HAL
open science

Rôle des pockmarks dans l'activité de bioconstruction de Haploops nirae

Marine Reynaud

To cite this version:

Marine Reynaud. Rôle des pockmarks dans l'activité de bioconstruction de Haploops nirae. Océanographie. 2014. dumas-01019920

HAL Id: dumas-01019920

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01019920v1

Submitted on 9 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MASTER SML

SCIENCES DE LA MER ET DU LITTORAL

MENTION

GÉOSCIENCES BREST

SPECIALITE

RECHERCHE

REYNAUD Marine

Rôle des pockmarks dans l'activité de bioconstruction de *Haploops nirae*

Mémoire de stage de Master 2
Année Universitaire **2013-2014**
Structure d'accueil : **Université de Nantes**
Tuteur universitaire : **GRAINDORGE David**
Maître de stage : **BALTZER Agnès, EHRHOLD Axel et FOURNIER Jérôme**

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Agnès Baltzer, mon maître de stage, qui m'a donné l'opportunité de réaliser cette passionnante étude et de participer à une incroyable aventure. Je souhaite aussi la remercier pour son soutien permanent.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Jérôme Fournier pour son aide sur la partie biologique et statistique de ce stage.

Je tiens également à remercier Axel Ehrhold pour ces précieux conseils et pour la belle randonnée à Trégunc ainsi que pour m'avoir permis d'utiliser le granulolaser de l'IFREMER.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude Céline Cordier pour son hospitalité et pour son savoir-faire en matière de cartographie et d'imagerie.

Je veux aussi associer dans des remerciements sincères, toutes les personnes qui n'ont aidé au cours de ce stage :
- Laurent Godet pour sa bonne humeur et ses cours sur les oiseaux.
- l'équipage de l'Haliotis, le commandant Arnaud Gillier et Jacques Le Doaré le professionnel du ROV pour leur bonne humeur et leurs bons petits plats.
- Gwendoline Grégoire pour m'avoir tout appris sur le granulolaser.
- Martin Juigner pour sa précieuse formation sur ArcGis.
- Jean-Marc Sinquin pour sa rapide et néanmoins efficace formation sur CARAIBES
- Pascal Jean Lopez pour les coupes et les photographies des tubes de *H. nirae* à la binoculaire.
- Héloïse You et Julien Ringelstein pour leur don d'un filet à plancton.
- Marie Jabbar pour ces données sur les tempêtes.
- Julie Perrot pour m'avoir aiguillée sur les données de sismiques.
- Les Master 1 géomatiques de Nantes pour leur aide dans le pointage des pockmarks actifs et inactifs.
- Jean-Marc Rousset pour le rapatriement du matériel de la campagne.
- Le Centre Français du Littoral pour leur participation financière.

Et un grand merci à toute l'équipe du laboratoire Géolittomer de Nantes, notament Malika Fredj, Armelle Decaulne, Denis Mercier, Mohamed Maanan et Pourinet Laurent, pour leur accueil et leur gentillesse.

J'ai également une petite pensée pour ma promotion de Géosciences Brest.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

I. ÉTAT DES LIEUX 2
1. Contexte géologique 2
2. Contexte hydrodynamique 4
3. Les peuplements benthiques 4

II. UNE ASSOCIATION ÉTONNANTE 6

III. MATÉRIELS ET MÉTHODES 13
1. Acquisition et traitements des données 13
2. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* 13
3. L'évolution des pockmarks dans deux zones d'études 14
4. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae* 16
4.1 Plan d'échantillonnage 16
4.2 Traitement du matériel sédimentaire 17
4.3 Traitement statistique 18

IV. RÉSULTATS 20
1. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* 20
2. L'évolution des pockmarks dans les deux zones étudiées 21
2.1. Zone A 21
2.2. Zone B 25
3. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae* 28

V. DISCUSSION 32
1. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* 32
2. L'évolution des pockmarks dans les deux zones étudiées 33
3. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae* 34

BIBLIOGRAPHIE 36

ANNEXES 1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des stations échantillonnées. 16

Tableau 2 : Les classifications utilisées par le logiciel GRADISTAT Version 8.0. Les catégories sédimentaires sont adaptées d'après Udden (1914) et Wentworth (1922), l'indice de classement et le coefficient d'acuité sont dérivés d'après les mesures graphiques de Folk et Ward (1957). 19

Tableau 3 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres décrivant les sédiments étudiés. 29

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques des différences entre les sédiments étudiés 29

Tableau 5 : Résultats des tests statistiques des différences entre les stations. 30

Tableau 6 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres décrivant les sédiments étudiés selon leurs stations 30

Tableau 7 : Résultats des tests statistiques des différences existant au sein du sédiment associé en fonction de la densité en pockmarks et de la stabilité des populations à *Haploops nirae*...31

Tableau 8 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres utilisés pour décrire le sédiment associé en fonction de la densité en pockmarks et de la stabilité des populations à *Haploops nirae*. 31

Annexes:

Tableau 1 : Résultats des tests de Shapiro. 5

Tableau 2 : Résultats des tests de Bartlett. 6

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique de la zone étudiée. 2

Figure 2 : Cartographie des réseaux hydrographiques fossiles de la Baie de Concarneau (Menier, 2003). 3

Figure 3 : Représentation de l'espèce *Haploops nirae*. (a) Illustration scientifique de *Haploops nirae* ; (b) Photographie d'un *Haploops nirae* dans son tube. 7

Figure 4 : Cycle de vie de *Haploops nirae* d'après Rigolet *et al.* (2012). 8

Figure 5 : Photographie, prise par ROV, du peuplement à *Haploops nirae* en baie de Concarneau. 9

Figure 6 : Localisation des deux zones et des profils sismiques sélectionnés pour cette étude. 15

Figure 7 : Limite de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* en baie de Concarneau. 20

Figure 8 : Carte bathymétrique de la zone A en (a) 2011 et (b) 2014. 21

Figure 9 : Imagerie sonar de la zone A en (a) 2003 et (b) 2009. 22

Figure 10 : Imagerie sonar de la zone A en 2014. 23

Figure 11 : Localisation des profils sismiques de la zone A. 23

Figure 12 : Profils sismiques de la zone A. Le profil (a) correspond au profil HA86 de la campagne POCK&PLOOPS de 2011 et le profil (b) correspond au profil HA25 de la campagne POCK&TIDE de 2014. L'unité de temps est en temps double. 24

Figure 13: Carte bathymétrique de la zone B en 2011 (a) et en 2014 (b). 25

Figure 14 : Imagerie sonar de la zone B en 2003 (a), en 2011 (b) et en 2014 (c). 26

Figure 15 : Photographie prise par un R.O.V. des sédiments comblant les dépressions du Sud-Est de la zone B. 27

Figure 16 : Localisation des profils sismiques de la zone B. 27

Figure 17 : Profil sismique de la zone B. Le profil (a) correspond au profil HA67 de la campagne POCK&PLOOPS de 2011 et le profil (b) correspond au profil HA166 de la campagne POCK&TIDE de 2014. L'unité de temps est en temps double. 28

Figure 18: Représentations graphiques des analyses en composantes principales (A.C.P.). (a) de la totalité des données ; (b) des données sur le sédiment associé ; (c) des données sur le sédiment des tubes. GM : Grain moyen ; K : Kurtosis ; SK : Skewness ; SO : Sorting. 28

Annexes :

Figure 1 : Photographie d'un tube de *Haploops nirae* appartenant à un individu juvénile. 1

Figure 2 : Photographie d'un tube de *Haploops nirae* appartenant à un individu adulte. L'individu ici était un immature. 1

Figure 3 : Localisation des stations échantillonnées à la benne Van Veen en avril 2014. 2

Figure 4 : Standard visuel pour l'estimation de l'indice de classement (Fournier *et al*., 2012). 3

Figure 5 : Paramètres d'acuité et forme de la courbe de fréquence (Fournier *et al*., 2012). 4

Figure 6 : Indice d'asymétrie et forme de la courbe de fréquence (Fournier *et al*., 2012). 4

INTRODUCTION

L'océan couvre 70 pourcent de la surface de la Terre. De ce fait les sédiments marins constituent le second habitat le plus répandu sur notre planète, après la colonne d'eau (Gray et Elliott, 2009). La diversité de forme, de taille, de composition et d'agencement des sédiments offre une multitude d'habitats pour les organismes benthiques.

Un habitat doit regrouper l'ensemble des conditions environnementales dans lequel une espèce ou une population peut survivre et se maintenir à l'état spontané (Carpentier *et al.*, 2005). Néanmoins certaines espèces (dites ingénieures) peuvent le modifier du fait de leur propre structure physique (par exemple les coraux) ou par leurs actions (par exemple les castors, *Castor sp*.). Ainsi la présence de construction biologique peut avoir une répercussion sur l'hydrodynamisme local, le taux de sédimentation mais également sur l'installation d'autres espèces (Eckman, 1983). Les interactions entre un habitat et la faune qu'il héberge, sont donc complexes et nécessitent souvent une approche pluridisciplinaire afin d'aborder ce système dans son ensemble.

La compréhension de ces liens est primordiale dans la préservation des écosystèmes et la conservation d'espèces d'intérêts particuliers, rares ou commerciales.

Ce travail illustre des interactions qui peuvent exister entre un habitat et sa biocénose associée avec le cas original des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* (Kaim-Malka, 1976) en baie de Concarneau (Bretagne Sud – France).

I. ÉTAT DES LIEUX

1. Contexte géologique

La baie de Concarneau couvre une surface d'environ 200 kilomètres carrés pour une profondeur inférieure à 50 mètres. Elle correspond à une dépression tectonique de cinq à six kilomètres de large et de quinze kilomètres de long, limitée par deux systèmes de failles (Delanoë, 1988). La bordure orientale se caractérise par plusieurs accidents structuraux, qui coïncide avec le système de failles décrochantes de Kerforne de direction N160 (Vanney, 1977 ; Béchennec *et al.*, 1997 ; Menier, 2003 ; Proust *et al.*, 2011 [Figure 1]).

Le socle cristallin est composé de plusieurs unités dont la plus importante, en terme de surface, correspond au granite de Tregunc (Béchennec *et al.*, 1997). Sur ce socle repose, en discordance, des séries de l'Éocène moyen constituée de formations de grès et des grésocalcaires bartoniennes faillées, basculées et plissées ainsi qu'incisées par des paléovallées. Ce système préserve les rares remplissages de calcaires marins de l'Oligocène supérieur (Delanoë *et al.*, 1976).

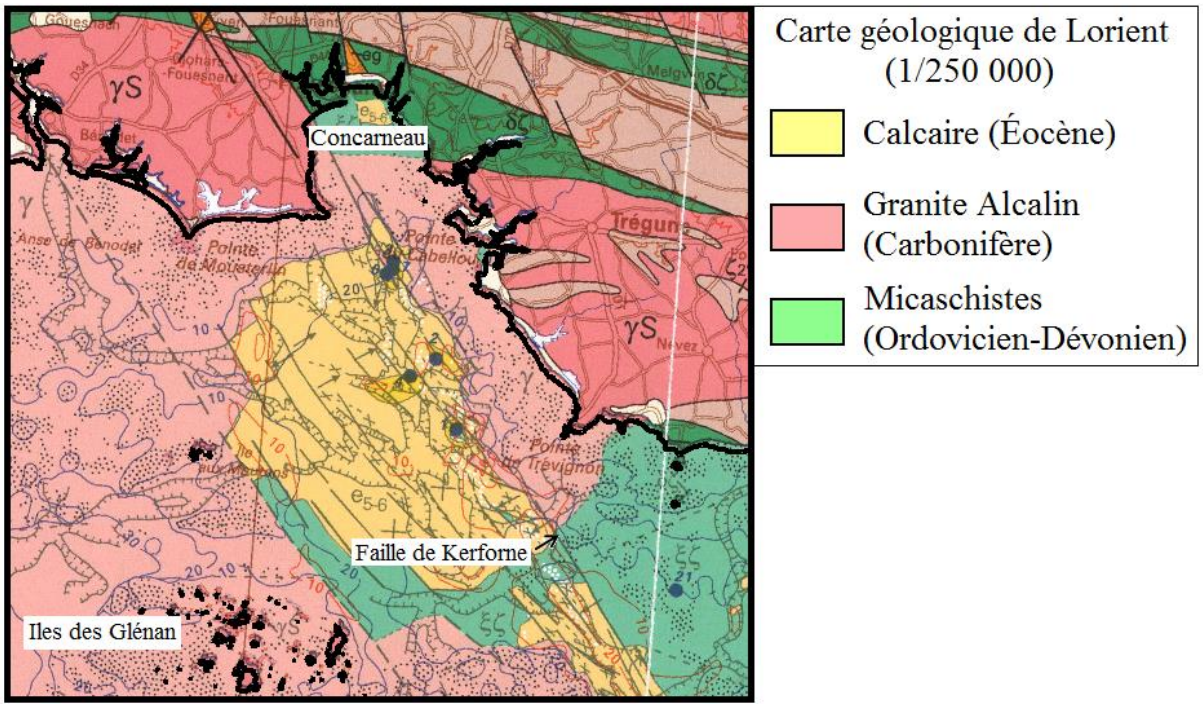

Figure 1 : Carte géologique de la zone étudiée.

Au sein de la baie de Concarneau l'Odet et ses affluents creusent un réseau hydrographique dans le socle cristallin et dans les séries tertiaires. Les vallées fossiles de l'Odet formant deux

systèmes de paléovallées. Le premier se situe au Sud de la baie et est orienté au N120, parallèlement au cisaillement sud armoricain. Le second, quant à lui, est orienté N160, le long du système de failles de Kerforne (Menier, 2003 [Figure 2]). Le creusement de ce réseau fluviatile aurait débuté dès la fin de l'Eocène et au début de l'Oligocène (Delanoë, 1988). Ces paléovallées, longues de 20 et 18 kilomètres, ont des cours sinueux relativement étroits (200 à 500 mètres de large) et se rejoignent pour former un seul système de drainage, de quatre kilomètres de large, au sud de la pointe de Trévignon. Des dépôts fluviatiles et estuariens pléistocènes moyen ou supérieur ont comblé l'ensemble. La couverture holocène, épaisse de 3 à 5 m, vient coiffer toute la zone étudiée à l'exception de certains plateaux tels que les terrasses à maërl entre Concarneau et Trévignon (Bouysse et Calvez, 1967 ; Bouysse *et al.*, 1974).

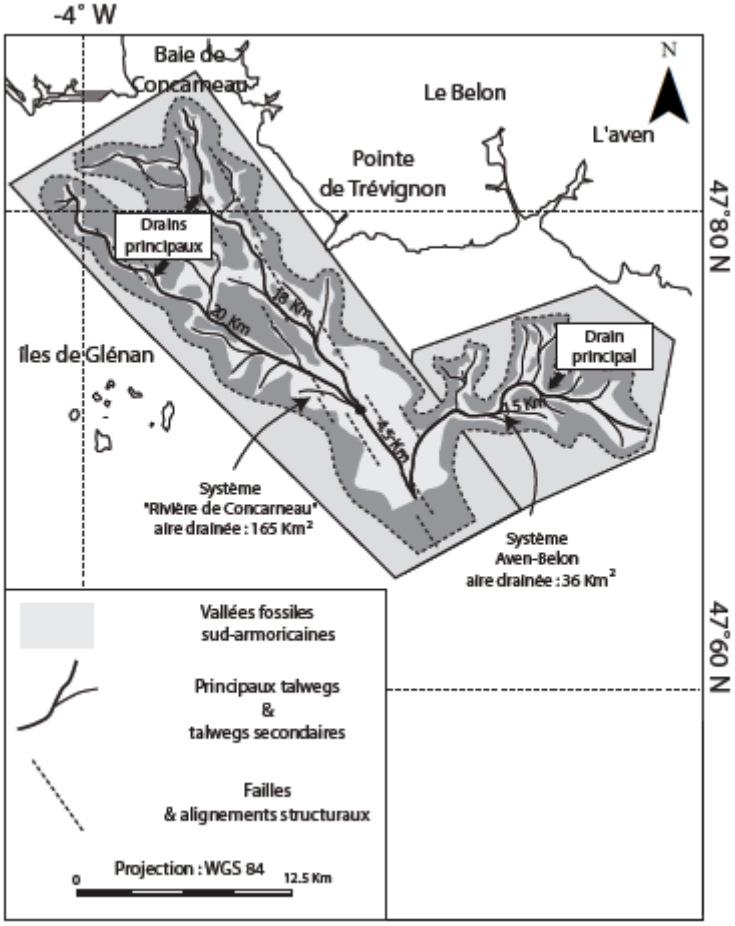

Figure 2 : Cartographie des réseaux hydrographiques fossiles de la Baie de Concarneau (Menier, 2003).

A l'heure actuelle la majeure partie de la baie est constituée de vase à faible composante sableuse. Ce faciès sédimentaire est bordée au Nord-Est par une terrasse à maërl (Ehrhold *et al.*, 2006 ; Rigolet *et al.*,2014).

2. Contexte hydrodynamique

L'hydrodynamique de la zone d'étude est fortement contrainte pas la morphologie des fonds marins et les conditions régionales. En baie de Concarneau les courants de marée n'excèdent pas les 80 centimètres par seconde et ils atteignent seulement 20 centimètres par seconde entre les secteurs de Concarneau et de Trévignon (Ehrhold, 2007). Ils alternent leurs trajectoires entre Sud-Sud /Ouest pendant le flux (ou flot) et Nord-Nord/Est lors du reflux (ou jusant). La marée est semi-diurne avec un marnage de 5,5 mètres, pouvant augmenter jusqu'à 6-7 mètres au cours des grandes marées (Tessier, 2006).

Les grandes houles sont généralement associées à des vents d'Ouest (Tessier, 2006) mais la baie en est relativement protégée par divers hauts fonds (Moutons, Pourceaux Glénans et Basse jaune [Pinot, 1974]).

En ce qui concerne la turbidité, les apports sédimentaires sont peu marqués car les débits des rivières qui débouchent dans la baie sont faibles (Glémarec *et al*., 1987). Cependant au cours des dernières décennies la turbidité a augmenté dans les eaux côtières. L'une des causes envisagée pourrait-être l'accroissement des activités anthropiques conduisant à une eutrophisation du milieu auquel viennent s'ajouter les perturbations liés au dragage et chalutage en haute mer (Hily *et al.*, 2008).

3. Les peuplements benthiques

En 1964, les peuplements benthiques de la baie se répartissaient d'Ouest en Est suivant un gradient sédimentaire. En effet, un peuplement de sable fin à *Amphiura filiformis* (ophiures) à l'Ouest laisse place à un peuplement de vases sableuses à *Maldane glebifex* (annélides) à l'Est. Au centre de la vasière, entre la pointe de Trévignon et les Glénan, une population de *Haploops nirae* forme une enclave au sein du peuplement à *Maldane*. Les densités de *Haploops* étaient alors d'environ de 2000 à 5000 individus par mètre carré.

Dix années plus tard, en 1974, les populations de *Haploops* avaient colonisé vers le nord une grande partie des vases à *Maldane* (Ménesguen, 1980). La population de *Maldanes* est alors passée de 450 individus par mètre carré, en 1969, à 30 individus par mètre carré, en 1983 (Glémarec *et al*, 1987). Ce déclin peut être expliqué par le fait que le large tube de vase compacte qui abrite le *Maldane*, favorise l'installation des *H. nirae* et inhibe son propre développement populationnelle (concept de l'amensalisme [Glémarec et Grall, 2003]).

En 2003 la carte morpho-sédimentaire de Ehrhold *et al.* (2006) confirme une relative stagnation de la distribution de la population de *Haploops*, déjà observée en 1977, 1983 et

1997. Leur progression est limitée par la présence du peuplement de *Amphiura filiformi* au Nord-Ouest. Par leurs activités alimentaires, il maintient une instabilité de la couche superficielle du sédiment par une remise en suspension continue des particules. Cette bioturbation empêche l'installation des *Haploops* (Glémarec *et al*, 1987).
Les fonds sablo-vaseux de la baie de Concarneau sont actuellement occupés par quatre peuplements Ehrhold *et al.* (2006) : les sables à *Owenia fusiformis* (annélides) situé à l'Ouest de la baie, près des Glénan, les vases sableuses à *Amphiura filiformis* situés au Nord, les vases molles à *Sternaspis scutata* (annélides) et enfin les vases consolidées à *Haploops nirae*.

Depuis 2008, l'ensemble du secteur d'étude est inclus dans une zone protégée Natura 2000.

II. UNE ASSOCIATION ÉTONNANTE :

HAPLOOPS /POCKMARKS

Les peuplements à *Haploops sp.* ont été découverts dans certaines baies de Bretagne Sud dans les années 60 (entre 1964 et 1966 [Glémarec, 1969]). Les *Haploops* sont des petits crustacés amphipodes, de un à deux centimètres selon l'espèce, appartenant à la famille des Ampeliscidés (Dauvin et Bellan-Santini, 1990 [Figure 3]).

Jusqu'à récemment les espèces du genre *Haploops* présentes en Bretagne Sud ont été rapportées comme appartenant à *Haploops tubicola* (Glémarec, 1969 ; Ménesguen, 1980 ; Glémarec *et al*., 1987 ; Le Bris, 1988). Cependant, après la description d'une nouvelle espèce, par Kaim-Malka en 1976, les collections ont été réexaminées et des analyses génétiques ont été effectuées. Ainsi les individus ont été réattribués à l'espèce *Haploops nirae,* par Dauvin et Bellan-Santini (1990) et Rigolet (2013).

Cette espèce a été identifiée en mer Méditerranée (e.g. au sud de la France, en Israël et en Italie) et dans l'océan Atlantique de la côte du Maroc à la Bretagne Sud, où elle atteint sa limite Nord de répartition (Dauvin et Bellan-Santini, 1990). Elle vit à des profondeurs de 15 à 320 mètres et sur des fonds vaseux, notamment pour leur permettre de construire leur tube. En effet, la plupart des espèces appartenant à la famille des Ampeliscidés sont tubicoles. Chaque individu vit dans son propre tube, qui ne peut être ouvert que de l'intérieur (Figure 3 et Annexe 1). Les tubes de *Haploops nirae* sont positionnés verticalement et ont une forme aplatie ressemblant à une cosse de légumineuse. Ils atteignent environ cinq centimètres de long pour les individus adultes et dépassent de deux à trois centimètres au-dessus de la surface du sédiment. Ils sont faits à partir d'un mélange de vase, de pseudofèces (i.e. particules non digérées par l'animal) et de mucus (mucopolysaccharide) (Rigolet, 2013). Ils s'allongent et s'élargissent au fur et à mesure de la croissance de l'animal (Glémarec et Grall, 2003).

Pour se nourrir les *Haploops* se tiennent en position dorsale près de l'orifice du tube et recueillent les microalgues de l'eau environnante en balayant leurs antennes dans la colonne d'eau (Enequist, 1949 ; Rigolet *et al.*, 2011).

Ils sont donc considérés comme des organismes strictement tubicoles et par conséquent ils sont définit comme étant des suspensivores stricts. Le taux de filtration de cette espèce est beaucoup plus élevé comparé à de nombreux suspensivores (bivalves, gastéropodes ou annélides polychètes). Le peuplement présent dans la baie de Concarneau serait capable de

filtrer un volume d'eau égal à celui de la baie dans une durée de 29 à 30 jours (Rigolet *et al.*, 2011).

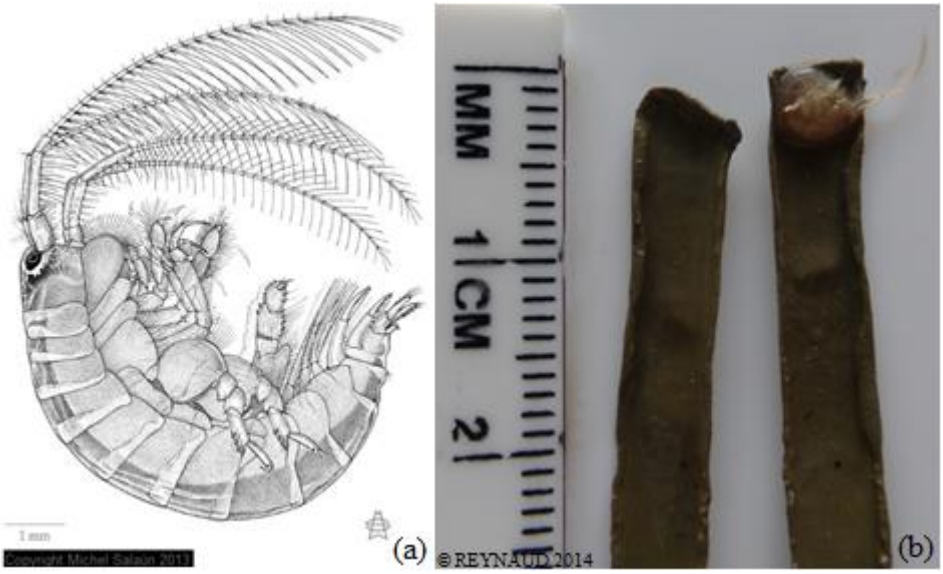

Figure 3 : Représentation de l'espèce *Haploops nirae*. (a) Illustration scientifique de *Haploops nirae* ; (b) Photographie d'un *Haploops nirae* dans son tube.

En ce qui concerne son cycle de vie, *Haploops nirae* atteint sa maturité sexuelle lors de sa troisième année (Figure 4). Les mâles quittent alors leur tube et entament une vie pélagique alors que les femelles reste tubicoles jusqu'à l'accouplement. La reproduction a lieu dans la colonne d'eau entre novembre et janvier. Les mâles meurent après l'accouplement. Les femelles, quant à elles, reconstruisent un nouveau tube pour couver leurs œufs. Elles incubent entre 12 et 71 œufs (avec une moyenne de 29 œufs par femelle) dans une poche ventrale appelée marsupium. Au bout de trois mois les juvéniles éclosent, quittent le tube et partent en construire un autre adapté à leur taille. A la libération des jeunes *Haploops*, les femelles meurent à leur tour (Rigolet *et al*., 2012 [Figure 4]).

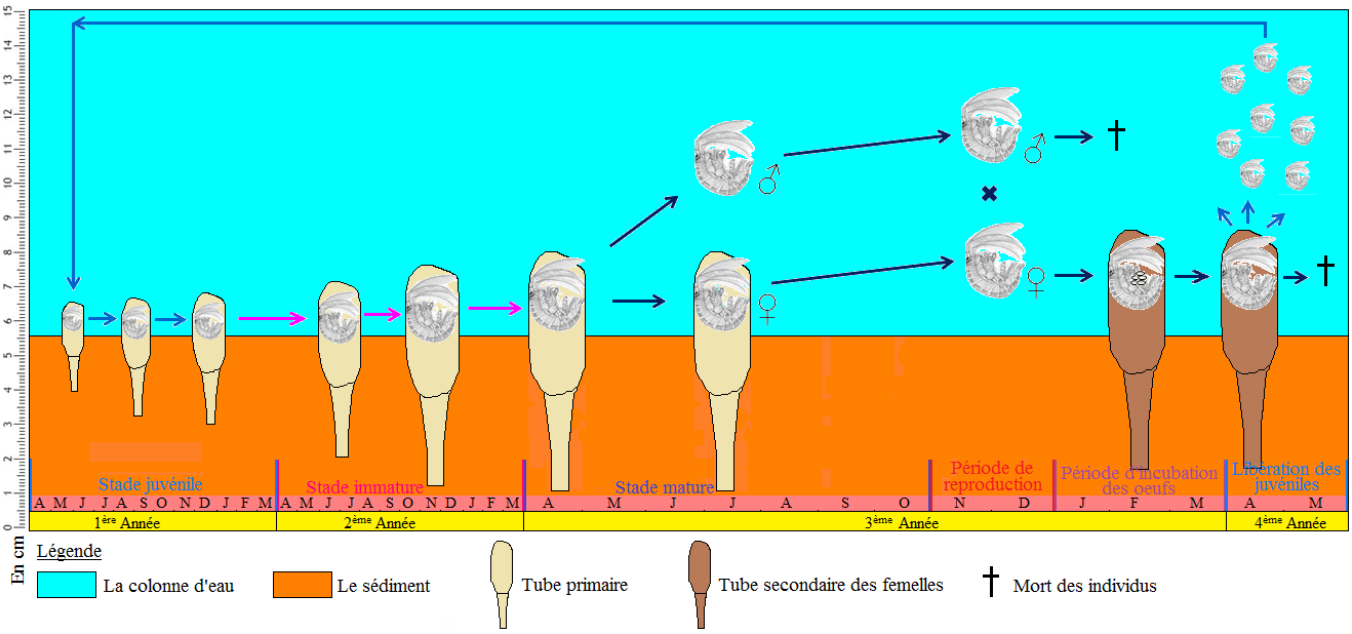

Figure 4 : Cycle de vie de *Haploops nirae* d'après Rigolet *et al.* (2012).

En baie de Concarneau des densités allant de 6800 à 25500 individus par mètre carré ont été observées (Rigolet *et al.*, 2012). Bien qu'il soit relativement commun de trouver des Ampeliscidés, il est néanmoins beaucoup plus rare de mettre en évidence de telles densités. Le peuplement d'*Haploops nirae* forme des tapis de tubes extrêmement denses (Figure 5). Ces massifs ainsi que la production de biodépots générés par l'activité de nutrition, contribuent activement à la modification de la texture du sédiment et l'exhaussement du fond (Glémarec et Grall, 2003).

Néanmoins ce peuplement n'est pas la seule particularité de ce site. En effet, en 2003, lors d'une campagne de suivis de la surveillance des peuplements macrobenthiques sur les côtes bretonne (REseau BENThique), un champ de pockmarks a été découvert.

Figure 5 : Photographie, prise par ROV, du peuplement à *Haploops nirae* en baie de Concarneau.

Les pockmarks sont des dépressions sédimentaires de forme généralement circulaire et de tailles variées (de quelques mètres à quelques centaines de mètres de diamètre) pour des profondeurs variant de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres. Ils correspondent à des figures d'échappement de fluides (Hovland *et al*., 2002) et se forment dans des sédiments à grain fins (vase). Ils existent aussi bien en domaine profond (Hovland et Judd, 1988) qu'en domaine côtier (Hill *et al*., 1991 ; Fleisher *et al*. 2001).

Ces structures ont été mises en évidence pour la première fois au large des côtes de la Nouvelle-Écosse (Canada) et décrits dans les années 1970 par Lew King et Brian MacLean.

Ses structures sédimentaires ont été et sont encore découvertes de nos jours grâce au développement de nouvelles techniques d'exploration notamment de l'imagerie sonar et des systèmes acoustiques multifaisceaux haute résolution.

Elles peuvent être observées sur l'ensemble des fonds marins associées à des environnements géologiques variés : région pétrolifère, région ayant un socle cristallin, estuaire, zone côtière, lac, zone d'activité hydrothermale et zone de circulation des eaux souterraines (Hovland *et al*., 2002). Les pockmarks sont donc présents dans les sédiments du quaternaire présentant une forte concentration en fluides et des caractéristiques physiques (finesse du grain et faible porosité) qui favorise l'échappement de ces fluides.

Les fluides responsables de ces dépressions peuvent être de différentes natures : des fluides thermogéniques (principalement du gaz), des gaz biogéniques, des gaz volcaniques ou

hydrothermaux ou des eaux souterraines (Hovland et Judd, 1988). Les gaz présents dans les profondeurs de la terre sont principalement composés de méthane et de dioxyde de carbone. Le méthane peut avoir deux origines soit thermogénique (i.e. produit par des réactions chimiques entre les sédiments) soit biogénique (i.e. produit par la dégradation de la matière organique par les bactéries). La remontée des fluides (gaz et liquide) dans les sédiments se fait grâce à des chemins préexistants (vides) tels que des failles ou des interstices dans les strates sédimentaires (Hovland et Judd, 1988). Cette migration peut-être engendrée par des secousses sismiques, une anomalie de température et de salinité ainsi que par une variation de la pression hydrostatique (Hovland *et al*., 2005).

En ce qui concerne leur mode de formation et leur taux d'activité, ils ne sont toujours pas bien identifier (Rodgers *et al*., 2006 ; Weeb, 2009). Il existe de nombreux mécanismes associés à cette genèse qui peuvent cependant être décomposé en deux hypothèses de formation. La première considère une formation lente et plus ou moins continue des pockmarks (King et Maclean, 1970 ; Johenhans *et al*., 1978 ; Çiftçi *et al.*, 2003 ; Sultan *et al.*, 2010) et la seconde une formation soudaine et brève (Hovland *et al*., 2005 ; Nakajima *et al*., 2013).

Dans la baie de Concarneau le champ de pockmarks couvre une zone bien délimitée de 36 kilomètre carré et est caractérisé par des densités remarquables pouvant atteindre 2500 pockmarks par kilomètre carré. Ces densités sont beaucoup plus élevés que ceux rapportés pour d'autres sites en eau peu profonde comme par exemple les rías galiciennes au Nord-Ouest de l'Espagne (García-García *et al*., 1999 ; Ferrín *et al*., 2003).

Ces pockmarks auraient un mécanisme de formation en lien avec leur environnement géologique, plus précisément avec le réseau de paléovallées présent dans la région. En effet, les deltas en période de bas niveau marin accumulent les sédiments terrigènes transportés par les rivières. Au court de la remontée du niveau des océans, ces sédiments riches en matières organiques sont piégés par l'accumulation sédimentaire et ainsi préservés de l'oxydation. Après la dégradation de la matière organique le gaz résultant a tendance à migrer dans les sédiments supérieurs. Des analyses sur l'eau interstitielle de carottage ont confirmé la présence de méthane dissous. Les fluides en baie de Concarneau seraient donc du méthane biogénique (Ehrhold *et al.*, 2007 ; Baltzer *et al.*, 2014).

Les premières études ont également permis de différencier deux groupes de pockmarks. Un groupe de pockmarks de petites tailles (inférieur à 10 mètres de diamètre) qui semblent avoir une origine liée à un réflecteur sismique peu profond (inférieur à deux mètres de profondeur), alors que ceux de plus grandes tailles (entre 10 et 30 mètres de diamètre) correspondent à un

réflecteur plus profond (six mètres environ) qui est caractéristique du remplissage sédimentaire des paléo-vallées incisées du quaternaires (Baltzer *et al*., 2014).

L'originalité de la présence de ces structures est en baie de Concarneau accentuée par le fait qu'elles coïncident précisément avec l'aire de répartition de *Haploops nirae.* Cette association originale entre un peuplement du genre *Haploops* avec des densités très importante (supérieur à 10 000 individus par mètre carré) et des pockmarks a également été observée en baie de Fundy (au Canada) avec l'espèce *Haploops fundiensis* (Wildish, 1984) et dans l'Øresund, le détroit entre le Danemark et la Suède, avec *Haploops tubicola* et *H. tenuis* (Petersen, 1913, 1924). Néanmoins elle n'a pas fait l'objet d'étude approfondie.

Différents travaux de recherches ont tenté d'établir un lien entre la présence de pockmarks et les communautés benthiques de leur zone d'étude respective. Ces analyses ont envisagés deux cas de figures. Dans un premier cas, les pockmarks libèrent des quantités importantes de méthane. Les communautés benthiques sont donc liées à ces suintements et sont composés d'animaux possédant des bactéries symbiotiques sulfato-réductrices (Dando *et al.*, 1991 ; Sibuet et Olu, 1998). Ces écosystèmes sont décrits comme ressemblant à celui des suintements froids (Hovland *et al.*, 2005). De plus les suintements de méthane peuvent entrainer la formation de dalle de carbonate (principalement d'aragonite) qui permettent l'installation de bactéries filamenteuses qui vont servir de nourriture à une macrofaune diversifiée. Elles deviennent ainsi le premier maillon d'une chaine alimentaire assez développée (Hovland *et al.*, 2005 ; Sorbe *et al*., 2010).
Dans un second cas, les rejets gazeux sont limitées ou inexistants et la composition des peuplements n'est pas affectée par cette structure sédimentaire (Webb, 2009 ; Sorbe *et al*., 2010). Les seules modifications résident dans les densités de certaines espèces clés entre l'intérieur et l'extérieur des pockmarks (Webb, 2009).

En baie de Concarneau, les origines de l'association et les liens de causalité entre les pockmarks et le peuplement à *Haploops* rentent encore à déterminer.
La thèse de Rigolet (2013) sur la biologie de *Haploops nirae* a permis d'exclure l'hypothèse d'une chimiosynthèse ou de l'existence d'une bactérie symbiotique pour expliquer l'association de cette espèce avec les pockmarks.

Une autre hypothèse pourrait expliquer cette relation. En effet, la turbidité engendrée par l'expulsion des fluides pourrait faciliterait la construction de leur tube en leur fournissant un sédiment très fin et mieux trié.

L'objectif de l'étude proposée est de comprendre la dynamique et l'évolution de l'activité des pockmarks, ainsi que l'influence de cette activité sur la bioconstruction des tubes de *Haploops nirae* en baie de Concarneau.

Les objectifs principaux de ce travail sont :

1. de définir et de comparer la répartition des pockmarks et de *H. nirae* à partir de données d'imagerie sonar de différentes campagnes (2003, 2009, 2011 et 2014).

2. de considérer l'évolution du champ de pockmarks à partir d'observations en surface et en profondeur. L'évolution en surface se focalisera sur l'apparition de nouveaux pockmarks et sur leur activité récente ou plus ancienne. Alors que les observations en profondeur se concentreront sur le remplissage sédimentaire et l'accumulation de gaz.

3. d'étudier le sédiment qui compose les tubes des *Haploops* en effectuant des analyses granulométriques et de le comparer aux sédiments en place, associés à ce peuplement. Le but est d'identifier l'origine des sédiments des tubes et d'évaluer l'influence des pockmarks sur cette activité biologique.

III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. Acquisition et traitements des données

Les données utilisées dans cette étude proviennent de quatre campagnes en mer :

- Campagne REBENT (REseau BENThique) de 2003 : elle a permis de mettre en évidence la présence de pockmarks dans la baie de Concarneau. Cela a été rendu possible par l'utilisation du sonar à balayage latéral (Edgetech DF1000). Cet engin a été tracté à une vitesse de 5 nœuds par le navire de l'IFREMER N/O Thalia. Elle s'est déroulée du 4 au 13 mars 2003 et a conduit à la conception d'une mosaïque d'imagerie sonar de la partie Nord de la baie de Concarneau.

- Campagne SEISPLOOPS (SEIStec-haPLOOPS) de 2009 : elle se décompose en deux séries d'acquisitions. La première de deux jours, le 25 et 26 mars 2009, à bord du N/O Thalia afin de réaliser des carottages et des prélèvements d'eau interstitielle par système de Rhizon. La seconde, du 12 au 14 avril 2009, à bord du N/O INSU Le Côte d'Aquitaine a permis d'acquérir de l'imagerie sonar à balayage latéral (Edgetech 270TD analogique) et sismique (Boomer Seistec IKB). Ces engins ont été tractés à une vitesse de 3,5 nœuds derrière le navire au cours de l'acquisition.

- Campagne POCK&PLOOPS (POCKmarks et haPLOOPS) de 2011 : elle a eu lieu du 13 au 20 avril 2011 à bord du navire V/O Haliotis et a permis l'acquisition de quatre boîtes non jointives. Ces données ont été obtenues grâce au sonar interférométrique. Ainsi, la bathymétrie et l'imagerie ont été acquises de manière simultanée et elles ont géoréférencées car le sonar est positionné sous la coque du navire.

- Campagne POCK&TIDE (POCKmarks et TIDE) de 2014 : elle s'est également déroulée à bord du navire V/O Haliotis, du 12 avril au 02 mai 2014. Elle a complété le jeu de données de 2011 et permet le suivi de certains profils. Le type d'acquisition est le même que celui de 2011. Des prélèvements à la benne Van Veen et des prospections avec le R.O.V. (Remotely Operated Vehicle) ont aussi été réalisés.

2. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae*

Ehrhold *et al.* (2007) avaient décrit une superposition précise de l'aire de répartition des *Haploops* avec celle des pockmarks. Souron (2009), a évalué les limites de cette zone à partir de donnée acquise en 2003 et 2009.

Aujourd'hui, la répartition des pockmarks et du peuplement de *H. nirae* ont été obtenues par l'analyse de l'imagerie sonar acquise en 2011 et 2014. Les données brutes ont été traitées avec le logiciel GeoTexture afin de générer des mosaïques d'images géoréférencées qui ont été exportées et interprétées à l'aide du logiciel ArcGis (Version 9.3). Les images présentent des nuances de gris correspondant à des variations de la bathymétrie, de la nature et de la compaction des sédiments. La présence d'*Haploops* augmente le taux de sédimentation ce qui accroit la topographie. Leur activité de bioconstruction modifie la nature et la compaction des sédiments associés. Par conséquent, ils apparaissent en patch plus sombre sur les images.
Ces variations de couleurs ont ainsi permis de tracer les contours précis de l'aire de répartitions de cette espèce.
Les pockmarks sont également visible sur les données d'imagerie. D'une manière similaire, leur zone de répartition a été appréhendée.

3. L'évolution des pockmarks dans deux zones d'études

L'évolution temporelle du champ de pockmarks a été envisagée. Cependant la base donnée était trop conséquente pour pouvoir analyser la totalité de l'aire délimitée dans le temps imparti. L'étude s'est donc focalisée sur deux zones (Figure 6). La première (Zone A) a une surface de 0,66 kilomètre carré. Elle se situe au Nord de l'aire de répartition des *Haploops* et se particularise par la présence d'un alignement de pockmarks dont l'activité aurait été déclenchée par le passage d'un chalut. Cette disposition remarquable est facilement observable en imagerie et en bathymétrie.

La zone B a quant à elle été sélectionnée au cours de la campagne POCK&TIDE (2014). Après des observations préliminaires, cette zone semblait présenter d'importants changements par rapport aux données des campagnes précédentes. Elle est situé en bordure Est de l'aire de répartition décrite par Souron (2009) et mesure 1,6 kilomètres carré.

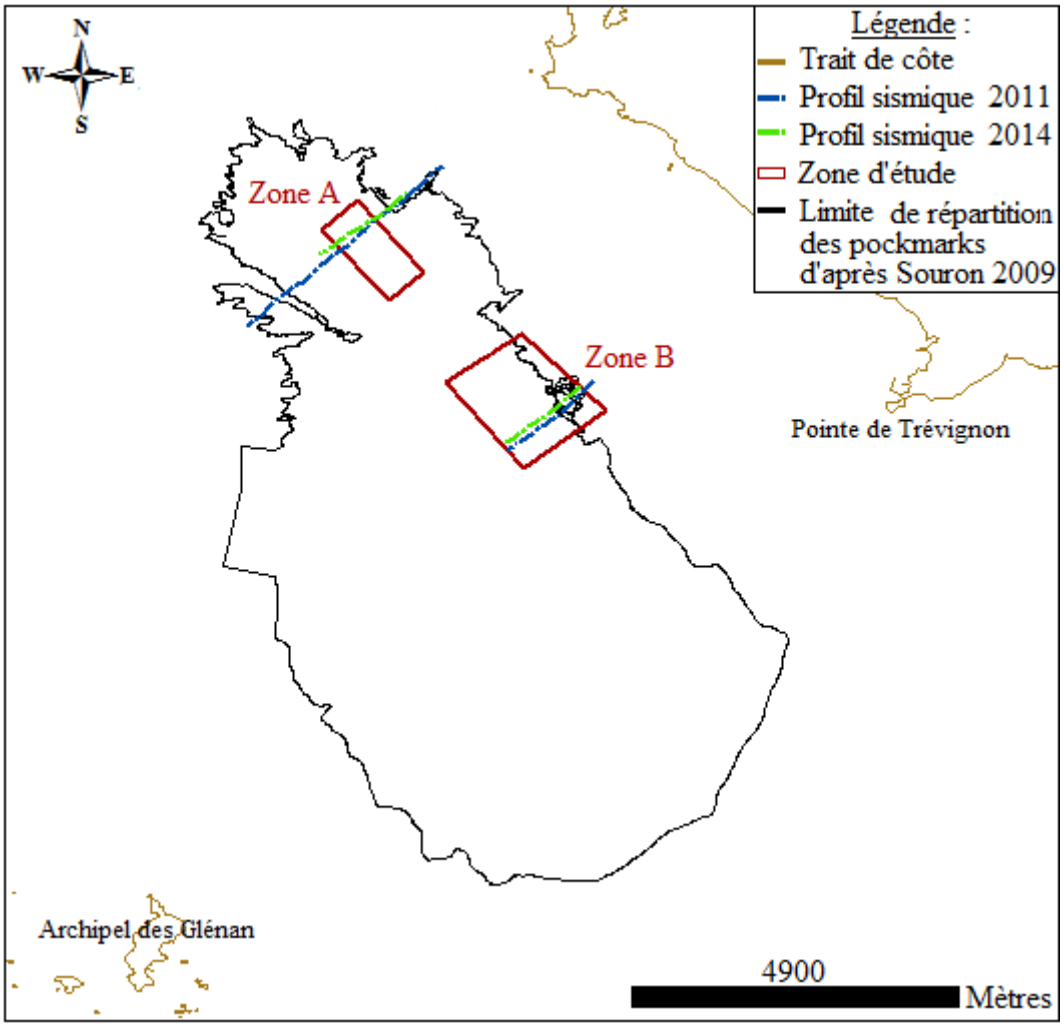

Figure 6 : Localisation des deux zones et des profils sismiques sélectionnés pour cette étude.

Afin d'appréhender l'évolution des pockmarks dans ces deux zones, différentes données ont été utilisées. Une évaluation des évolutions de surface a été possible grâce à la bathymétrie acquise en 2011 et en 2014, et traitée à l'aide du logiciel CARAIBE (IFREMER). Elle a été complétée par des mosaïques d'imagerie sonar obtenues en 2003, 2009, 2011 et 2014. Cependant, la qualité des images de 2011 pour la zone A étaient de trop mauvaise qualité (pour des raisons météorologiques) pour être interprétées et le plan d'échantillonnage de 2009 ne recouvrait pas la zone B. Deux logiciels de traitement d'image ont été utilisés : IsisSonar (TritonElics) pour les données de 2003 et 2009 et SonarScope (IFREMER) pour celles de 2011 et de 2014.

L'évolution en profondeur a été rendue possible par l'utilisation de la sismique réflexion haute résolution. Ces données ont été acquises au cours des campagnes de 2011 et 2014 et traitées par le logiciel SUBOP (IFREMER).

Des faciès particuliers ont été mis en évidence et ont été prospectés par des observations vidéo (R.O.V.) et des prélèvements à la benne Van Veen.

4. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae*

4.1 Plan d'échantillonnage

L'étude granulométrique du sédiment constituant l'habitat et les tubes de *Haploops nirae* a été réalisée grâce à des prélèvements faits le 21 et 24 avril 2014 lors de la campagne POCK&TIDE. Elle a pour but de caractériser ces sédiments et de découvrir s'ils présentent des différences.

Le plan d'échantillonnage a été dressé à la suite des résultats de l'analyse de carottes faite par Souron (2009). Ainsi trois stations ont été choisies suivant un gradient de densité des pockmarks et de stabilité temporelle des populations de *Haploops* c'est-à-dire l'âge de l'installation des colonies. Ces paramètres sont qualitatifs, ils se réfèrent à des estimations.

Afin de vérifier le matériel et de tester notre protocole une quatrième station a pu être ajoutée à notre étude. Cependant seule la densité de pockmark est connue pour celle-ci. Les caractéristiques pour chaque station sont présentées dans le tableau 1et l'Annexe 2.

Les prélèvements ont été échantillonnés à l'aide d'une benne Van Veen (prélevant une surface unitaire d'environ 0,1m^2) à raison de trois réplicats par station.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations échantillonnées.

Station	Coordonnées	Date	Profondeur	Coefficient de marée	Température Surface	Densité en pockmarks	Stabilité de la population
1	47°49'159 N -3°56'117 W	21/04/2014	26m	66/60	12,6°C	Moyenne (Entre 200-1000 figures/km^2)	Non renseignée
2	47°46'246 N -3°54'137 W	24/04/2014	30m	54/58	12,8°C	Moyenne (Entre 200-1000 figures/km^2)	Ancienne
3	47°44'104 N -3°54'720 W	24/04/2014	36m	54/58	12,8°C	Forte (> à 1000 figures/km^2)	Moyenne
4	47°45'637 N -3°54'579 W	24/04/2014	31m	54/58	12,8°C	Faible (< à 200 figures/km^2)	Récente

4.2 Traitement du matériel sédimentaire

A bord le sédiment qui caractérise l'habitat des *Haploops* a été prélevé directement à la sortie de la benne dans trois piluliers (d=3 centimètres, h=5 centimètres, v=141 centimètres cubes). Deux ont été utilisé pour les analyses et le dernier conservé pour les archives. Le reste du matériel sédimentaire a fait l'objet d'un tamisage, sur un tamis de maille carrée de deux millimètres, afin de ne récupérer que les tubes de *Haploops nirae*.

Au laboratoire les tubes ont été triés. Ainsi, 15 tubes d'individus adultes (immatures et/ou matures) et 30 tubes d'individus juvéniles ont été sélectionnés par réplicat (Annexe 1). Les tubes devaient être les plus entiers et les plus représentatifs possibles.

Le traitement suivant a eu pour but de séparer les sédiments du mucus des tubes. Le protocole a été conçu de façon empirique et a été inspiré des traitements effectués sur *Lanice conchilega* (Fournier *et al*., 2012) car la granulométrie des sédiments des tubes n'était pas renseignée dans la littérature. Ce type de manipulation n'avait donc pas été entrepris auparavant. Les tubes des individus adultes sont ouverts en deux puis rincés à l'eau déminéralisée pour éliminer d'éventuel résidu de sédiment associé. Au vu de la fragilité des tubes de juvéniles, ils ont été simplement rincés à l'eau déminéralisée. Ensuite les tubes ont été mis dans une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2 [à 120 Volumes soit 35 pourcent]) pendant trois heures avant d'être mis au four à thermostat 1 (40 degrés Celsius) durant 30 minutes. Le peroxyde d'hydrogène est un acide faible, qui au contact du mucus (une chaîne de macromolécules de sucres) entraine une hydrolyse acide. Cette réaction permet la libération du sédiment qui s'est déposé au fond du récipient. Le mucus quant à lui est resté en surface. Un écumage a donc été nécessaire pour le retirer. Le sédiment des tubes a ensuite été récupéré puis rincé à l'eau déminéralisée.

En ce qui concerne le sédiment associé, la première fraction est simplement rincée à l'eau déminéralisée alors que la seconde a subi le même traitement que les tubes.

Pour le stockage tous les sédiments sont mis dans des piluliers étiquetés avec de l'eau déminéralisée.

L'analyse granulométrique du sédiment a été effectuée avec un granulomètre laser (Beckman Coulter LS230) au laboratoire Géosciences Marines au Centre IFREMER de Brest. Basé sur le principe de la diffraction de la lumière, les grains en suspension dans l'eau diffractent une lumière émise par un faisceau laser. La taille des particules modifie la répartition spatiale de la lumière qui est enregistrée par des photodiodes. La proportion de chaque classe dimensionnelle est alors déterminée. Cette méthode, très précise, est toutefois limitée par la

longueur d'onde du faisceau laser et par la transparence des grains. Elle a été choisie car elle permet la mesure de tailles de particules fines comprises entre 0,375 et 2000 micromètres et se fait par voie humide ne nécessitant pas le séchage préalable du sédiment. Le sédiment a été remis en suspension par agitation magnétique puis prélevé grâce à une micropipette. Le volume du prélèvement dépend de la nature du sédiment. Pour chaque échantillon deux ou trois mesures ont été réalisées.

4.3 Traitement statistique

Le traitement numérique des résultats bruts, fournis par le granulomètre laser, a pour but de définir, par l'emploi de paramètres spécifiques, l'échantillon étudié.

Nos échantillons ont été traités à l'aide du logiciel GRADISTAT Version 8.0 (© Blott, 2010) selon la méthode géométrique de Folk et Ward (1957). Les quatre paramètres qui en résultent sont illustrés dans l'annexe 3 et sont définit ci-dessous :

- Le grain moyen (GM - *mean*) correspond à la moyenne des tailles des grains. Il est calculé par la formule suivante : $\mathrm{GM} = \exp \frac{\ln P_{16} + \ln P_{50} + \ln P_{84}}{3}$

(P_{16} : diamètre des particules, en unités P, correspond à un pourcentage pondéral de 16%)

- L'indice de classement (SO - *sorting*) indique la dispersion des tailles de grain de l'échantillon par rapport à la moyenne, définissant ainsi le tri des sédiments lors de son transport ou de son dépôt. Il se calcule de la façon suivante : $\mathrm{SO} = \exp\left(\frac{\ln P_{16} - \ln P_{84}}{4} + \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{6.6}\right)$

- Le coefficient d'acuité (K - *kurtosis*) mesure la forme du pic de la courbe de distribution des sédiments. Il est déterminé par la formule suivante : $K = \frac{\ln P_5 - \ln P_{95}}{2.44\left(\ln P_{25} - \ln P_{75}\right)}$

- Le coefficient de dissymétrie (SK - *skewness*) renseigne sur l'asymétrie de la courbe de distribution granulométrique par rapport à la valeur de la moyenne. Il est donné par la formule suivante : $Sk = \frac{\ln P_{16} + \ln P_{84} - 2\left(\ln P_{50}\right)}{2\left(\ln P_{84} - \ln P_{16}\right)} + \frac{\ln P_5 + \ln P_{95} - 2\left(\ln P_{50}\right)}{2\left(\ln P_{95} - \ln P_5\right)}$

Afin de représenter graphiquement les corrélations entre ces paramètres, une analyse en composante principale (A.C.P.) a été effectuée à l'aide du logiciel R. Elle a permis de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Les paramètres sélectionnés sont le grain moyen, l'indice de classement et le coefficient d'acuité. Les terminologies, définit par le logiciel GRADISTAT et qui sont reprises dans ce rapport, sont classées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Les classifications utilisées par le logiciel GRADISTAT Version 8.0. Les catégories sédimentaires sont adaptées d'après Udden (1914) et Wentworth (1922), l'indice de classement et le coefficient d'acuité sont dérivés d'après les mesures graphiques de Folk et Ward (1957).

Grain Moyen (en µm)		**Indice de classement**		**Coefficient d'acuité**	
GM - *Mean*		**SO - *Sorting***		**K - *Krutosis***	
Blocs	> 64000	Très bien trié	< 1,27	Très platykurtique	< 0,67
Graviers	[2000 ; 64000[	Bien trié	[1,27 ; 1,41[	Platykurtique	[0,67 ; 0,90[
Sables très grossiers	[1000 ; 2000[	Modérément bien trié	[1,41 ; 1,62[	Mésokurtique	[0,90 ; 1,11[
Sables grossiers	[500 ; 1000[			Leptokurtique	[1,11 ; 1,50[
Sables moyens	[250 ; 500[	Modérément trié	[1,62 ; 2,00[	Très leptokurtique	[1,50 ; 3,00[
Sables fins	[125 ; 250[	Mal trié	[2,00 ; 4,00[	Extrêmement leptokurtique	> 3,00
Sables très fins	[63 ; 125[	Très mal trié	[4,00 ; 16,00[		
Silt très grossiers	[31 ; 63[	Extrêmement mal trié	> 16,00		
Silt grossiers	[16 ; 31[				
Silt moyens	[8 ; 16[				
Silt fins	[4 ; 8[				
Silt très fins	[2 ; 4[				
Argiles	< 2				

Les hypothèses envisagées dans cette étude sédimentaire portent sur les différences entre :

- le sédiment associé et le sédiment associé ayant subi le traitement au peroxyde d'hydrogène ;
- le sédiment associé et celui des tubes ;
- le sédiment des tubes des adultes et des juvéniles ;
- les stations suivant la densité en pockmarks et la stabilité temporelle des populations de *H. nirae*.

Ces différences ont été testées en utilisant soit une ANOVA (A), soit des tests de Kruskall-Wallis non paramétriques (KW). L'application de l'ANOVA nécessite la normalité de la distribution et l'homoscédasticité des échantillons. Par conséquent les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été vérifiées respectivement par les tests de Shapiro-Wilk (W) et de Bartlett (K). En cas d'analyse globale significative, les comparaisons post-hoc ont été effectuées par le test de Tukey ou des tests de comparaison multiple non paramétriques.

La p-value pour les erreurs de type I (i.e. quand le test statistique mène à rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie) est fixé à 0,5 pourcent.

IV. RÉSULTATS

1. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae*

L'aire de répartition des pockmarks coincide précisément avec celle des *H. nirae*. Cette zone couvre une surface de 38,5 kilomètre carré. Elle est allongée dans la direction Nord-Sud avec une extremité Sud plus évasé (Figure 7). Ses limites Nord et Sud se situent aux latitudes 47°49'48''N et 47°43'35''N repectivement et ses limites Ouest et Est se situent au longitudes -3°56'45''O et -3°52'O respectivement. La profondeur augmente vers le Sud et le peuplement à *H. nirae* est trouvé entre environ 22 mètres et 36 mètres de profondeur.

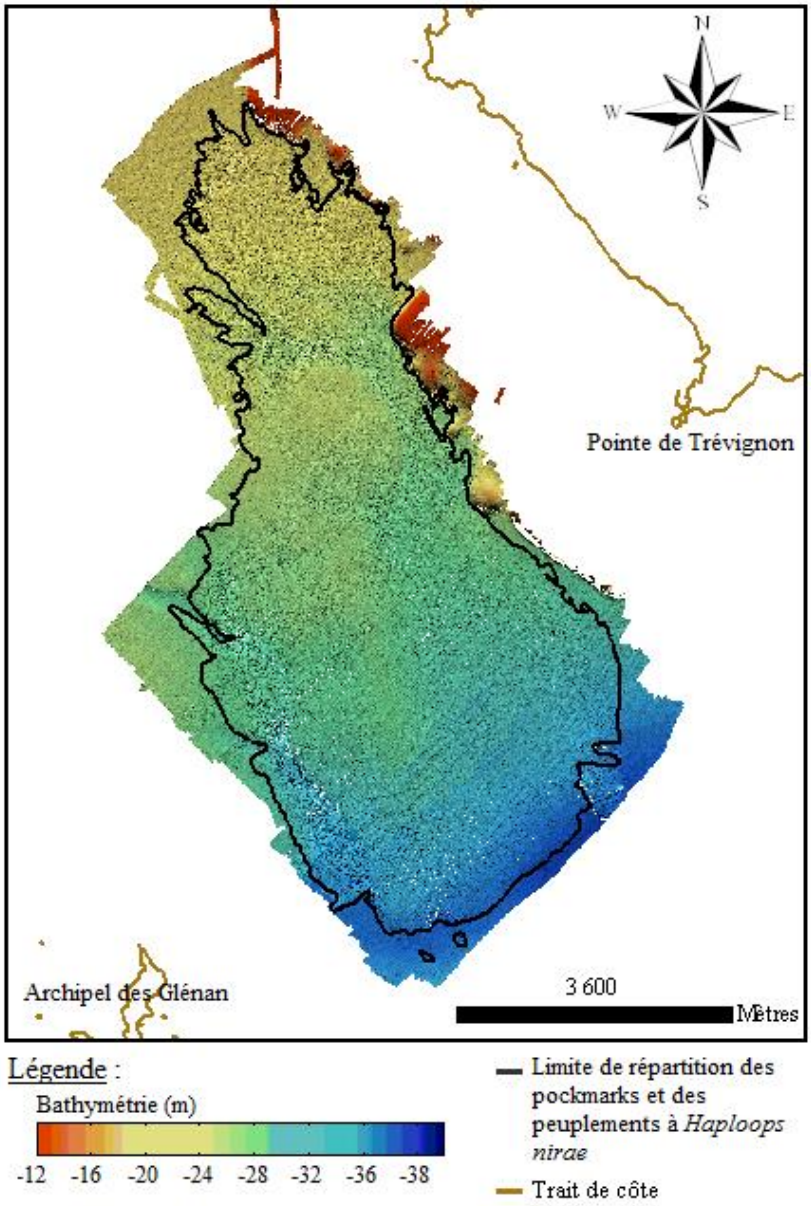

Figure 7 : Limite de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae* en baie de Concarneau.

2. L'évolution des pockmarks dans les deux zones étudiées

2.1. Zone A

La zone A se situe à une profondeur comprise entre 24 mètres et 26 mètres. Deux alignements parallèles de pockmarks de direction Nord-Ouest/Sud-Est sont clairement visibles en 2011 et 2014 (Figure 8).

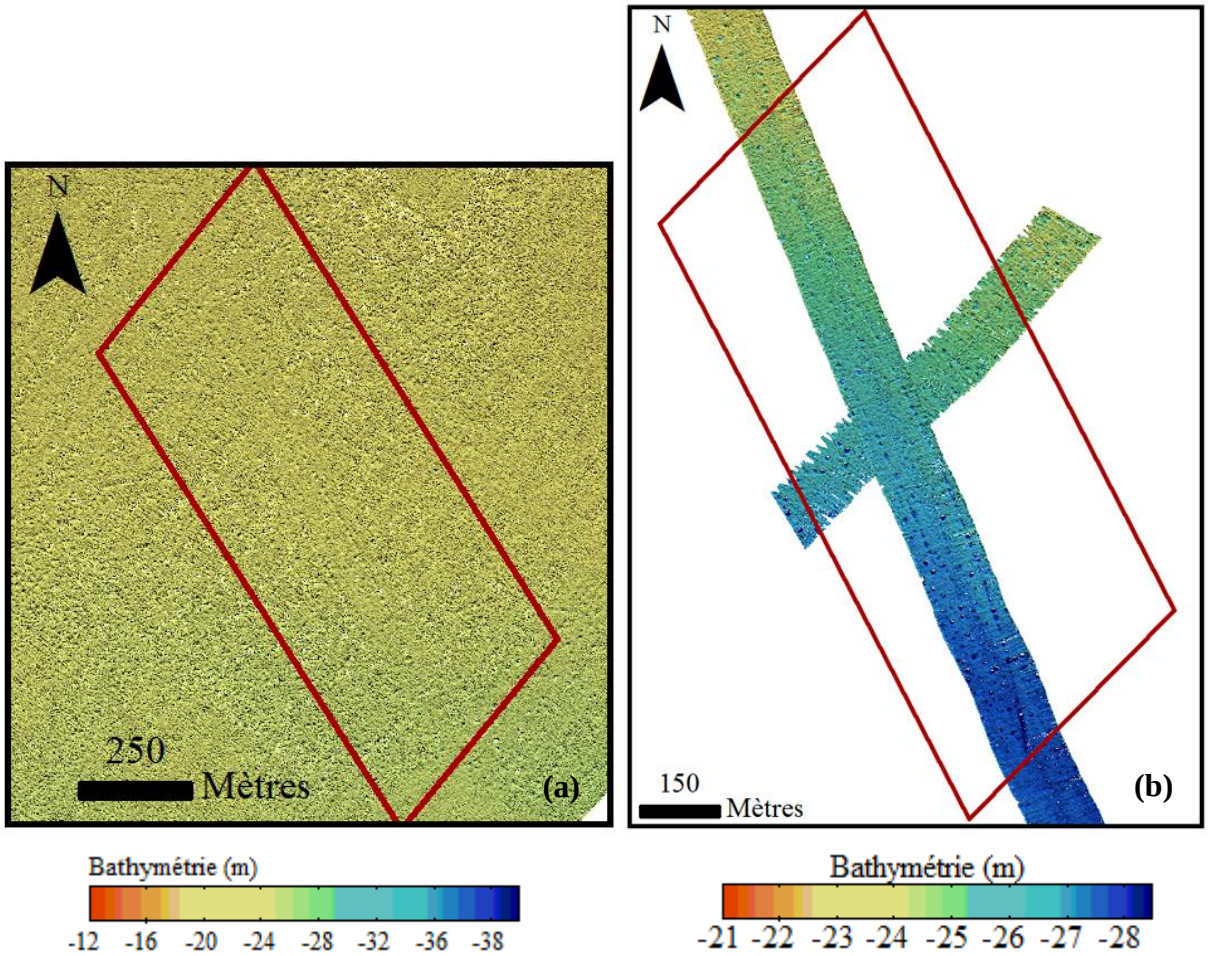

Figure 8 : Carte bathymétrique de la zone A en (a) 2011 et (b) 2014.

Ces traces de chalutage sont déjà présentes en 2003 et 2009 comme le soulignent les imageries sonar (Figure 9). Ces pockmarks sont comblés par des particules fines qui les font apparaitre de couleur blanche. La présence de dépôts sédimentaires à l'intérieur des cratères laisse penser que ces structures n'ont pas subi d'événement d'expulsion de fluide depuis ce remplissage.

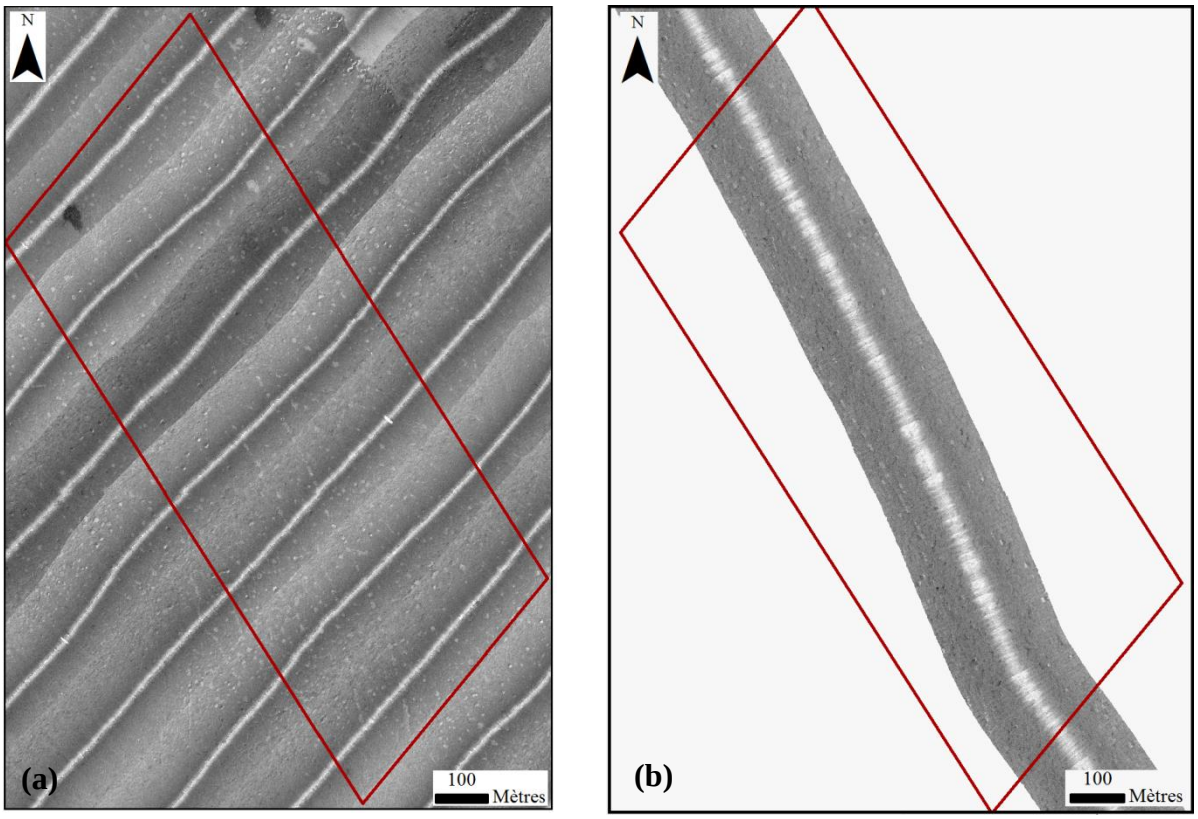

Figure 9 : Imagerie sonar de la zone A en (a) 2003 et (b) 2009.

La majorité des pockmarks présents dans la zone A en 2003 et 2009 semblent être eux aussi en phase de comblement par des sédiments fins.

L'imagerie sonar de 2014 après traitement est très claire. L'interprétation de ces images ne peut donc être qu'indirect et se faire pas l'observation des formes des pockmarks et non pas par les couleurs. La majorité des formes de ces structures n'est pas circulaire et les contours sont déformés (ils sont plus évasés). Ces deux critères sont des indices d'une formation ancienne et indiquent que l'activité d'explusion des fluides a cessé depuis suffisamment longtemps pour que les reliefs des pockmarks aient été érodés. Ainsi la tendance décrite pour 2003 et 2009 se poursuit en 2014 (Figure 10).

Au vu des données récoltées, il ne semble pas y avoir de changement dans le nombre et l'activité des pockmarks.

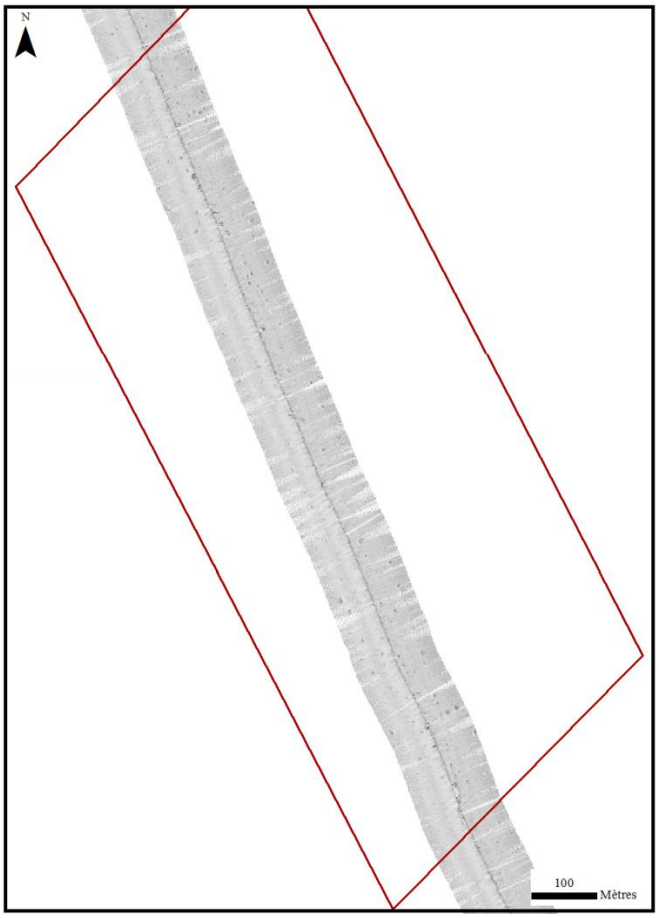

Figure 10 : Imagerie sonar de la zone A en 2014.

Les profils de sismique réflexion traversent de part en part la zone de répartition des pockmarks comme le présente la Figure 11. Ils sont orientés Sud-Ouest/Nord-Est.

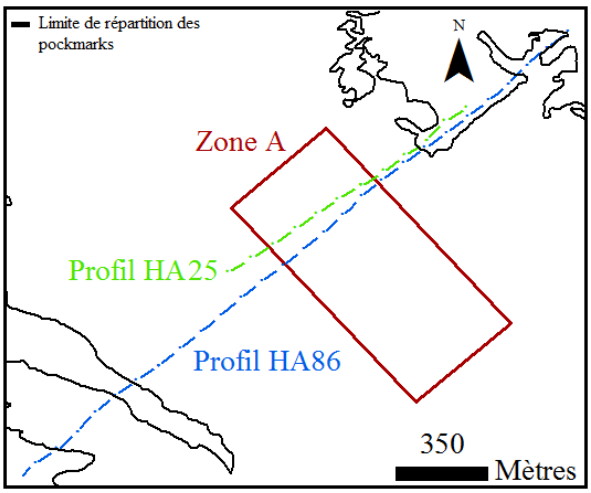

Figure 11 : Localisation des profils sismiques de la zone A.

Le profil HA86 de 2011 montre quatre faciès. Un premier faciès sourd possédant une limite supérieure qui correspond au socle cristallin. La structure de ce socle met en évidence la présence d'une paléo-vallée. A l'intérieur de cette paléo-vallée est présent deux faciès, l'un lité et l'autre sourd n'ayant pas de limite supérieure. Le faciès lité correspond à un remplissage de la paléo-vallée par différentes strates de sédiments et le faciès sourd correspond à des réservoirs de gaz. Proche de l'interface eau-sédiment, un faciès lité apparait. Il représente les dépôts sédimentaires du quaternaire et présente un réflecteur noir qui est composé d'une couche de particules très fines. Cette strate bloque la migration des fluides vers la surface (Figure 12 (a)).

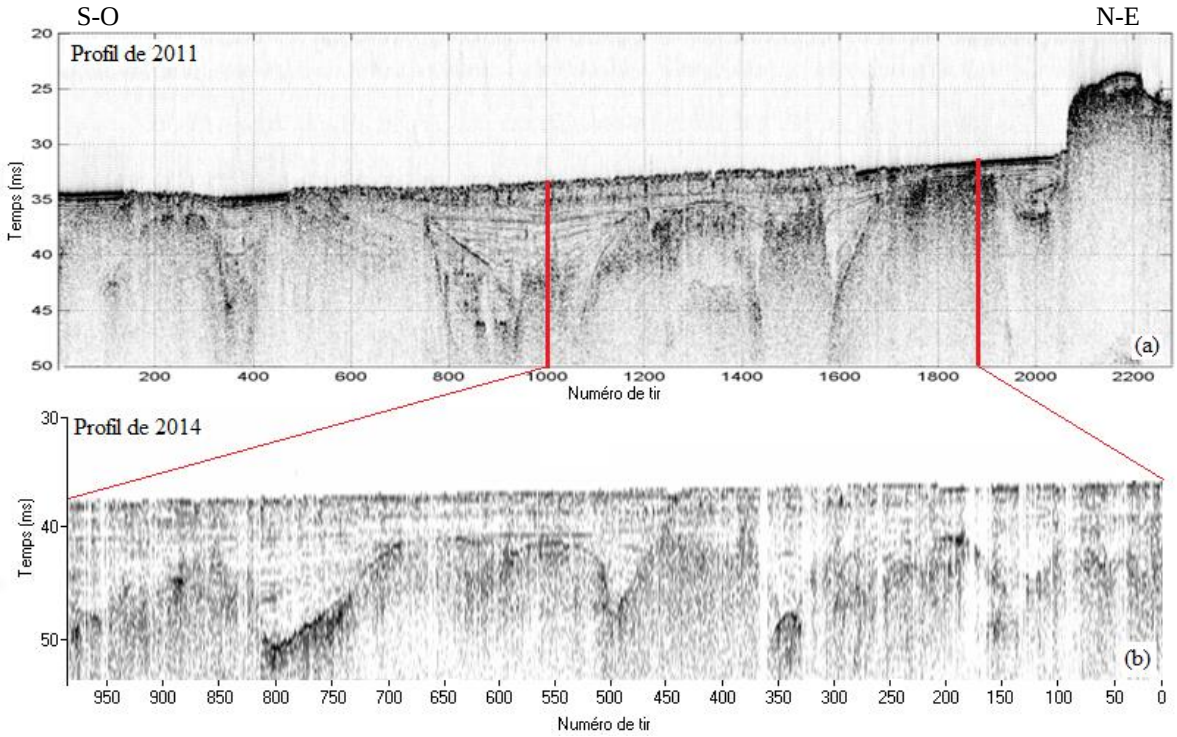

Figure 12 : Profils sismiques de la zone A. Le profil (a) correspond au profil HA86 de la campagne POCK&PLOOPS de 2011 et le profil (b) correspond au profil HA25 de la campagne POCK&TIDE de 2014. L'unité de temps est en temps double.

Ces différents faciès se retrouvent dans le profil HA25de 2014 avec la même structuration. Le remplissage sédimentaire et les réservoirs de gaz ne présentent pas de modification majeure par rapport à 2011 (Figure 12 (b)).

2.2. Zone B

La zone B couvre un plateau rocheux s'élevant jusqu'à 12 mètres environ et le fond sédimentaire est compris entre 26 mètres et 28 mètres environs. Cette zonne présente en son centre un couloir entre le plateau rocheux et un réhaussement sédimentaire. Cette morphologie indique la présence d'une paléo-vallée. Au Sud-Est de la zone d'étude, de large dépressions plus profondes sont observées (Figure 13). La forme globale de ces dépressions reste inchangées au cours du temps. La profondeur semble généralement plus faible en 2014 par rapport à 2011.

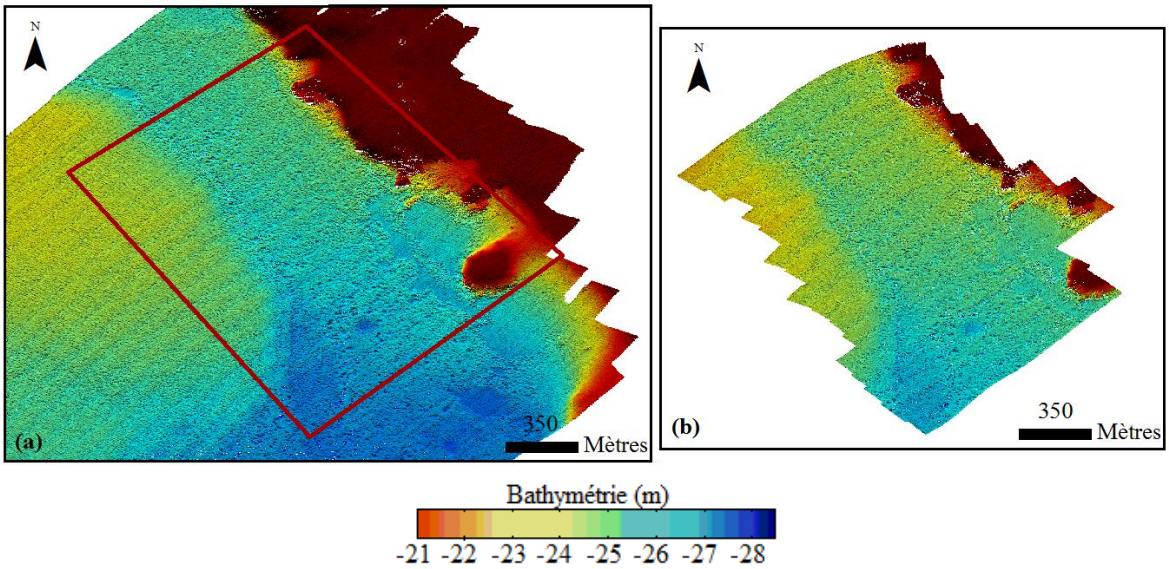

Figure 13: Carte bathymétrique de la zone B en 2011 (a) et en 2014 (b).

Les images sonar permettent de différencier deux groupes de pockmarks aux activités constantes au cours du temps (2003, 2011 et 2014). Le premier, au sein du « couloir » est composé de pockmark en phase de comblement par des sédiments fins (couleur blanche). Le second, situé à la limite du rehaussement sédimentaire au Sud-Ouest est constitué par des pockmarks ayant eu une activité récente (circulaire et de couleur noire [Figure 14]).

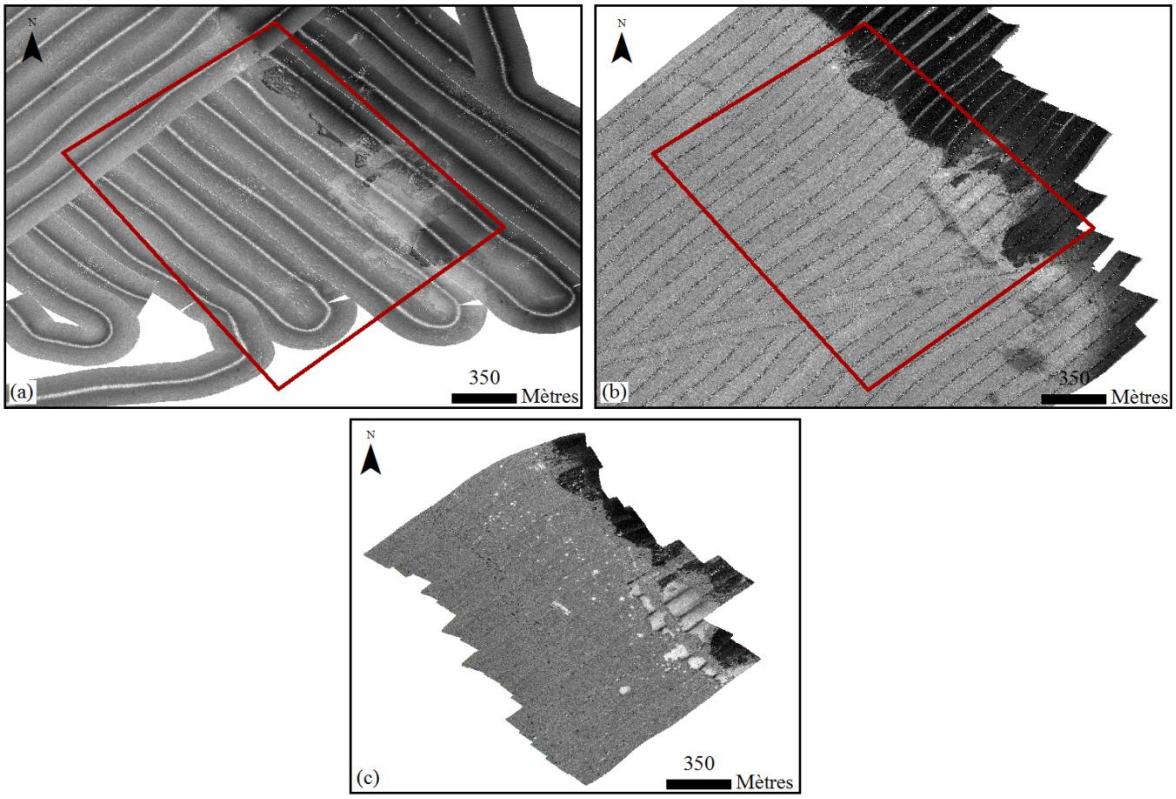

Figure 14 : Imagerie sonar de la zone B en 2003 (a), en 2011 (b) et en 2014 (c).

Les dépressions observées en bathymétrie sont clairement exposées sur les mosaïques d'imagerie sonar. En 2003, elles étaient remplies de sédiments fins dont les caractéristiques de réflexion étaient comparables à ceux présents dans les pockmarks inactif. En 2011, la couleur sombre enregistrée pour ces zones indique une absence de comblements. Ce sédiment fin réapparait sur les images de 2014, et ne se limite plus aux dépressions mais semble napper les fonds alentours.

Les photos et vidéos de ce sédiment capturées par le R.O.V., révèlent une vase fluide en surface (Figure 15). Les résultats de l'analyse granulométrique d'échantillons, caractérisent ce sédiment en tant que silt très grossier (GM = 31,260µm ± 2,288µm).

Figure 15 : Photographie prise par un R.O.V. des sédiments comblant les dépressions du Sud-Est de la zone B.

Les profils de sismique réflexion traversent les différents faciès morpho-sédimentaires qu'offre cette zone d'étude (un plateau rocheux, le « couloir » et le rehaussement sédimentaire ainsi que les grandes dépressions) comme le présente la Figure 16. Ils sont orientés Sud-Ouest/Nord-Est.

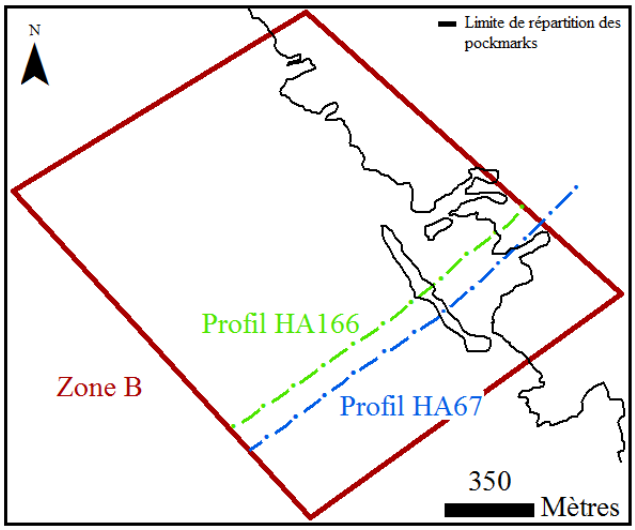

Figure 16 : Localisation des profils sismiques de la zone B.

Les profils HA67 de 2011 et HA166 de 2014 montrent une structuration similaire à celle de la zone A. La zone B est dans le prolongement de la paléo-vallée décrite précédemment et possède les mêmes caractéristiques morpho-sédimentaires générales. Une évolution dans la composition en gaz du fond est visible entre 2011 et 2014. En effet, au Sud-Ouest du profil,

un masque de gaz disparait entre ces deux dates prouvant la libération de fluides dans la masse d'eau (Figure 17).

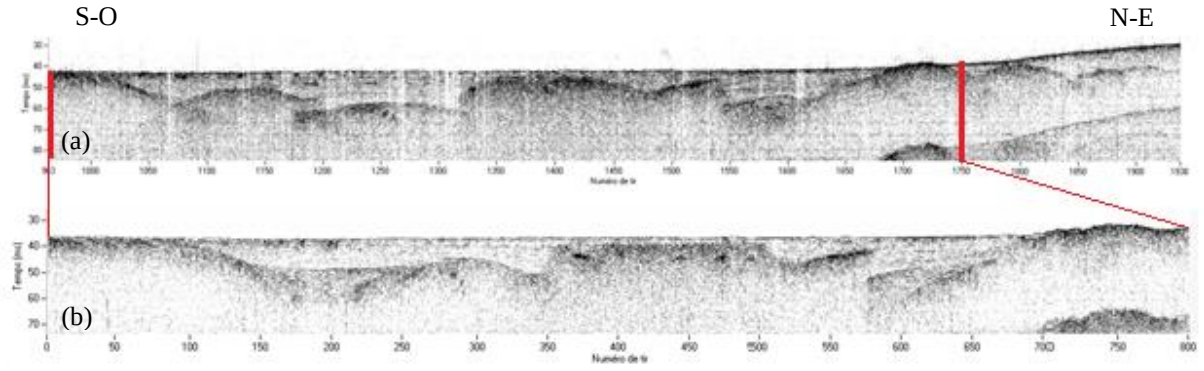

Figure 17 : Profil sismique de la zone B. Le profil (a) correspond au profil HA67 de la campagne POCK&PLOOPS de 2011 et le profil (b) correspond au profil HA166 de la campagne POCK&TIDE de 2014. L'unité de temps est en temps double.

Ces profils ne mettent pas en évidence les différents épisodes de remplissage et de migration de la vase fluide qui ont été observés par imagerie.

3. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae*

Le paramètre caractérisant le Grain moyen (GM) est présent sur l'axe CP1 dans le nuage de point des échantillons mesurés, c'est pourquoi il n'est pas visible sur ces représentations graphiques (Figure 18).

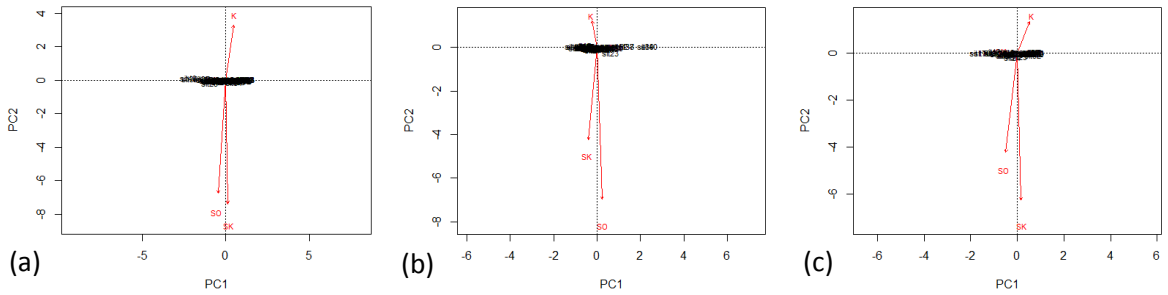

Figure 18: Représentations graphiques des analyses en composantes principales (A.C.P.). (a) de la totalité des données ; (b) des données sur le sédiment associé ; (c) des données sur le sédiment des tubes. GM : Grain moyen ; K : Kurtosis ; SK : Skewness ; SO : Sorting.

Dans les trois cas étudiés, le résultat de l'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) met en évidence une corrélation positive (les deux droites sont dirigées vers le bas) entre le

Skewness (SK) et le Sorting (SO). Dans la suite de l'analyse, seuls les résultats du Sorting seront discutés.

Cette A.C.P. montre une corrélation négative (les droites ont des directions opposées) entre le Kurtosis (K) et la paire Skewness et Sorting. Aucune corrélation (droites perpendiculaires) ne lie le grain moyen à un autre paramètre.

Les résultats des tests de Shapiro et de Bartlett sont présentés dans l'Annexe 4.

L'analyse granulométrique montre que les échantillons sont compris dans la catégorie des silts allant de silts fins à silts grossiers (de 19,988µm [± 4,853µm] à 8,874µm [± 1,992µm]). L'indice de classement est compris entre 3,968 (± 0,351) et 3,184 (± 0,393). Il indique donc que les sédiments sont mal triés. En ce qui concerne le coefficient d'acuité, il varie de 1,062 (± 0,079) à 0,875 (± 0,037). Par conséquent les sédiments ont une distribution soit platykurtique soit mésokurtique (Tableau 3).

Des différences entre le sédiment associé (SA) et le sédiment associé ayant subi le traitement au peroxyde d'hydrogène (SAO) sont apparues (Tableau 4). Le SAO est caractérisé par un grain moyen significativement plus élevé (KW : $\chi_{2(1,\ 56)} = 4{,}577$, $p<0{,}05$) et une distribution significativement moins étendue (A : $F_{(1,\ 56)} = 10{,}800$, $p<0{,}01$) que le SA (Tableau 3 et 4). Les deux sédiments sont mal triés et n'ont pas de différences au sein du SO (Tableau 3 et 4).

Tableau 3 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres décrivant les sédiments étudiés.

	Grain moyen	***Sorting***	***Kurtosis***
Sédiment associé (SA)	17,293 ± 1,937	3,968 ± 0,351	0,912 ± 0,045
Sédiment associé + H_2O_2 (SAO)	19,988 ± 4,853	3,901 ± 0,196	0,875 ± 0,037
Totalité des tubes (T)	10,946 ± 3,125	3,395 ± 0,398	0,990 ± 0,099
Tubes adultes (GT)	12,846 ± 2,759	3,589 ± 0,295	0,924 ± 0,063
Tubes juvéniles (PT)	8,874 ± 1,992	3,184 ± 0,393	1,062 ± 0,079

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques des différences entre les sédiments étudiés. ddl : Degrés de liberté.

		Grain moyen			***Sorting***			***Kurtosis***		
	ddl	**Test**	**F ou χ_2**	**p-value**	**Test**	**F ou χ_2**	**p-value**	**Test**	**F ou χ_2**	**p-value**
SA vs SAO	1, 56	KW	4,577	p<0,05	KW	0,288	p > 0,05	A	10,800	p<0,01
GT vs PT	1, 44	KW	17,091	p<0,001	A	15,880	p<0,001	KW	20,823	p<0,001
SA vs T	1, 78	KW	46,680	p<0,001	A	44,760	p<0,001	KW	12,244	p<0,001

La composition sédimentaire des tubes de *H. nirae* (T) présente des différences avec celle du SA. Les T ont un grain moyen significativement plus petit (KW : $\chi_{2(1, 78)} = 46{,}680$, $p<0{,}001$) et une distribution de la taille de ces grains plus large (KW : $\chi_{2(1, 78)} = 12{,}244$, $p<0{,}001$). Les T possèdent également un sédiment significativement mieux trié que le SA (A : $F_{(1, 78)} = 44{,}760$, $p<0{,}001$) (Tableau 3 et 4).

Les caractéristiques des tubes des adultes (GT) sont significativement différentes de celles des juvéniles (PT) (Tableau 4). En effet, les GT ont un grain moyen de taille plus importante (KW : $\chi_{2(1, 44)} = 17{,}091$, $p<0{,}001$), plus mal trié (A : $F_{(1, 44)} = 15{,}880$, $p<0{,}001$), et avec une distribution de taille moins étendue (KW : $\chi_{2(1, 44)} = 20{,}823$, $p<0{,}001$) [Tableau 3 et 4].

Les tests statistiques révèlent des différences significatives entre les stations pour le SA au sein du GM et du SO (Tableau 5). Le grain moyen de la station 4 est significativement plus petit que celui de la station 1 et de la station 3 (A : $F_{(3, 30)} = 4{,}657$, $p<0{,}01$). De même, la station 4 a un sédiment moins bien trié que la station 2 (KW : $\chi_{2(3, 30)} = 15{,}269$, $p<0{,}01$) [Tableau 6].

Tableau 5 : Résultats des tests statistiques des différences entre les stations. ddl : Degrés de liberté.

	ddl	***Grain moyen***			***Sorting***			***Kurtosis***		
		Test	**F ou χ_2**	**p-value**	**Test**	**F ou χ_2**	**p-value**	**Test**	**F ou χ_2**	**p-value**
Sédiment associé	3, 30	A	4,657	p<0,01	KW	15,269	p<0,01	A	1,288	p>0,05
Tubes adultes	3, 20	A	0,568	p>0,05	KW	6,947	p>0,05	A	0,796	p>0,05
Tubes juvéniles	3, 18	KW	14,949	p<0,01	KW	17,093	p<0,001	KW	11,113	p<0,05

Tableau 6 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres décrivant les sédiments étudiés selon leurs stations. St 1 : Station 1 ; St 2 : Station 2 ; St 3 : Station 3 ; St 4 : Station 4.

	Grain moyen				***Sorting***				***Kurtosis***			
	St 1	**St 2**	**St 3**	**St 4**	**St 1**	**St 2**	**St 3**	**St 4**	**St 1**	**St 2**	**St 3**	**St 4**
Sédiment associé	18,500 ±2,321	16,453 ±1,212	18,367 ±1,820	16,119 ±1,316	3,828± 0,279	3,702± 0,227	4,249± 0,394	4,062± 0,217	0,883± 0,050	0,923± 0,052	0,919± 0,030	0,915± 0,041
Tubes adultes	13,732 ±1,694	13,433 ±1,755	11,913 ±2,147	12,305 ±4,656	3,669± 0,216	3,773± 0,155	3,440± 0,087	3,475± 0,484	0,918± 0,042	0,905± 0,030	0,958± 0,078	0,915± 0,087
Tubes juvéniles	12,540 ±2,002	8,441± 0,0490	8,209± 0,485	7,529± 0,337	3,906± 0,232	3,150± 0,147	3,105± 0,021	2,812± 0,038	0,917± 0,021	1,085± 0,040	1,082± 0,055	1,114± 0,013

Les GT ne présentent aucune différence entre les stations (Tableau 5).

Les PT des stations 1 et 4 sont significativement différents pour les trois paramètres étudiés (Tableau 5). Les PT de la station 4 ont un grain moyen plus petit, sont mieux triés et ont une distribution de la taille de leur grain moyen moins étendue (Tableau 6).

La densité a un impact significatif sur les paramètres étudiés du SA (Tableau 7). La station 3, caractéristique de la zone à forte densité de pockmarks a un grain moyen plus grossier que la station 4, caractéristique de la zone à faible densité de pockmarks (Tableau 8). Le SA des stations 1 et 2, caractéristique de la zone à densité moyenne de pockmarks, a un grain mieux trié que pour les deux autres conditions.

Tableau 7 : Résultats des tests statistiques des différences existant au sein du sédiment associé en fonction de la densité en pockmarks et de la stabilité des populations à *Haploops nirae*.

Sédiment associé		***Grain moyen***			***Sorting***		
	ddl	**Test**	**F ou χ2**	**p-value**	**Test**	**F ou χ2**	**p-value**
Densité	2, 31	A	3,506	p<0,5	KW	14,784	p<0,001
Stabilité	2, 24	A	6,095	p<0,01	KW	14,483	p<0,001

Tableau 8 : Valeur moyenne (moyenne ± écart-type) des paramètres utilisés pour décrire le sédiment associé en fonction de la densité en pockmarks et de la stabilité des populations à *Haploops nirae*.

		Grain moyen	***Sorting***
Densité	**Faible**	16,119 ± 1,316	4,063 ± 0,217
	Moyenne	17,349 ± 2,010	3,759 ± 0,250
	Forte	18,367 ± 1,820	4,251 ± 0,394
Stabilité	**Récente**	16,119 ± 1,316	4,063 ± 0,217
	Moyenne	18,367 ± 1,820	3,704 ± 0,227
	Ancienne	16,453 ± 1,213	4,251 ± 0,394

L'âge de la population de *H. nirae* a aussi un impact significatif sur les caractéristiques du SA (Tableau 7). La station 3 caractérisant les populations dites moyennes ont un grain moyen plus élevé que les populations récentes (station 4) ou anciennes (station 2). De plus, les populations anciennes ont un SA moins bien trié que les populations plus récemment installées (Tableau 8).

V. DISCUSSION

Cette étude avait pour objectifs d'une part d'évaluer l'évolution temporelle et spatiale du champ de pockmarks, et d'autre part, d'envisager le rôle des pockmarks dans l'activité de bio-construction de l'espèce de *H. nirae*.

1. Aire de répartition des pockmarks et du peuplement à *Haploops nirae*

Les estimations réalisées par Souron (2009) sont confirmés par les résultats de cette étude (Figure 19). L'aire de répartition des pockmarks observée, coïncide précisément avec celle du peuplement des *H. nirae*. Cette étude en a précisé les contours dans la zone Sud et la superficie totale (38,5 kilomètres carré plutôt que 36 kilomètres carré).

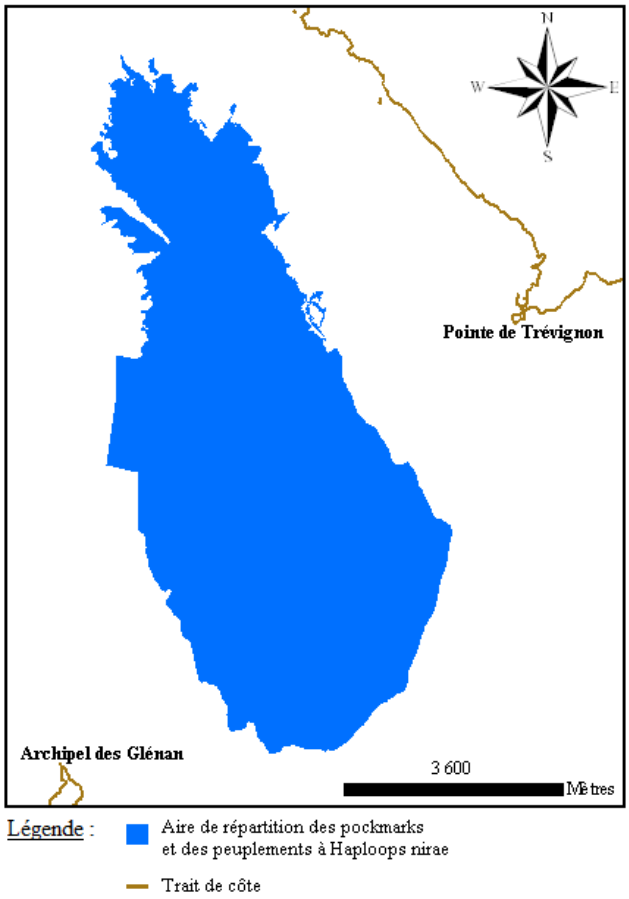

Figure 19 : Estimation de l'aire de répartition décrite par Souron (2009).

La comparaison de ces deux cartes souligne également un état de stagnation de cette zone. En effet, l'aire de répartition n'a pas varié au cours des 6 dernières années comme suggéré par d'autres études (Ehrhold *et al*. 2006 ; Rigolet, 2013).

2. L'évolution des pockmarks dans les deux zones étudiées

Cette stabilité globale se retrouve de manière plus ou moins marqué dans les deux zones étudiés. En effet, la zone A ne semble pas avoir subi une quelconque modification depuis 2003. Le nombre et l'activité des pockmarks semblent constants.

La zone B quant à elle montre des signes d'évolution au cours du temps. La bathymétrie indique un apport extérieur de sédiment suffisamment important pour modifier la topographie. Dans cette zone, une migration de vase fluide a été mise en évidence. Cette vase tend à recouvrir et homogénéiser le relief du fond sédimentaire. Ce nappage pourrait perturber la libération des fluides et l'activité des pockmarks. Ces migrations de vases pourraient être due à la succession de tempêtes qui ont eu lieu en fin d'année 2013 et début 2014 (Christian le 26 octobre 2013, Godehart le 03 novembre 2013, Xaver le 05 décembre 2013, Dirk le 23 décembre 2013, Petra le 04 février 2014 et Qumara le 06 février 2014). Ces perturbations doivent être prises en compte dans l'étude de l'activité et des caractéristiques des pockmarks de la région.

Les études en profondeur ont souligné la présence actuelle de grandes quantités de gaz emprisonnées sous les strates sédimentaires superficielles. La disparition d'une de ces poches de gaz entre 2011 et 2014 dans la zone B conduit à deux hypothèses. Les suintements de gaz ont alimenté d'anciens pockmarks ou sont à l'origine de nouvelles structures. Les causes pouvant servir de déclencheur dans la mise en activité des pockmarks sont encore peu comprises. Les activités humaines telles que le chalutage apparaissent comme une hypothèse vérifiable au vu des résultats de l'étude réalisée dans la zone A ou par les descriptions données par Baltzer *et al.* (2014). Des phénomènes naturels et ponctuels (séismes, tsunamis ou tempêtes) ou des mécanismes à court terme et régulier comme les variations de pression hydrostatique de la marée, pourraient aussi être la cause de ces dégazages. (Kelley *et al*. 1994 ; Hovland *et al*. 2002, 2012 ; Granin *et al*. 2012). Cette dernière hypothèse est actuellement étudiée dans la Baie de Concarneau par la mise en place d'un piézomètre.

Pour envisager l'évolution du nombre et l'activité des pockmarks présents dans l'aire de répartition, il serait intéressant de réaliser une analyse statistique spatiale.

3. Activité de bioconstruction de *Haploops nirae*

Le traitement utilisé au préalable pour étudier la granulométrie des tubes de *Haploops nirae* est source d'un biais. En effet le sédiment ayant subi ce traitement perd une partie de sa fraction fine à cause de la dégradation de sa matière organique. Cela se traduit par l'augmentation de la valeur du grain moyen.
De manière générale la taille moyenne des grains composant le sédiment associé aux *H. nirae* qui a été mesurée est plus faible que celle décrite dans d'autres publications (17 micromètres contre 23 micromètre pour Rigolet *et al.* 2014). Ces variations peuvent s'expliquer par des méthodes d'échantillonnage et une sélection des sites de prélèvement différents.

Au cours de la construction de son tube l'espèce *H. nirae* opère une sélection des particules sédimentaires. En effet, les caractéristiques des sédiments présents dans les tubes sont différentes de celui qui compose le milieu. Cette espèce utilise les particules les plus fines. Malgré le biais expérimental, les différences sont significatives, ce qui conforte l'hypothèse d'un tri du sédiment par l'*Haploops*. Cette différence est à nuancer car même si les tests statistiques sont significatifs la comparaison est effectuée sur des gammes tailles peu étendues (de 17 à 8 micromètres) et la classification place tous ces sédiments au sein des silts. Cette mise en évidence permet de ne pas rejeter l'influence de l'activité des pockmark sur la construction des tubes car la libération des fluides entraine la remise en suspension de particules fines et opère un classement mécanique de celles-ci. Néanmoins, l'influence directe n'est pas prouvée. Pour cela il faudrait étudier avec plus de précision le processus de fabrication des tubes. En effet, la sélection des grains pourrait être active ou passive. Les expériences à mener pour comprendre ces mécanismes seraient d'étudier l'agencement des grains dans le mucus en utilisant la photographie microscopique ou de l'observation en milieu contrôlé.

Au sein des stations aucun facteur ne semble expliquer les variations des caractéristiques sédimentaires (profondeur, distance à la côte, densité de pockmarks, âge de l'installation de la colonie). Pour envisager une tendance, il faudrait réaliser un plan d'échantillonnage plus conséquent qui se focaliserait sur un paramètre à la fois.

D’autres liens expliquant la relation existant entre les pockmarks et les *H. nirae* devrait être explorés. La forme des reliefs liés au pockmarks pourrait favoriser son développement. Webb (2009) a associé ces structures a des modifications environnementales (augmentation de surface habitable, modification des courants) pouvant conduire à des modulations de populations locales. Cependant des études montrent que la présence de pockmarks de faible activité ou inactifs ne change pas la structuration des peuplements. Elle joue un rôle dans la densité de certaines espèces clé en offrant un milieu protégé (Dando *et al*., 1991 ; Webb, 2009).

La libération de fluides par les pockmarks entraine une remise en suspension de particules sédimentaires et biogènes. Cette activité pourrait être propice au processus de nutrition. Cette hypothèse est soutenue par Baltzer *et al*. (2014). Une autre publication de Rigolet *et al.* (2014) montre que le mucus sécrété par *Haploops nirae* serait à l’origine du développement de certaine population de diatomées (phytoplancton ayant un test siliceux). Par conséquent les *Haploops* « cultiveraient », pour ainsi dire, une partie de leur propre nourriture et l’exporteraient l’autre partie vers les habitats avoisinants.

En baie de Concarneau les hypothèses sur les liens de causalité entre les pockmarks et le peuplement à *Haploops nirae* restent encore à discuter. Néanmoins le rôle des pockmarks dans l’activité de bioconstruction de cette espèce n’est pas exclu par cette étude. Elle devra se poursuivre avec un plus grand nombre d’échantillon et nécessite d’être complétée par des analyses granulométriques sur des carottes sédimentaires afin d’évaluer l’origine (en profondeur ou en surface) des sédiments utilisés pour faire leur tube.

BIBLIOGRAPHIE

A. Baltzer, A. Ehrhold, C. Rigolet, A. Souron, C. Cordier, H. Clouet, S.F. Dubois, Geophysical exploration of an active pockmark field in the Bay of Concarneau, southern Brittany, and implications for resident suspension feeders, Geo-Marine Letters, 34 (2014) 215-230.

F. Béchennec, P. Guennoc, C. Guerrot, P. Lebret, D. Thieblemont, Notice explicative, carte géologique de France, 1/50000 feuille Concarneau (382). BRGM, Orléans (1997).

P. Bouysse, J. Chateauneuf, M. Ters, Présence d'Yprésien, niveau transgressif et taux de sédimentation flandriens en baie de Vilaine (Bretagne méridionale), Académie des Sciences (Paris), Comptes Rendus, 279 (1974) 1421-1424.

P. Bouysse, Y. Le Calvez, Etude des fonds marins compris entre Penmarc'h et Groix,(Sud-Finistère): France, Bureau de Recherche et de Géologie Minière, Bulletin, 2 (1967) 39-73.

] A. Carpentier, S. Vaz, C.S. Martin, F. Coppin, J.C. Dauvin, N. Desroy, J.M. Dewarumez, P.D. Eastwood, B. Ernande, S. Harrop, Z. Kemp, P. Koubbi, N. Leader-Williams, A. Lefebvre, M. Lemoine, G.J. Meaden, N. Ryan, M. Walker, Eastern Channel Habitats Atlas for Marine Ressource Management (CHARM), Atlas des Habitats des Ressources Marines de la Manche, INTEREG IIIA, 225pp, (2005).

G. Çifçi, D. Dondurur, M. Ergün, Deep and shallow structures of large pockmarks in the Turkish shelf, Eastern Black Sea, Geo-Marine Letters, 23 (2003) 311-322.

P. Dando, M. Austen, R. Burke, M. Kendall, M. Kennicutt, A. Judd, D. Moore, S. O'Hara, R. Schmaljohann, A. Southward, Ecology of a North Sea pockmark with an active methane seep, (1991).

J.-C. Dauvin, D. Bellan-Santini, Révision de la collection des Ampeliscidés (Crustacea, Amphipoda) d'Edouard Chevreux au Museum national d'histoire naturelle, Bulletin du Muséum national d'histoire naturelle. Section A, Zoologie, biologie et écologie animales, 8 (1986) 867-891.

Y. Delanoë, Les grands traits de la structure et de l'évolution géodynamique des dépôts tertiaires du plateau continental sud-armoricain d'après les enregistrements de sismique réflexion, Géologie de la France, 1 (1988) 79-90.

Y. Delanoë, J. Margerel, J. Pinot, Concarneau bay, marine deposit of oligocene age are in unconformity with folded, faulted and eroded eocene deposits, and have been covered with

aquitanian deposits after a new planation, Comptes rendus hebdomadaire des seances de l'Académie des Sciences série D, 282 (1976) 29-32.

J. Eckman, Hydrodynamic processes affecting benthic recruitment, Limnol. Oceanogr, 28 (1983) 241-257.

A. Ehrhold, D. Hamon, B. Guillaumont, The REBENT monitoring network, a spatially integrated, acoustic approach to surveying nearshore macrobenthic habitats: application to the Bay of Concarneau (South Brittany, France), ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 63 (2006) 1604-1615.

A. Ehrhold, A. Blanchet, D. Hamon, C. Chevalier, J.D. Gaffret, A.S. Alix, Réseau de surveillance Benthique, Région Bretagne: approche sectorielle subtidale: identifivation et caractérisation des habitats benthiques du secteur Concarneau. Rapport Ifremer (2007).

P. Enequist, Studies on the Soft-bottom Amphipods of the Skagerak. Inaug. Diss. by Paul Enequist, in, Zoologiska bidrag från Uppsala, Bd 28.)-IVc3, (1949).

A. Ferrín, R. Durán, R. Diez, S. García-Gil, F. Vilas, Shallow gas features in the Galician Rías Baixas (NW Spain), Geo-Marine Letters, 23 (2003) 207-214.

P. Fleischer, T. Orsi, M. Richardson, A. Anderson, Distribution of free gas in marine sediments: a global overview, Geo-Marine Letters, 21 (2001) 103-122.

R.L. Folk, W.C. Ward, Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters, Journal of Sedimentary Research, 27pp (1957).

J. Fournier, C. Bonnot-Courtois, R. Paris, O. Voldoire, M. Le Vot, Analyses granulométriques, principes et méthodes. CNRS, Dinard, 99pp (2012).

A. García-García, F. Vilas, S. García-Gil, A seeping sea-floor in a Ria environment: Ria de Vigo (NW Spain), Environmental Geology, 38 (1999) 296-300.

M. Glemarec, Les peuplements benthiques du plateau continental Nord-Gascogne, Atelier offset de la Faculté des Sciences, (1969).

M. Glémarec, J. Grall, Effets biogènes sur la sédimentation en baie de Concarneau, Les Cahiers Nantais, (2003) 123-130.

M. Glémarec, H. Le Bris, C. Le Guellec, Modifications des écosystèmes des vasières côtières du sud-Bretagne, in: Long-Term Changes in Coastal Benthic Communities, Springer, (1987) 159-170.

N.G. Granin, N.A. Radziminovich, L.Z. Granina, V.V. Blinov, R.Y. Gnatovskiy, Freshening of near-bottom waters in Lake Baikal triggered by the Mw6. 2 Kultuk earthquake of August 2008, Geo-Marine Letters, 32 (2012) 453-464.

J.S. Gray, M. Elliott, Ecology of marine sediments: from science to management, Oxford University Press, (2009).

P.R. Hill, S.M. Blasco, J.R. Harper, D.B. Fissel, Sedimentation on the Canadian Beaufort Shelf, Continental Shelf Research, 11 (1991) 821-842.

C. Hily, F. Le Loc'h, J. Grall, M. Glémarec, Soft bottom macrobenthic communities of North Biscay revisited: Long-term evolution under fisheries-climate forcing, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 78 (2008) 413-425.

M. Hovland, J. Gardner, A. Judd, The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards, Geofluids, 2 (2002) 127-136.

M. Hovland, S. Jensen, T. Indreiten, Unit pockmarks associated with Lophelia coral reefs off mid-Norway: more evidence of control by 'fertilizing'bottom currents, Geo-Marine Letters, 32 (2012) 545-554.

M. Hovland, A. Judd, Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology, and the marine environment, Springer, (1988).

M. Hovland, H. Svensen, C.F. Forsberg, H. Johansen, C. Fichler, J.H. Fosså, R. Jonsson, H. Rueslåtten, Complex pockmarks with carbonate-ridges off mid-Norway: products of sediment degassing, Marine Geology, 218 (2005) 191-206.

H.W. Josenhans, L.H. King, G.B. Fader, A side-scan sonar mosaic of pockmarks on the Scotian Shelf, Canadian Journal of Earth Sciences, 15 (1978) 831-840.

R. Kaim-Malka, Révision des Haploops (Crustacea, Amphipoda) de Méditerranée, Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 3 (1976) 269-308.

J.T. Kelley, S.M. Dickson, D.F. Belknap, W.A. Barnhardt, M. Henderson, Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine, Geology, 22 (1994) 59-62.

L.H. King, B. MacLEAN, Pockmarks on the Scotian shelf, Geological Society of America Bulletin, 81 (1970) 3141-3148.

H. Le Bris, Fonctionnement des écosystèmes benthiques côtiers au contact d'estuaires: la rade de Lorient et la baie de Vilaine, These de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, (1988).

A. Menesguen, La macrofaune benthique de la baie de Concarneau: peuplement, dynamique de populations, prédation exercée par les poissons, 121 pp, in, These de 3ème cycle, Université de Bretagne Occidentale, (1980).

D. Menier, Morphologie et remplissage des vallées fossiles sud-armoricaines: apports de la stratigraphie sismique, in, Lorient, (2003).

T. Nakajima, Y. Kakuwa, Y. Yasudomi, T. Itaki, I. Motoyama, T. Tomiyama, H. Machiyama, H. Katayama, O. Okitsu, S. Morita, Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan, Journal of Asian Earth Sciences, (2013).

C. Petersen, Brief survey of the animal communities in Danish waters, American Journal of Science, (1924) 343-354.

C. Peterson, Valuation of the sea. II, The animal communities of the sea bottom and their importance for marine zoogeography. Report of the Danish Biological Station, 16 (1913) 229-311.

J. Pinot, Le pré-continent breton, entre Penmarc'h, Belle-Île et l'escarpement continental, étude géomorphologique: Lannion, Impram eds, (1974).

C. Rigolet, Diversité structurelle et fonctionnelle des peuplements sablo-vaseux de Bretagne sud: Impact de l'expansion d'Haploops nirae, in, Université Paris 06, (2013).

C. Rigolet, S.F. Dubois, G. Droual, X. Caisey, E. Thiébaut, Life history and secondary production of the amphipod *Haploops nirae* (Kaim-Malka, 1976) in the Bay of Concarneau (South Brittany), Estuarine, Coastal and Shelf Science, 113 (2012) 259-271.

C. Rigolet, S.F. Dubois, E. Thiébaut, Benthic control freaks: Effects of the tubiculous amphipod *Haploops nirae* on the specific diversity and functional structure of benthic communities, Journal of Sea Research, 85 (2014) 413-427.

C. Rigolet, P. Le Souchu, X. Caisey, S.F. Dubois, Group sweeping: Feeding activity and filtration rate in the tubiculous amphipod *Haploops nirae* (Kaim-Malka, 1976), Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 406 (2011) 29-37.

J.N. Rogers, J.T. Kelley, D.F. Belknap, A. Gontz, W.A. Barnhardt, Shallow-water pockmark formation in temperate estuaries: a consideration of origins in the western gulf of Maine with special focus on Belfast Bay, Marine Geology, 225 (2006) 45-62.

M. Sibuet, K. Olu, Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins, Deep-Sea Research Part II, 45 (1998) 517-567.

J.C. Sorbe, I. Frutos, F. Aguirrezabalaga, The benthic fauna of slope pockmarks from the Kostarrenkala area (Capbreton canyon, SE Bay of Biscay), Munibe Ciencias Naturales. Natur zientziak, (2010) 85-98.

A. Souron, Sédimentologie des vasières subtidales à Haploops spp. sur les fonds à pockmarks de Bretagne sud. Mémoire de Master2, Institut Universitaire Européen de la Mer, Plouzané (2009).

N. Sultan, B. Marsset, S. Ker, T. Marsset, M. Voisset, A.-M. Vernant, G. Bayon, E. Cauquil, J. Adamy, J. Colliat, Hydrate dissolution as a potential mechanism for pockmark formation in the Niger delta, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 115 (2010).

C. Tessier, Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière: l'exemple de la région marine Bretagne Sud, in, Université de Bordeaux 1, (2006).

J.A. Udden, Mechanical composition of some elastic sediments, Bull. Geol. Soc. Am., 25 (1914) 655-744.

J.-R. Vanney, Géomorphologie de la marge continentale sud-armoricaine, Société d'édition d'enseignement supérieur, (1977).

K.E. Webb, D. Barnes, J.S. Gray, Benthic ecology of pockmarks in the Inner Oslofjord, Norway, Mar Ecol Prog Ser, 387 (2009) 15-25doi.

C.K. Wentworth, A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, (1922) 377-392.

D. Wildish, Ecology and natural history of aquatic Talitroidea, Canadian Journal of Zoology, 66 (1988) 2340-2359.

ANNEXES

Annexe 1: Photographie des tubes de *Haploops nirae*

Figure 1 : Photographie d'un tube de *Haploops nirae* appartenant à un individu juvénile.

Figure 2 : Photographie d'un tube de *Haploops nirae* appartenant à un individu adulte. L'individu ici était un immature.

Annexe 2 : Plan d'échantillonnage

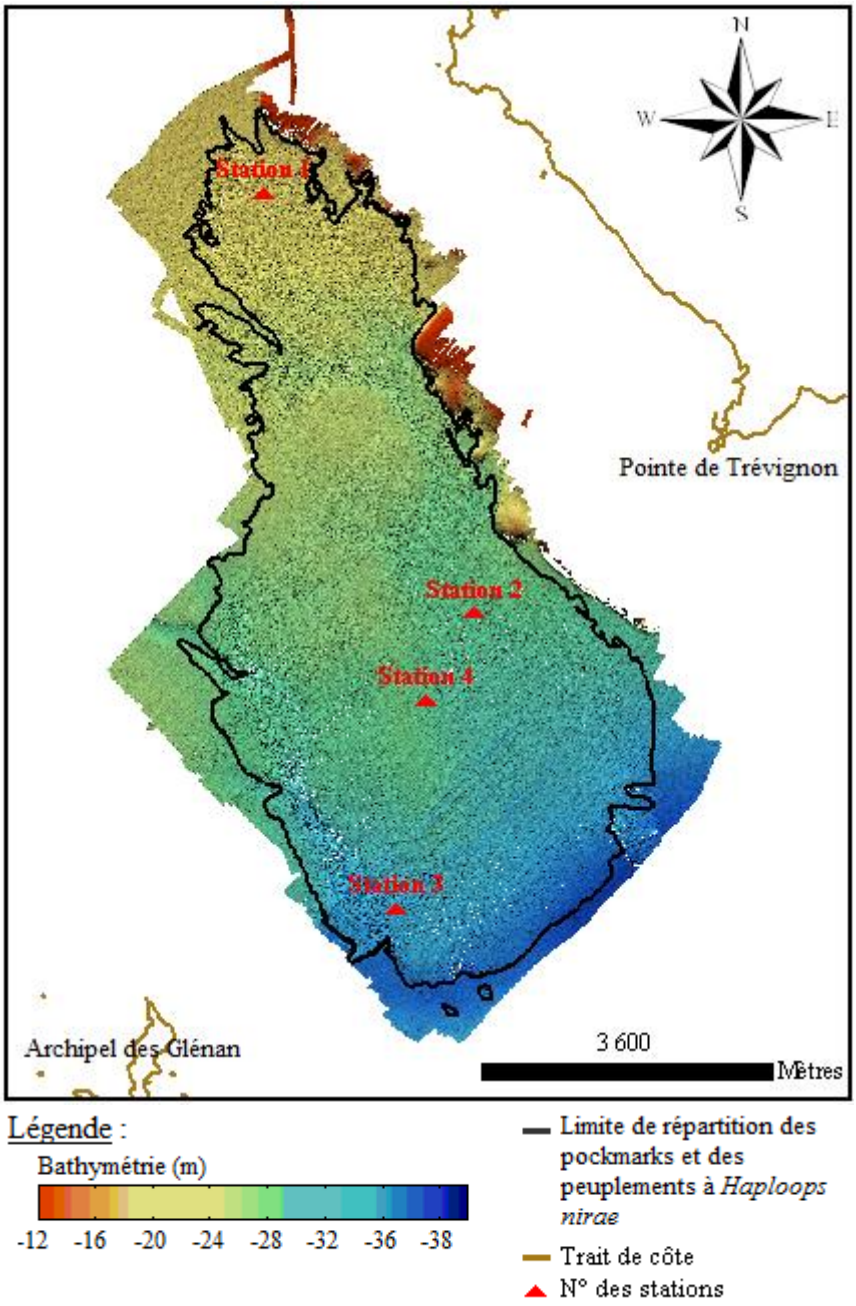

Figure 3 : Localisation des stations échantillonnées à la benne Van Veen en avril 2014.

Annexe 3 : Représentation graphique et illustration des paramètres utilisés pour la granulométrie

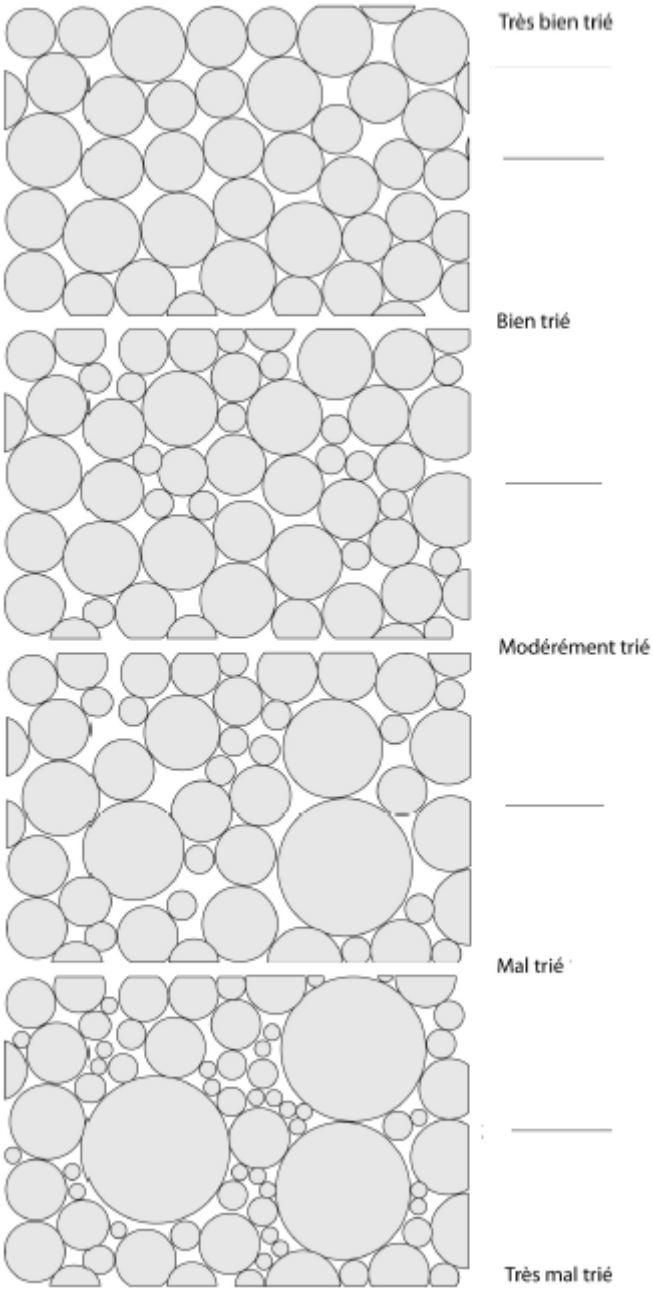

Figure 4 : Standard visuel pour l'estimation de l'indice de classement (Fournier *et al*., 2012).

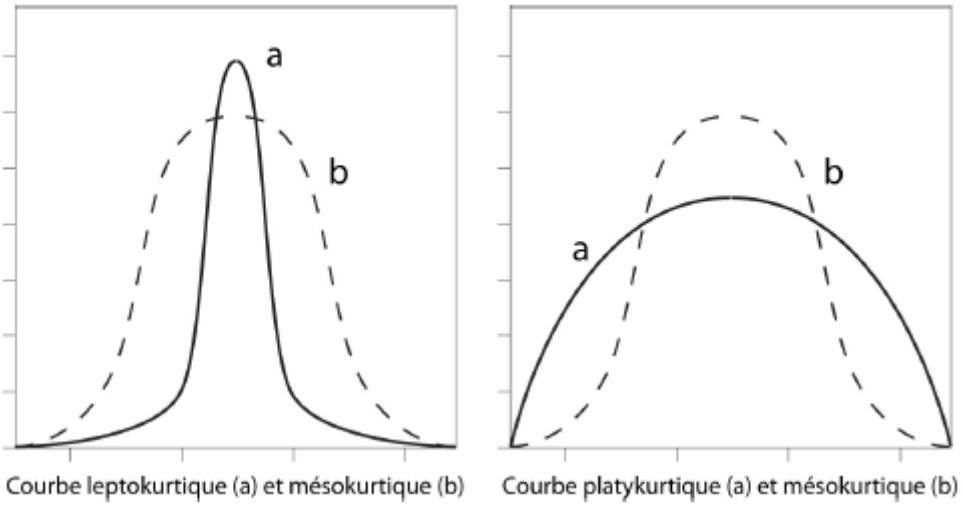

Figure 5 : Paramètres d'acuité et forme de la courbe de fréquence (Fournier *et al*., 2012).

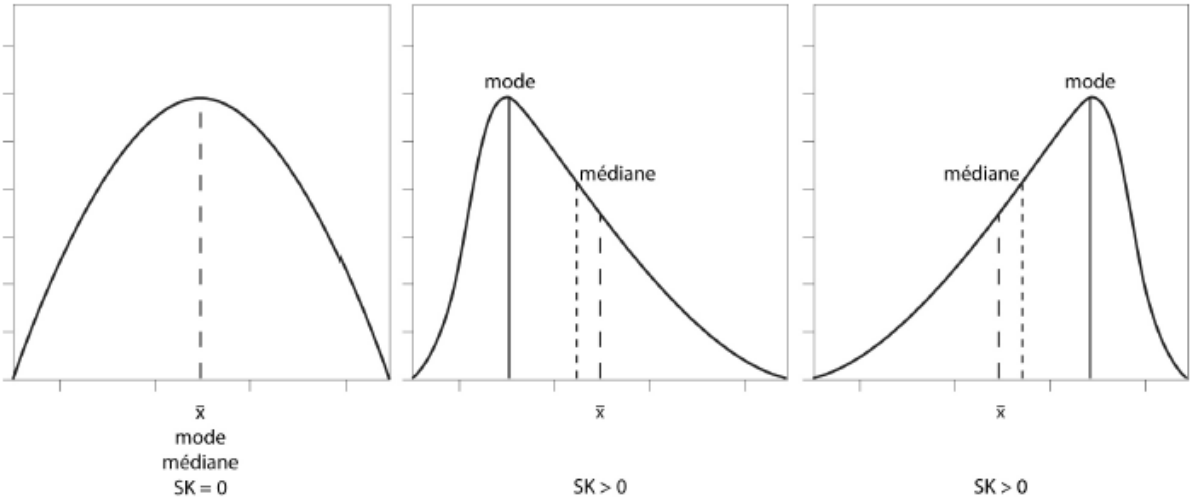

Figure 6 : Indice d'asymétrie et forme de la courbe de fréquence (Fournier *et al*., 2012).

Annexe 4 : Résultats des tests de normalité et d'homogénéité des variances

Tableau 1 : Résultats des tests de Shapiro.

Données	Shapiro	*Grain moyen*	*Sorting*	*Kurtosis*
Sédiment associé	p-value	0,0601	0,0222	0,4503
	W	0,9396	0,9248	0,9696
Sédiment associé avec H_2O_2	p-value	0,2340	0,4977	0,3643
	W	0,9471	0,9628	0,9561
Tubes adultes	p-value	0,7691	0,4178	0,7571
	W	0,9742	0,9590	0,9737
Tubes juvéniles	p-value	$3,332.10^{-5}$	0,0020	0,0082
	W	0,7179	0,8366	0,8710
Sédiment associé + Sédiment avec H_2O_2	p-value	$5,033.10^{-5}$	0,0013	0,3956
	W	0,0885	0,9232	0,9786
Tubes adultes + juvéniles	p-value	0,0030	0,0992	0,0371
	W	0,9173	0,9584	0,9473
Sédiment associé + Tous les tubes	p-value	0,0008	0,0658	0,0004
	W	0,9384	0,9710	0,9324
Sédiment associé + Tubes adultes	p-value	0,1507	0,0508	0,3890
	W	0,9694	0,9595	0,9785
Sédiment associé + Tubes juvéniles	p-value	$5,97.10^{-5}$	0,0279	0,0017
	W	0,8833	0,9526	0,9239

Tableau 2 : Résultats des tests de Bartlett.

Facteurs	Données	Bartlett	*Grain moyen*	*Sorting*	*Kurtosis*
Traitement	**Sédiment associé + Sédiment avec H_2O_2**	p-value	$2,85.10^{-6}$	0,0044	0,3579
		K	21,9130	8,0566	0,8453
Nature des tubes	**Tubes adultes + Tubes juvéniles**	p-value	0,1368	0,1911	0,2835
		K	2,2141	1,7092	1,1503
Nature du sédiment	**Sédiment associé + Tous les tubes**	p-value	0,0049	0,4380	$7,033.10^{-6}$
		K	7,9263	0,6014	20,1843
Nature du sédiment	**Sédiment associé + Tubes adultes**	p-value	0,0650	0,3859	0,7332
		K	3,4051	0,7518	3,2071
Nature du sédiment	**Sédiment associé + Tubes juvéniles**	p-value	0,8867	0,5691	0,0034
		K	0,0203	0,3242	8,5910
Stations	**Sédiment associé**	p-value	0,2990	0,3069	0,4818
		K	3,6727	3,0609	2,4640
	Sédiment associé + H_2O_2	p-value	$4,665.10^{-5}$	0,3609	0,0443
		K	22,6994	3,2064	8,0862
	Tubes adultes	p-value	0,0649	0,0036	0,1018
		K	7,2293	13,5244	6,2099
	Tubes juvéniles	p-value	0,0010	$6,373.10^{-5}$	0,0295
		K	16,2042	22,0485	8,9811
Réplicats	**Sédiment associé**	p-value	0,2582	0,0061	0,4842
		K	13,5620	26,1612	10,5215
	Sédiment associé + H_2O_2	p-value	0,5601	0,0582	0,8598
		K	9,6716	19,1646	6,1983
	Tubes adultes	p-value	0,2451	0,8111	0,0967
		K	13,7856	6,8496	17,3976
	Tubes juvéniles	p-value	0,0882	0,0334	0,0701
		K	16,4199	19,5915	17,2000
Densité	**Sédiment associé**	p-value	0,4487	0,1831	0,2220
		K	1,6029	3,3951	3,0505
Stabilité	**Sédiment associé**	p-value	0,4797	0,1657	0,3570
		K	1,4690	3,5954	2,1244

RÉSUMÉ

Des études récentes ont mis en évidence une association originale entre une région présentant de forte concentration d'une structure sédimentaire appelée pockmarks et d'un peuplement très dense de crustacés amphipodes *Haploops nirae* en baie de Concarneau – Bretagne Sud.

Cette étude avait deux objectifs, le premier était d'envisager l'évolution de cette zone par des moyens de prospection bathymétrique, d'imagerie sonar et de sondeur de sédiment. Le second était d'établir les liens qui unissent le peuplement d'*Haploops nirae* à ces pockmarks en se focalisant sur les différences existantes entre la fraction sédimentaire des tubes et celle du milieu associé.

L'évolution de cet ensemble n'est pas homogène mais globalement le système semble stable. Certaines zones présentent des migrations sédimentaires ponctuelles qui peuvent influencer l'activité des pockmarks. L'ensemble de la zone présente un fort potentiel d'expulsion des fluides qui pourrait être à l'origine de la formation de nouvelles structures ou pourrait entretenir l'activité des structures existantes.

Un lien formel n'a pas pu être établi entre l'activité des pockmarks et celle de bioconstruction de *H. nirae*. Mais l'hypothèse d'une relation de cause à effet n'a pas été rejetée.

ABSTRACT

Recent studies have revealed an original association between a specific area containing a high concentration of a sedimentary structure called pockmarks and a dense stand of amphipod crustaceans named *Haploops nirae* in the Bay of Concarneau - South Brittany.

This study had two mains objectives: the first one was to consider the evolution of this area by means of bathymetric surveys, sonar imagery and sediment sounder. The second was to establish a links between the settlements of *Haploops nirae* and these pockmarks focusing on the differences existing between the sedimentary fraction of the tubes and the associated environment's one.

The evolution of this area is not homogeneous but the overall system seems stable. Some areas have specific sedimentary migration which can influence pockmarks' activities. The study zone has great expulsion of fluids potential that could lead to the formation of new structures or could maintain the activity of existing ones.

A formal link has not been established yet between pockmarks activities and tube formation from *H. nirae*. However the hypothesis of a causal relationship has not been rejected.