atteignent plusieurs mètres de haut et qui tolère l'eau saumâtre.

Les graines sont de couleur noire mais elles ne sont pas carbonisées. Elles ont été conservées par imbibition, c'est-à-dire en milieu humide et anaérobie, sans oxygène. Le maintien d'une saturation en eau empêche la prolifération des micro-organismes hétérotrophes, limitant ainsi la destruction des macrorestes. Ce mode de fossilisation conserve aux semences leur aspect d'origine car il n'y a ni décomposition ni oxydation.

Dans les échantillons 62, 64 et 65 des graines qui semblent similaires ont été prélevées. Elles n'ont pas été déterminées.

II.7.c. Réaction à l'attaque à l'eau oxygénée

Les échantillons 60 et 64 ont été les plus réactifs lors de l'attaque à l'eau oxygénée qui précède la granulométrie laser. L'attaque à l'eau oxygénée permettant de détruire la matière organique présente dans les sédiments, la réaction signifie que les échantillons contiennent de la matière organique. De plus, lors de l'extraction des ostracodes, des restes végétaux microscopiques ont été observés dans ces échantillons.

II.7.d. Présence de ruppia

Dans l'échantillon 65, des ruppias ont été repérés. Ce sont des végétaux phanérogames. Les sédiments sont colonisés par des végétaux phanérogames et/ou des algues dans les eaux superficielles, dès que l'hydrodynamique s'atténue (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

Les ruppias sont des végétaux d'eaux douces ou faiblement salées qui se développent dans les sédiments sablo-vaseux présents dans les étangs littoraux et dans les zones estuariennes (Bellan-Santini, Lacaze, Poizat, 1994).

II.7.e. Interprétation

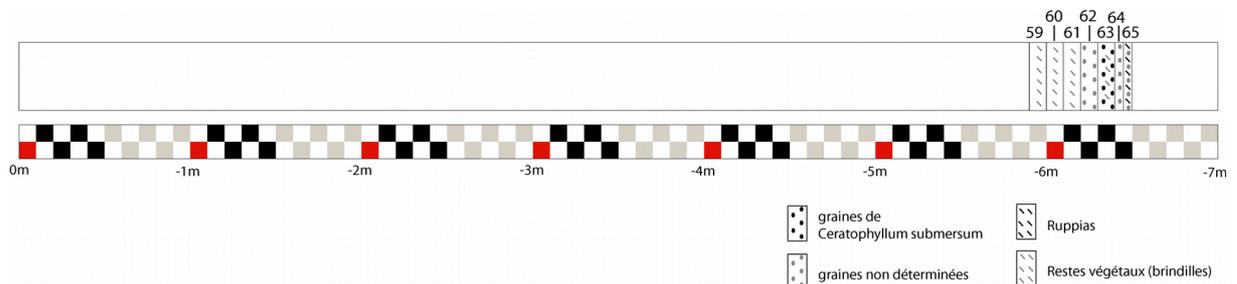


Figure 27 : Résumé des traces végétales présentes dans les échantillons 59 à 65 du carottage RIH III

L'ensemble des restes végétaux retrouvés se trouvent entre 5,9 m et 6,5 m de profondeur. Ces restes végétaux peuvent faire penser qu'ils ont sédimenté dans un milieu humide, qu'il y a eu présence d'une eau saumâtre et que l'hydrodynamisme était faible. Ce sont des caractéristiques qui rappellent celles déterminant une lagune ou un étang par exemple.

II.8. Autres éléments repérés

II.8.a. Couleur des échantillons

La couleur des échantillons a été observée à l'aide du code Munsell de Cailleux. La figure suivante montre le résultat des observations ainsi que le découpage du carottage en fonction de la couleur.

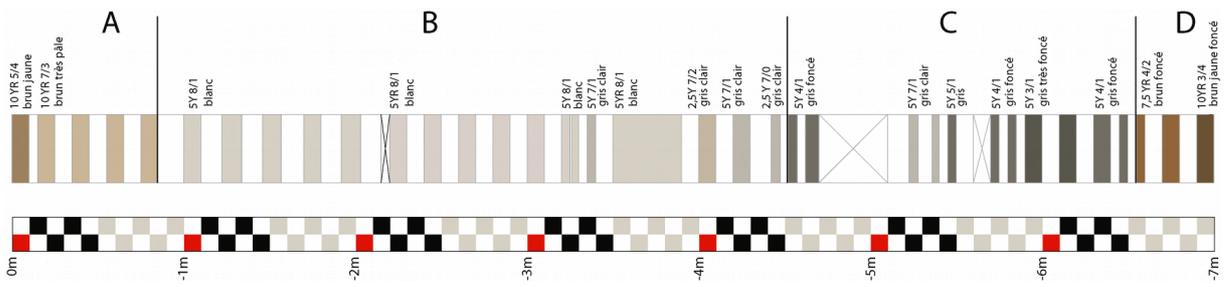


Figure 28 : Couleur des échantillons

II.8.b. Débris de beach-rock



Figure 29 : Echantillons contenant des débris de beach-rock

Certains échantillons contiennent des débris de beach-rock dans la fraction > 2 mm.

Ce sont des roches sédimentaires dont les éléments constitutifs sont généralement de la granulométrie des sables. Il s'agit surtout de débris coquilliers et de grains de quartz, le tout lié par des ciments carbonatés.

Ces importants volumes sont les témoins des hauts niveaux marins du Pléistocène récent (Tyrrhénien) (Müller Celka, Dalongeville, 2006). Le beach-rock est un indice de démaigrissement de la plage (Sanlaville, 2000).

II.8.c. Gypse

Des cristaux de gypse ont été repérés dans les échantillons suivants :

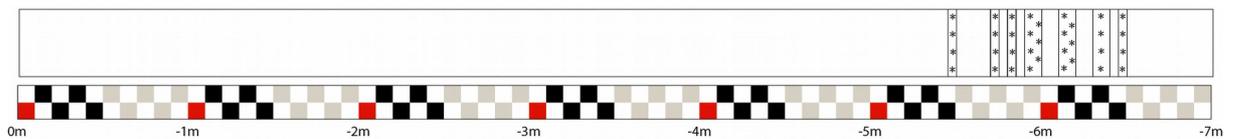


Figure 30 : Echantillons contenant du gypse

II.9. Datation des échantillons

II.9.a. Principes de la datation radiocarbone

- **Le cycle du carbone**

Le gaz carboné présent dans l'atmosphère passe vers les matières carbonées vivantes par photosynthèse et nourriture (Evin, Oberlin, 1998). A la surface des océans, la plus grande partie du carbone présent dans l'air s'échange avec celui dissous dans les eaux marines et entre dans la constitution dans organismes marins, tandis que l'autre partie, par la photosynthèse constitue plus ou moins directement les cellules de tous les organismes terrestres (Evin, 2002).

- **L'isotope carbone 14**

La datation radiocarbone utilise la quantité de carbone présente dans les matières carbonées pour leur donner un âge. Le carbone possède trois isotopes, ayant chacun des noyaux de charge positive identique mais de masses différentes. C'est l'isotope carbone 14 qui est utilisé pour la datation radiocarbone (Langouët, 1998). Cet isotope est radioactif c'est-à-dire tous les atomes de carbone 14 se désintègrent spontanément au bout d'un certain temps (Evin, 2002)

- **Expression des âges radiocarbone**

Quand un organisme meurt, la teneur en carbone 14 diminue jusqu'à totale disparition des isotopes radioactifs qui ne sont plus renouvelés (Evin, 2002). L'âge radiocarbone est obtenu après calcul de la diminution de la teneur en carbone 14 d'une matière carbonée (Evin, Oberlin, 1998). Deux matières carbonées présentant la même teneur en carbone 14 résiduelle ont exactement le même âge radiocarbone (Evin, Oberlin, 1998). La radiocarbone donne une chronologie absolue valable pour l'ensemble du globe (Evin, 2002).

- **Datation des échantillons et effet réservoir de la mer**

Pour qu'une matière carbonée soit datable par la méthode du radiocarbone il faut qu'il y ait un brusque arrêt d'échange entre son carbone et celui de l'atmosphère ou de l'eau de mer. Il est possible de dater un niveau archéologique avec n'importe quelle matière organique si la mort de l'organisme peut être supposée contemporaine de la formation du niveau (Evin, 2002).

Les matières végétales sont les matériaux les plus fiables pour la datation car leur formation est rapide (elle suit un cycle annuel) et que les cycles biologiques des différentes espèces sont bien connus (Evin, 2002).

Les échanges de carbone à la surface des océans puis les mélanges d'eaux profondes et leur remontées locales en surface font que les bicarbonates dissous dans l'eau de mer n'ont pas partout la même teneur en carbone 14 (Evin, Oberlin, 1998). Les datations sur coquilles marines peuvent donner un âge apparent différent de l'âge réel à cause de l'effet réservoir ou l'âge apparent de l'eau de mer qui font que la teneur originelle du radiocarbone n'est pas toujours connue précisément (Evin, 2002).

II.9.b. Résultats

Les échantillons de très petite taille peuvent être datés grâce à la technique AMS de couplage d'accélérateur et de spectrométrie de masse. C'est le cas des échantillons du carottage RIH III.

Les datations des échantillons ont été confiées à deux laboratoires différents. Une partie des datations a été confiée au laboratoire de Lyon 1. Une autre partie a été datée par le laboratoire de l'université de Lecce en Italie. Ce sont les seuls résultats obtenus à l'heure actuelle.

N° de l'échantillon	Code laboratoire	Type de datation	Nature du matériel	Profondeur (cm)	Age radiocarbone (BP)	Age calibré (cal BC)
RIH III 71	LTL4554A	AMS	Matière organique	690-700	9056 ± 65	8459 à 7985
RIH III 65	LTL4556A	AMS	Matière organique	645-650	8544 ± 60	7702 à 7490
RIH III 55	LTL4555A	AMS	Coquille marine	570-575	6203 ± 50	4823 à 4555
RIH III 47	LTL4557A	AMS	Coquille marine	462-470	6167 ± 50	4781 à 4521
RIH III 31	LTL4558A	AMS	Coquille marine	320-325	3947 ± 45	2129 à 1867

Figure 31 : Tableau de résultat des datations radiocarbone réalisées par le laboratoire de Lecce (Italie)

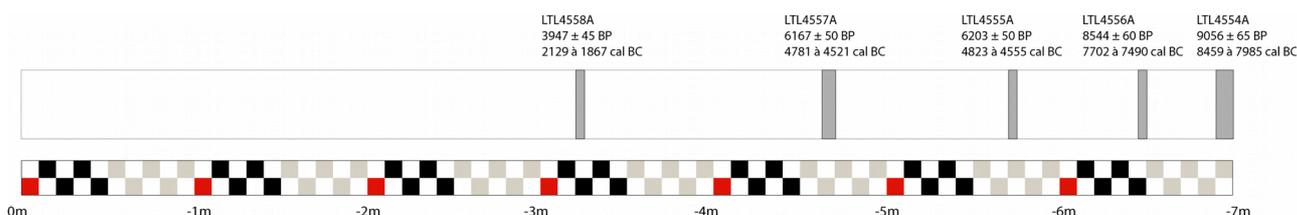


Figure 32 : Datations radiocarbone effectuées sur le carottage RIH III par le laboratoire de Lecce (Italie)

• Conversion des dates BP en dates cal BC

La dates sont exprimées en BP (âge radiocarbone) et en cal BC (âge réel).

Le calendrier radiocarbone a sa propre manière de rendre compte du déroulement du temps réel : pour certaines périodes il le rétrécit de façon très sensible, alors que pour d'autres l'écart entre les deux calendriers (réel et radiocarbone) reste à peu près le même. Il est nécessaire d'utiliser une courbe de calibration pour passer d'un âge radiocarbone à un âge en années réelles (Evin, 2002).

La conversion des dates en années réelles (exprimées en cal BC) a été faite à l'aide de la courbe de calibration des échantillons marins proposée par Stuiver *et al* (1986) qui prend en compte l'effet réservoir de l'eau de mer.

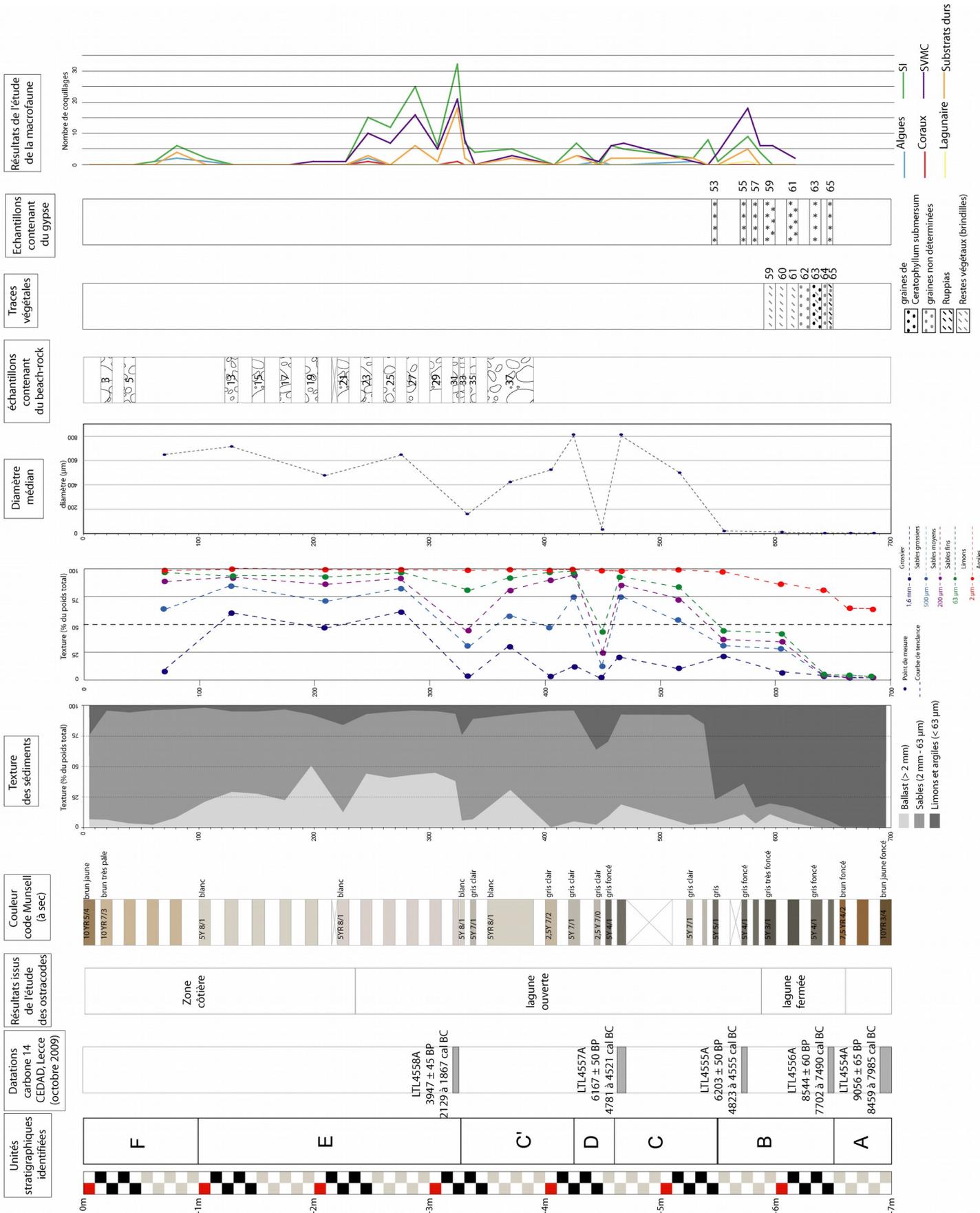
• Marge d'incertitude

La mesure est toujours affectée d'une plage d'incertitude liée aux imprécisions dues au réglage des appareils et celles dues au fait que la radioactivité est un phénomène aléatoire (Evin, Oberlin, 1998).

Les marges données pour les dates exprimées en BP correspondent au critère de 1 sigma, c'est-à-dire que la date de la mort de l'organisme a deux chances sur trois de se trouver dans l'intervalle exprimé (Evin, Oberlin, 1998). Par exemple la date 9056 ± 65 BP signifie que le matériel daté a deux chances sur trois de se trouver entre 9121 et 8991 BP.

La probabilité que la date exprimée en années réelles de l'échantillon se place entre les 2 dates indiquées est de 95,4 % (critère de 2 sigmas).

III. Synthèse des résultats obtenus et discussion



III.1. Description des unités stratigraphiques identifiées

III.1.a. Méthode de découpage des unités stratigraphiques

Après avoir présenté successivement les différentes analyses accompagnées de leurs résultats, il a semblé intéressant de confronter toutes les données pour chercher à définir des unités stratigraphiques qui pourront éventuellement servir à déterminer des milieux de sédimentation par la suite.

Pour ce faire, nous avons essayé d'observer les changements de chaque paramètre (couleur, texture, végétation, macrofaune, ostracodes etc) et nous avons ensuite essayé de regarder si les changements interviennent au même endroit. Lorsque c'est le cas, nous avons considéré que le changement pouvait marquer le début ou la fin d'une unité stratigraphique. Nous décrivons donc les caractéristiques de chaque unité ainsi obtenue, en partant de la base du carottage.

III.1.b. Unité A

Les sédiments de cette unité sont exclusivement de la granulométrie des limons et argiles. La granulométrie laser effectuée sur deux échantillons (RIH III 70 et RIH III 68, cf Figure 20) a montré que le diamètre médian des particules est de 3 μm et que les échantillons contiennent environ 20 % d'argiles. Les argiles se déposent dans des milieux extrêmement stagnants, avec un hydrodynamisme nul.

Cette unité est également caractérisée par une couleur brun foncé et par l'absence de traces végétales ou animales.

Ce niveau comprend deux datations qui indiquent que les sédiments ont pu être déposés entre 8544 ± 60 BP (7702 à 7490 cal BC) et entre 9056 ± 65 BP (8459 à 7985 cal BC).

III.1.c. Unité B

Cette unité apparaît assez différente de la précédente à plusieurs points de vue.

Quelques microrestes végétaux de type ruppiales ont été retrouvés, ceux-ci se développent dans des milieux aquatiques stagnants. Des graines ont également été retrouvées, elles correspondent à celles d'une plante aquatique vivante dans l'eau saumâtre. Elles ont été conservées par imbibition ce qui suppose un milieu humide et anaérobie.

Des coquillages ont pu être identifiés, principalement des coquillages appartenant à la biocénose des sables vaseux de mode calme.

La densité faunique d'ostracodes y est très forte mais le nombre d'espèces est très réduit. Il peut donc s'agir d'un milieu à salinité variable. P. Carbonel a identifié un milieu de lagune fermée. Du gypse a également été observé.

Les sédiments sont de couleur grise. La courbe de texture montre que c'est encore la fraction des limons-argiles qui domine, mais qui n'est plus exclusive car quelques sédiments sableux sont présents. Les échantillons mesurés par granulométrie laser (RIH III 64, RIH III 60, RIH III 54) montrent que ce sont surtout des limons qui composent la fraction fine et qu'il n'y a plus de sédiments argileux.

Cette unité peut correspondre à un changement dans le mode de dépôt des sédiments ainsi que dans la nature des sédiments déposés.

Une datation effectuée permet de supposer que c'est aux alentours de 6203 ± 50 BP (4823 à 4555 cal BC) que s'est formé ce dépôt.

III.1.d. Unités C, D et C'

D'après les données obtenues il semble que les unités C et C' sont similaires et que l'unité D vient s'intercaler de manière ponctuelle. Pour cette raison, il n'a pas été fait trois unités distinctes mais une seule unité (C et C') entrecoupée de l'unité D.

Un changement granulométrique brutal est visible sur la courbe de texture à -5,3 m. L'ensemble formé des unités C et C' est caractérisé par une texture sableuse. L'analyse granulométrique de 6 échantillons (RIH III 48, RIH III 47, RIH III 41, RIH III 39, RIH III 37, RIH III 34) a permis de montrer que ces sables sont composés à plus de 40 % de sables grossiers. Cette granulométrie n'est plus caractéristique d'un milieu stagnant, mais plutôt d'un milieu à hydrodynamisme élevé.

L'échantillon RIH III 44 a été mesuré par granulométrie laser et les résultats fournies contredisent complètement l'ensemble décrit ci-dessus puisque ce sont les limons qui sont prépondérants. Le diamètre médian est extrêmement faible puisqu'il est de 23 μm seulement. Il n'est pas possible d'expliquer ce changement brusque et ponctuel de granulométrie.

Une datation a été effectuée, mais elle se trouve très proche de l'échantillon RIH III 44, il est donc difficile de savoir quelle unité elle permet de dater. Cette datation indique 6167 ± 50 BP (4781 à 4521 cal BC).

III.1.e. Unité E

Le diamètre des sédiments est beaucoup plus élevé que dans les unités précédemment décrites. La courbe de texture montre que les sédiments grossiers représentent plus de 25 % de l'ensemble. La granulométrie laser effectuée sur les échantillons RIH III 26, RIH III 20 et RIH III 13 a permis de montrer que la fraction fine est composée de plus de 60 % de sables grossiers.

C'est également l'unité dans laquelle le plus de débris de coquilles ainsi que de coquilles déterminables ont été retrouvés. L'analyse de la malacofaune témoigne d'un grand nombre de coquillages intacts entre -2,2 m et -3,3 m. Les coquillages identifiés appartiennent à la biocénose des sables infralittoraux et des sables vaseux de mode calme essentiellement. Quelques coquillages associés à des substrats durs ont été identifiés à -3,1 m environ.

C'est également dans cette unité que des fragments de beach-rock ont été retrouvés.

L'analyse des ostracodes a permis de supposer que cette unité pourrait faire penser au passage d'une lagune fermée à une lagune ouverte sur la mer. En effet, les sables infralittoraux, le grossissement de la taille des sédiments, ainsi que les débris de beach-rock peuvent faire penser à une ouverture sur la mer.

Une datation effectuée à -3,1 m environ indique la date radiocarbone de 3947 ± 45 BP (2129 à 1867 cal BC).

III.1.f. Unité F

Cette unité sommitale est essentiellement caractérisable par un changement de couleur et une modification de la courbe de texture. Les sédiments qui la composent sont sableux. Les fractions grossière et limono-argileuse sont représentées à moins de 10 % chacune.

L'étude des ostracodes a montré une forte baisse de la diversité spécifique et les espèces présentes traduisent un milieu côtier marin.

III.1.g. Interprétation de la succession des unités stratigraphiques

Après avoir identifié les unités stratigraphiques une par une, il est intéressant de se pencher sur la manière dont elle se succèdent. Certaines unités stratigraphiques mesurent plusieurs dizaines de centimètres alors que d'autres ne mesurent que quelques centimètres.

L'interprétation du passage d'une unité stratigraphique à une autre pose plusieurs questions : s'agit-il d'une variation locale ou bien est-elle en lien avec un changement de grande ampleur ? Quelles en sont les causes ? Est-ce une variation ponctuelle avec retour à un état antérieur ou bien un changement durable de milieu de sédimentation ?

III.2. Présentation des hypothèses de variations relatives du niveau marin à Ras Ibn Hani

III.2.a. Intérêt pour la présente étude

L'hypothèse de départ de cette étude est la possibilité que la presqu'île soit formée d'une ancienne île, aujourd'hui reliée au littoral par un tombolo. Comme nous avons tenté de le montrer, cette hypothèse suppose soit une variation dans les courants marins à proximité de l'île, soit l'existence de variations relatives du niveau marin. Des études ayant cherché à connaître ce dernier facteur, il a semblé utile de les évoquer dans le mémoire.

S'intéresser aux variations relatives observées sur le littoral syrien peut également aider à interpréter les séquences sédimentaires repérées dans les carottages effectués à Ras Ibn Hani. Le carottage RIH III étant situé à seulement 200 m environ du littoral septentrional de la presqu'île, connaître les variations du niveau marin et pouvoir les dater pourra éventuellement expliquer la nature des dépôts sédimentaires du carottage contemporains de ces variations.

III.2.b. Résultats de deux études de terrain

• Trois niveaux marins successifs

L'article parut en 1993 et rédigé par Dalongeville *et al.* montre l'existence de trois niveaux marins successifs repérés grâce aux formes de corrosion et constructions biologiques le long du littoral syrien : un niveau situé à + 1,20 m au dessus du niveau marin actuel suivi d'un niveau situé à + 0,60 m puis le niveau marin actuel.

Ces trois niveaux marins ont également été identifiés dans un article rédigé par Müller-Celka et Dalongeville (2006) qui s'intéresse à l'étude archéologique des carrières littorales. Les carriers se basaient sur la limite de l'étage médiolittoral pour fixer l'altitude du plancher à l'intérieur de la carrière afin de pouvoir transporter aisément les blocs de pierre sur des barges, c'est pourquoi l'étude des anciennes carrières peut fournir des renseignements sur les variations relatives de niveau marin. A Ras Ibn Hani, trois niveaux étagés de planchers des

taille ont été repérés, ce qui signifie que trois niveaux marins ont existé (le niveau marin actuel, l'autre situé à + 0,60 m et le dernier situé à + 1,20 m).

• **Tentative de datation de ces niveaux marins**

Le tableau présentant l'ensemble des datations obtenues à Ras Ibn Hani a été placé en annexe 4. La Figure 34 ci-dessous représente les changements du niveau moyen relatif de la mer depuis 4000 avant J.-C. estimés à partir des datations radiocarbone obtenues en trois points du littoral syrien (Dalongeville *et al.*, 1993).

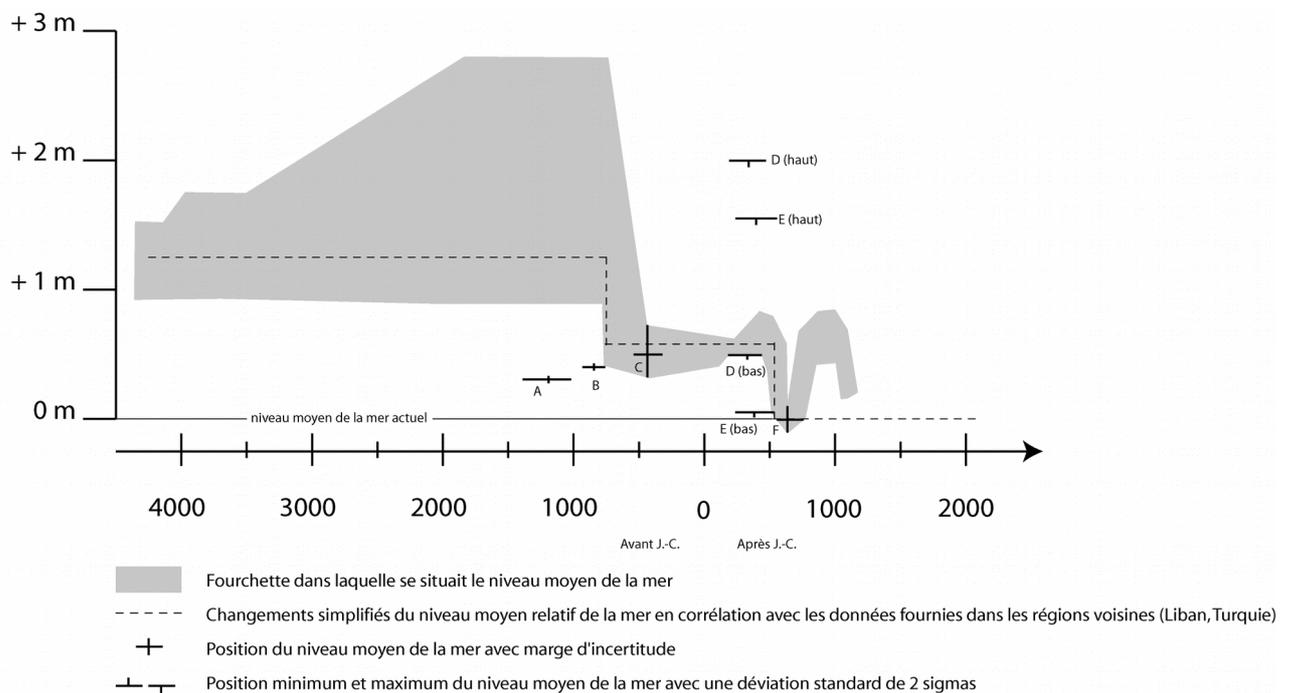


Figure 34 : Changement du niveau moyen relatif de la mer depuis 4000 ans (d'après Dalongeville *et al.*, 1993, modifiée par M. Leconte)

- **Niveau + 1,20 m**

Les dates exprimées en âge BP indiquent que c'est à partir de l'intervalle 5960-5155 BP que ce niveau repère a pu correspondre à celui de la ligne de rivage. Convertis en âge réel l'intervalle est encore moins précis puisqu'il correspond aux ensembles de dates 4680-4360 avant J.-C. (5960 BP) et 3780-3500 avant J.-C. (5155 BP) (Dalongeville *et al.*, 1993).

- **Niveau + 0,60 m**

Sur le littoral syrien, les formes de corrosion et les biostromes situés à une altitude oscillant entre 0,50 m et 0,80 m au-dessus de la limite supérieure des formes homologues actuelles sont

datées pour la plupart entre 2010 BP et 1820 BP (soit entre 150-430 après J.-C. et 370-650 après J.-C.), mais il est possible que la mer soit restée plus longtemps à ce niveau, peut être pendant sept siècles (Dalongeville *et al.*, 1993).

La chaussée de la baie méridionale semble avoir été érodée par la mer puisque le sommet de la chaussée se trouvait à + 0,80 m alors qu'il est actuellement à + 0,40 m. La chaussée a ensuite été recouverte par une plage dont le sommet visible est situé à + 2 m et dont les horizons médiolittoraux se suivent jusqu'à + 1,5 m (Dalongeville *et al.*, 1993). La campagne d'étude menée en 1991 par P. Pirazzoli, J. Laborel, R. Dalongeville et P. Sanlaville a permis d'obtenir une mesure radiocarbone à partir d'un prélèvement effectué au niveau du trottoir taillé par l'érosion sur le bord de la chaussée et qui a donné une date de 2825 +/- 55 BP, soit 1179 à 860 avant J.-C. (Lagarce J. et E. 1995).

- Des dates nuancent l'intervalle présenté

Le niveau + 0,60 m peut être antérieur

Trois datations réalisées à Ras Ibn Hani font penser que la mise en place de ce niveau marin moyen a pu être antérieure. Le tableau des résultats est présenté en annexe 4 et les points ont été représentés par des lettres sur la Figure 34 : Changement du niveau moyen relatif de la mer depuis 4000 ans (d'après Dalongeville *et al.*, 1993, modifiée par M. Leconte).

Un placage de vermetes prélevé à la racine des môles au sud de la presqu'île indique que le niveau moyen de la mer se situait déjà à + 0,5 m ± 0,2 m au dessus du niveau actuel en 2590 ± 45 BP (soit 520 et 320 avant J.-C. ; point C).

Deux fragments de sédiments indurés datés de 3225 ± 55 BP (soit 1370-1010 avant J.-C. ; point A) pour l'un et de 2915 ± 50 BP (soit 910-750 avant J.-C. ; point B) pour l'autre indiquent tous deux un niveau marin moyen ≥ + 0,3 / 0,4 m.

Le niveau marin relatif était peut être plus élevé dans cet intervalle

Deux datations effectuées sur des coquilles marines nuancent l'homogénéité des indices indiquant tous un niveau moyen marin situé vers + 0,60 m dans l'intervalle 2010 BP et 1820 BP.

L'échantillon daté de 1970 ± 55 BP (soit 200-470 ap. J.-C. ; point D) indique un niveau marin moyen à + 1,25 ± 0,75 m au-dessus de l'actuel.

L'échantillon daté de 1920 ± 55 BP (soit 250-550 ap. J.-C. ; point E) indique lui un niveau marin moyen situé à + 0,80 ± 0,75 m au-dessus de l'actuel.

- Du niveau de + 0,60 m au niveau actuel

La plage qui a recouvert la chaussée et les môles de Ras Ibn Hani a été mise en place vers 1920 ± 55 BP (250-550 ap J.-C.). Le niveau marin moyen était alors estimé à $+ 0,80 \pm 0,75$ m au dessus du niveau marin actuel, comme le montre l'échantillon E sur la Figure 13. Ce qui signifie qu'entre 250 et 550 après J.-C. le niveau marin moyen était peut être déjà équivalent au niveau marin actuel.

Sur le flanc sud de la chaussée (cf la Figure 7 pour localiser la chaussée), un trottoir de corrosion est visible. Il se situe au niveau de la mer actuel et il est recouvert de vermetes qui ont été datés de 1675 ± 55 BP soit 550-770 ap. J.-C. (point F). Il est donc possible que la mer ait atteint son niveau actuel dès le 6^e siècle après J.-C.

III.2.c. Confrontation avec les données du carottage RIH III

Les dates obtenues pour le carottage RIH III sont les suivantes :

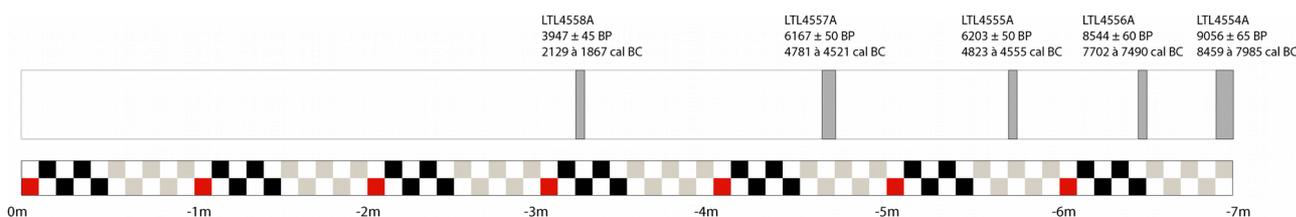


Figure 35 : Datations radiocarbone effectuées sur le carottage RIH III par le laboratoire de Lecce (Italie)

Si les variations relatives du niveau marin repérées correspondent bien à un phénomène général qui a pu affecter le nord de la presqu'île et si le carottage a été effectué sur une zone ayant pu être immergée par la mer, alors il est possible que le dépôt sédimentaire daté à 3947 ± 45 BP et celui daté à 6167 ± 50 BP aient une origine marine car selon le schéma théorique de la Figure 34 le niveau moyen relatif de la mer était situé respectivement à $+ 0,60$ m et à $+ 1,20$ m.

III.3. Comparaison des résultats de plusieurs carottages réalisés sur la presqu'île

Les résultats présentés dans ce mémoire ne concernent qu'un seul des neuf carottages effectués sur la presqu'île. Les résultats du carottage RIH III ne peuvent pas être interprétés en terme de milieux de sédimentation, car les données trop parcellaires, comme nous avons pu le voir.

Pour prendre sens, les résultats doivent être comparés aux résultats d'étude menées dans des conditions similaires. Les différents carottages réalisés sur la presqu'île ont pour but de parvenir à faire un transect (Figure 36), soit une corrélation entre les unités stratigraphiques de tous les carottages pour voir s'il y a des correspondances et s'il est possible de les interpréter comme des milieux de sédimentation et d'en définir les caractéristiques.

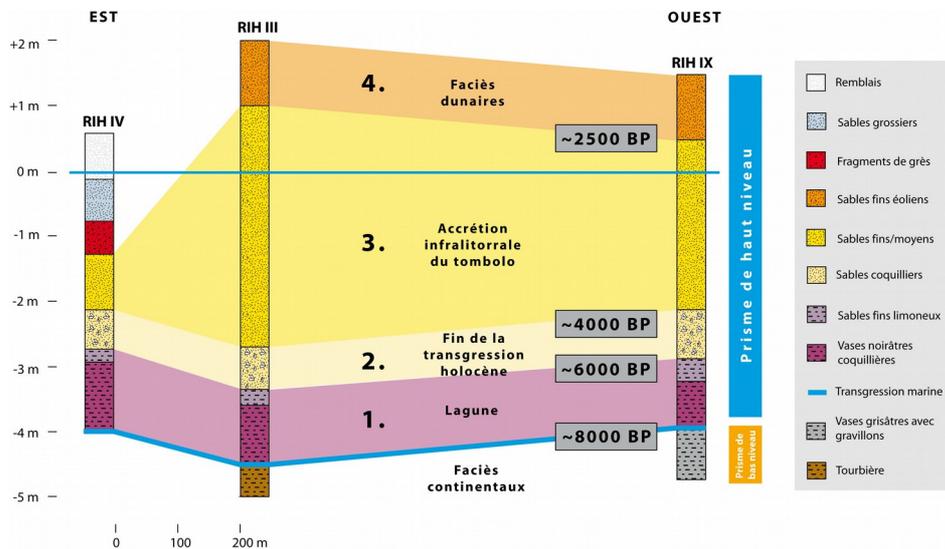


Figure 36 : Hypothèse de mise en place du tombolo, les données sont des hypothèses (Graphique réalisé par N. Marriner)

Deux autres carottages (RIH IV et RIH IX) sont actuellement étudiés au CEREGE par Nick Marriner. Il pourrait être intéressant de comparer les résultats granulométriques, faunistique ainsi que les datation obtenues avec les résultats de l'analyse du carottage RIH III, pour essayer de voir si des milieux de sédimentation sont déterminables.

Conclusion

L'analyse sédimentaire présentée a permis de mettre en évidence des phases de dépôt ainsi que des éléments faunistiques et floristiques qui pourraient servir à déterminer les étapes de formation de la presqu'île si les données obtenues venaient à être observées dans les autres carottages réalisés à Ras Ibn Hani.

Il serait très audacieux de tirer des conclusions paléoenvironnementales après l'analyse d'un seul carottage car beaucoup de facteurs sont à prendre en compte pour faire une telle interprétation et l'analyse réalisée fournie insuffisamment d'informations.

L'analyse du carottage RIH III aura permis, nous l'espérons, de fournir des données brutes qui pourront contribuer à alimenter les interrogations concernant la formation géomorphologique de cette presqu'île.

En effet, la présence d'un site archéologique étendu et toutes les incertitudes actuelles quant à la vocation des édifices retrouvés sont des motivations majeures pour chercher à connaître la nature du milieu dans le passé.

La question suivante reste donc toujours en suspend : pourquoi les habitants du Royaume d'Ougarit, à l'âge du Bronze, ont-ils choisi cet emplacement précis pour construire l'ensemble de palais dont les vestiges sont actuellement étudiés par les archéologues ?

Bibliographie

- BELLAN-SANTINI D., LACAZE J., POIZAT C., 1994. *Les biocénoses marines et littorales de Méditerranée : synthèse, menaces et perspectives*, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 245 p.
- BLANCHET G., SANLAVILLE P., TRABOULSI M., 1997. Le Moyen-Orient de 20 000 ans BP à 6 000 ans BP. Essai de reconstitution paléoclimatique. *Paléorient*, volume 23, numéro 2, p. 187-196.
- BODERGAT A.-M., 2002. L'ostracode, sa signification en termes d'environnements, in *Géologie de la Préhistoire*, GEOPRE, Presses univ. Perpignan, p. 769.
- BOULLAND C., 2010. *L'armement à Ougarit : les pointes de flèche métalliques*, mémoire de M1 dirigé par V. Matoïan.
- BRAVARD J.-P., FERDIERE A., 2009. *La géologie : les sciences de la Terre appliquées à l'archéologie*, Ed. Errance, Paris, 2^e édition, 238 p.
- CALVET Y., YON M. (dir.), 2008. *Ougarit au Bronze moyen et au Bronze récent*. Actes du colloque international tenu à Lyon en novembre 2001, TMO 47, 278 p.
- CAILLEUX A., *Code des couleurs du sol*, ed. Boubée
- CARBONEL P., 1980. *Les ostracodes et leur intérêt dans la définition des écosystèmes estuariens et de plateforme continentale. Essais d'application à des domaines anciens*, Mém. Inst.Géol.Bassin d'Aquitaine, 11, Bordeaux, 350 p.
- CARBONEL P., 1984. *Les Ostracodes, traceurs des variations hydrologiques dans les systèmes de transition eaux douces-eaux salées*, Mém.Soc.Géol.France, N.S., 144, Paris, p.117-128.
- CHAMLEY H., 1987. *Sédimentologie*, éd. Bordas, Paris, 175 p.
- CUBIZOLLE H., 2009. *Paléo-environnements*, éd. A. Colin, Paris, 269 p.
- DAOUD S., GHAZI H., 2004-2005. Étude géoarchéologique de Ras Ibn Hani (version traduite de l'arabe), AAAS 47-48, p. 43-54.
- DALONGEVILLE R., FOUACHE E., 2005. Les variations de la ligne de rivage en mer Méditerranée orientale au Pléistocène supérieur et de l'Holocène récent : réflexions, *Paléorient*, Volume 31, numéro 1, p. 27-38.
- DALONGEVILLE R., LABOREL J., PIRAZZOLI P., SANLAVILLE P., ARNOLD M., BERNIER P., EVIN J., MONTAGGIONI L.-F., 1993. Les variations récentes de la ligne de rivage sur le littoral syrien, *Quaternaire*, volume 4, numéro 1, p. 45-53.
- EVIN J., OBERLIN C., 1998. Méthodes de datation par le radiocarbone in *Les méthodes de datation en laboratoire*, éd. Errance, Paris, p. 75-117.
- EVIN J., 2002. Le radiocarbone in *Géologie de la Préhistoire*, GEOPRE, Presses univ. Perpignan, p. 1181.
- FOUCAULT A., RAOULT J.-F., 2005. *Dictionnaire de géologie*, éd. Dunod, Paris, 6^e édition, 382 p.

- GOIRAN J.-P., MORHANGE C., 2003. Géoarchéologie des ports antiques en Méditerranée : problématiques et études de cas, *Topoi*, XI, p. 647-669.
- GUILCHER A., 1954. *Morphologie littorale et sous-marine*, PUF, Paris, 215 p.
- JOLY F., 1997. Glossaire de géomorphologie : base de données sémiologique pour la cartographie, éd. Armand Colin, Paris, 325 p.
- LAGARCE E., BOUNNI A., SALIBY N., LAGARCE J., 1979. Nouvelles archéologiques: Ibn Hani. *Syria*, volume 56, numéro 3, p. 416-417.
- LAGARCE J., LAGARCE E., BOUNNI A., 1998. *Ras Ibn Hani I. Le Palais Nord du Bronze récent : fouilles 1979-199, Synthèse préliminaire*, Institut Français d'Archéologie du Proche-Orient (Bibliothèque Archéologique et Historique, CLI), Beyrouth, 196 p.
- LAGARCE J., LAGARCE E., 1978. Découvertes archéologiques à Ras Ibn Hani près de Ras Shamra : un palais du roi d'Ugarit, des tablettes inscrites caractères cunéiformes, un établissement des peuples de la mer et une ville hellénistique, *Comptes-rendus des séances de l'Académie de l'inscription et des belles lettres*, volume 122, p. 44-65.
- LAGARCE J., LAGARCE E., 1995. Ras Ibn Hani au Bronze récent in *Le Pays d'Ougarit autour de 1200 avant J.-C., histoire et archéologie*, Actes du colloque international de Paris 28 juin au 1^{er} juillet 1993, p. 141-154.
- LAGARCE E., BOUNNI A., SALIBY N., LAGARCE J., 1978. Rapport préliminaire sur la deuxième campagne de fouilles (1976) à Ibn Hani (Syrie), *Syria*, volume 55, numéro 3, p. 233-301.
- LANGOUET L., 1998. Les méthodes physiques de datation in *Les méthodes de datation en laboratoire*, éd. Errance, Paris, p. 70-73.
- MARRINER N., 2009. *Géoarchéologie des ports antiques du Liban*. L'Harmattan, Paris, 259 p.
- MARRINER N., MORHANGE C., BOUDAGHER-FADEL M., BOURCIER M., CARBONEL P., 2005. Geoarchaeology of Tyre's ancient northern harbour, Phoenicia, *Journal of Archaeological Science*, 32, p.1302-13027.
- MÜLLER CELKA S., DALONGEVILLE R., 2006. *Les calcarénites dunaires littorales en Méditerranée orientale : formation, propriétés, exploitation*, in Actes du Colloque International de l'Association for the Study of Marble and Other Stones used in Antiquity (ASMOSIA), Aix en Provence, p.143-160.
- PASKOFF R., 1994. *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*, éd. Masson, Paris, 2^e édition, 256 p.
- PINOT J.-P., Accumulations marines, *Encyclopedia Universalis* (sur internet)
- RIGOT J.-B., 2006. L'évolution ralentie du milieu naturel dans la steppe aride du nord de la Syrie à l'Holocène, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4/2006.
- RIVIERE A., 1977. *Méthodes granulométriques, techniques et interprétations*, éd. Masson, Paris, 170 p.
- RISER J. (dir.), 1999. *Le Quaternaire, géologie et milieux naturels*, éd. Dunod, Paris, 320 p.
- SANLAVILLE P., 2000. *Le Moyen-Orient arabe : le milieu et l'homme*, éd. A. Colin, Paris, 263 p.
- SANLAVILLE P., 1978. Notes sur la presqu'île d'Ibn Hani, *Syria*, volume 55, p 303-305.

SANLAVILLE P., 1989. Considérations sur l'évolution de la basse Mésopotamie au cours des derniers millénaires, *Paléorient*, volume 15, numéro 2, p. 5-27.

Site du ministère des affaires étrangères sur la campagne de fouilles à Ibn Hani :

http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/actions-france_830/archeologie_1058/les-carnets-archeologie_5064/orient-ancien_5067/syrie-ras-ibn-hani_17753/index.html

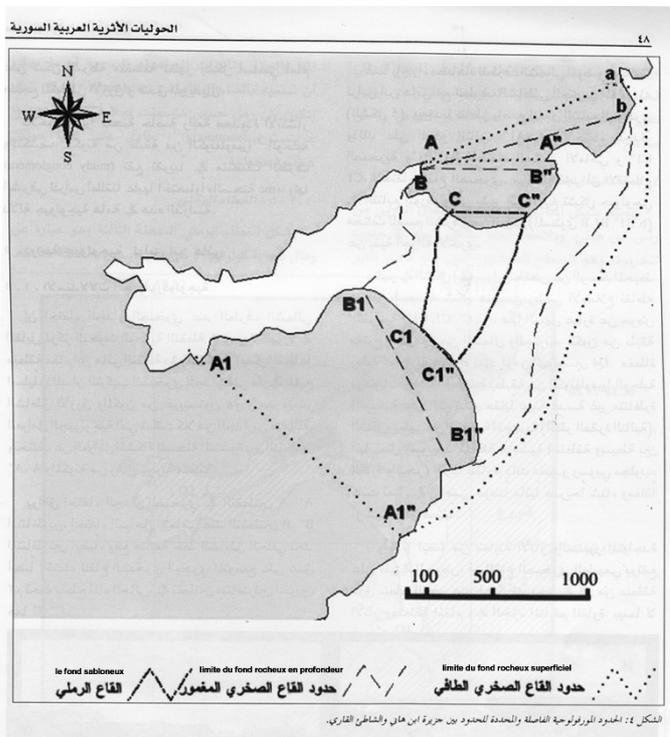
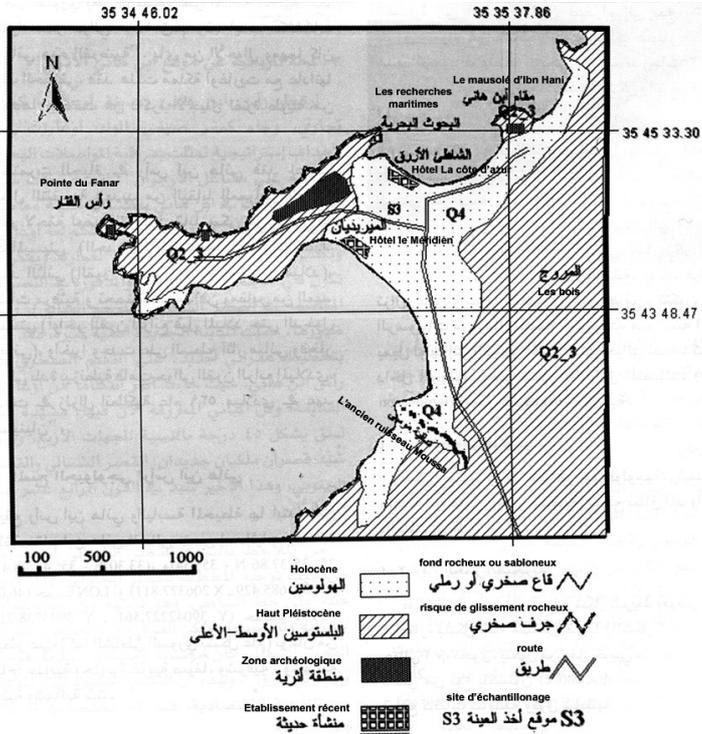
Table des figures

Figure 1 : Cartes de localisation.....	5
Figure 2 : Topographie.....	8
Figure 3 : Précipitations moyennes annuelles 1960-1961 à 1989-1990.....	9
Figure 4 : Localisation des sites archéologiques cités.....	11
Figure 5 : Extrait de Geological map of Syria, échelle 1:50 000, 1962, Région de Ras Ibn Hani.....	16
Figure 6 : Chronologie des différents périodes qui constituent le Quaternaire (d'après Cubizolle, 2009).....	16
Figure 7 : Géologie de la presqu'île de Ras Ibn Hani et emplacement des vestiges archéologiques (Dalongeville <i>et al.</i> , 1993 ; modifiée par M. Leconte).....	18
Figure 8 : Illustration schématique de l'hypothèse d'évolution de la presqu'île décrite dans l'article de P. Sanlaville (schéma réalisé par M. Leconte).....	19
Figure 9 : Carte géologique de la région actuelle de Ras Ibn Hani (d'après Daoud et Ghazi, modifiée par M. Leconte).....	20
Figure 10 : Hypothèse de tracé des lignes de rivage présentée dans l'article de Daoud et Ghazi (carte modifiée par M. Leconte).....	21
Figure 11 : Les étapes de formation d'un tombolo par diffraction de la houle (d'après J.-P. Pinot, Encyclopedia Universalis).....	22
Figure 12 : Dérive littorale (Encyclopedia Universalis).....	23
Figure 13 : Localication des carottages effectués sur la presqu'île en mai 2009.....	25
Figure 14 : Texture des sédiments en fonction de la profondeur.....	29
Figure 15 : Principe de la mesure réalisée par le granulomètre laser.....	31
Figure 16 : Echantillons analysés par granulométrie laser.....	32
Figure 17 : Répartition des sédiments en classes granulométriques (résultats du tamisage précédent la granulométrie laser et de la granulométrie laser).....	33
Figure 18 : Diamètre médian (D50) en fonction de la profondeur.....	35
Figure 19 : Indice de classement de Trask en fonction de la profondeur.....	36
Figure 20 : Fréquences simples et cumulées (résultats des mesures par granulométrie laser). 38	
Figure 21 : Répartition des cinq communautés d'ostracodes en fonction de la profondeur.....	43
Figure 22 : Densité faunique et nombre d'espèces en fonction de la profondeur.....	44
Figure 23 : Densité faunique et texture des sédiments en fonction de la profondeur.....	44
Figure 24 : Texture des sédiments et répartition du nombre de coquillages, répartis par biocénose, en fonction de la profondeur.....	47
Figure 25 : Répartition des espèces en fonction de la profondeur et milieux associés.....	49
Figure 26 : Graines de l'échantillon RIH III 63.....	50

Figure 27 : Résumé des traces végétales présentes dans les échantillons 59 à 65 du carottage RIH III.....	51
Figure 28 : Couleur des échantillons.....	52
Figure 29 : Echantillons contenant des débris de beach-rock.....	52
Figure 30 : Echantillons contenant du gypse.....	52
Figure 31 : Tableau de résultat des datations radiocarbone réalisées par le laboratoire de Lecce (Italie).....	54
Figure 32 : Datations radiocarbone effectuées sur le carottage RIH III par le laboratoire de Lecce (Italie).....	54
Figure 33 : Synthèse des résultats obtenus.....	56
Figure 34 : Changement du niveau moyen relatif de la mer depuis 4000 ans (d'après Dalongeville <i>et al.</i> , 1993, modifiée par M. Leconte).....	61
Figure 35 : Datations radiocarbone effectuées sur le carottage RIH III par le laboratoire de Lecce (Italie).....	63
Figure 36 : Hypothèse de mise en place du tombolo, les données sont des hypothèses (Graphique réalisé par N. Marriner).....	64

Annexes

Annexe 1 : Traductions des cartes publiées dans l'Article de Daoud et Ghazi (2004-2005)



Annexe 2 : Courbe de Hjulström

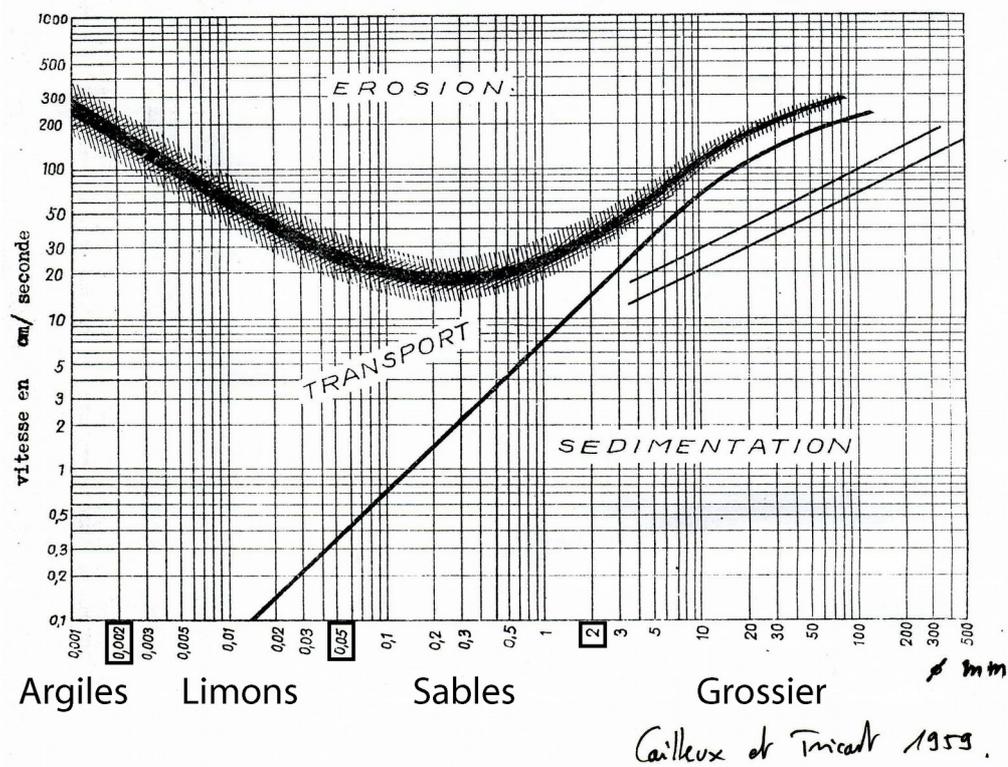


Figure 35

Annexe 3 : Figure de Remane & Schlieper

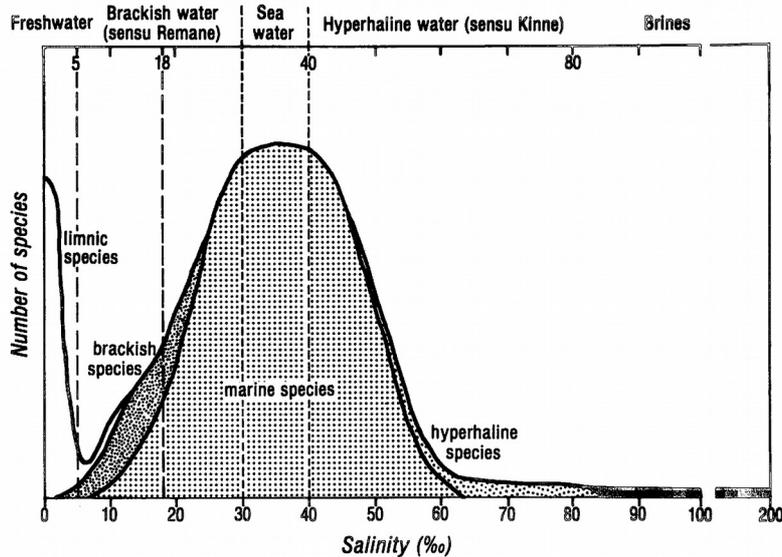


Figure 1. Schematic diagram showing the relationship between diversity of invertebrate populations versus salinity (after Kinne, 1971 and Plaziat, 1982).

Annexe 4 : Tableau de résultat des datations réalisées à Ras Ibn Hani et présentées dans l'article de Dalongeville *et al*, 1993

	Echantillon	Matériel	Altitude (actuelle)	Position de l'ancien niveau moyen de la mer en mètre au dessus de l'actuel	Age BP	Ages Calibrés 2 δ
A	91SY2	Ciment marin	+ 0,3 m au dessus du niveau moyen de la mer actuel	$\geq + 0,3$	3225 ± 55	1370-1010 av. J.-C.
B	91SY8	Ciment marin	+ 0,4 \pm 0,2 m au dessus du niveau moyen de la mer actuel	$\geq + 0,4$	2915 ± 50	910-750 av. J.-C.
C	91SY1	Dendropoma (vermets)	+ 0,5 \pm 0,2 m par rapport au niveau instantané de la mer lors du prélèvement	+ 0,5 \pm 0,2	2590 ± 45	520-320 av. J.-C.
D	91SY9/2	Coquilles marines	+ 0,9 m au dessus de la nappe d'eau	+ 1,25 \pm 0,75 m	1970 ± 55	200-470 ap. J.-C.
E	91SY9/1	Coquilles marines	+ 0,45 m au dessus de la nappe d'eau	+ 0,80 \pm 0,75 m	1920 ± 55	250-550 ap. J.-C.
F	91SY7	Dendropoma (vermets)	+ 0,05 \pm 0,2 m au dessus du niveau moyen de la mer actuel	± 0	1675 ± 55	550-770 ap. J.-C.

Les datations radiocarbone ont été calibrées en années réelles en utilisant la courbe de calibration pour les échantillons marins proposée par Stuiver *et al.* (1986) et en prenant pour la Méditerranée $\Delta R = - 80 \pm 25$ (Stiros *et al.*, 1992).