



**HAL**  
open science

**Les systèmes littoraux passés, actuels et futurs :  
Approches paléobiologiques (foraminifères benthiques)  
et morphosédimentologiques**

Evelyne Goubert

► **To cite this version:**

Evelyne Goubert. Les systèmes littoraux passés, actuels et futurs: Approches paléobiologiques (foraminifères benthiques) et morphosédimentologiques. Paléontologie. Université Bretagne Sud, 2017. tel-02385812

**HAL Id: tel-02385812**

**<https://hal.science/tel-02385812>**

Submitted on 29 Nov 2019

**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.



**HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES**  
**UNIVERSITE DE BRETAGNE-SUD**  
*sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*  
**Ecole doctorale : Sciences de la Mer et du Littoral**  
**Mention : Géologie marine**

Présentée par **Evelyne GOUBERT**

Préparée à UMR 6538 CNRS UBO UBS  
Géosciences Océan

Université Bretagne-Sud

Les systèmes littoraux  
passés, actuels et futurs :  
Approches paléobiologiques  
(foraminifères benthiques) et  
morphosédimentologiques

**Habilitation à Diriger des Recherches soutenue  
le 15 septembre 2017**

Devant le jury composé de :

**Mary Elliott** : PR, Université de Nantes, UMR 6112 LPG

**Didier Néraudeau** : PR, Université de Rennes 1, UMR 6118  
Géosciences Rennes

**Marina Rabineau** : CR-HDR, Université Bretagne Occidentale,  
UMR 6538 LGO

**Francisco Ruiz Munoz** : Pr, Universidad de Huelva, Espagne

**David Menier** : MCF HDR, Université Bretagne Sud,  
UMR 6538 LGO





---

## Remerciements

J'aimerais n'oublier personne...

Merci à tous les enseignants-chercheurs, les collègues, les amies/amis, les doctorantes/ doctorants, les secrétaires, les techniciennes/techniciens des universités de Nantes, de Bordeaux, d'Angers, de Rennes, de Caen, de Brest et de l'UBS.

Merci à ceux que j'ai rencontrés en missions et en colloques, qui m'ont fait confiance et avec lesquels j'ai pu travailler.

Merci aux marins, aux pêcheurs, aux ostréicultures de Bretagne, d'Espagne, de Guyane, ...

Et surtout un énorme merci à mon entourage, à ma famille et à mon compagnon. Merci à mes parents, qui ont toujours compris mon attirance pour la vase ! J'ai une pensée très émue pour ma maman.

À tous, je vous dédie ce manuscrit.



**Les systèmes littoraux passés, actuels et futurs :  
Approches paléobiologiques (foraminifères benthiques)  
et morphosédimentologiques**

---

**Evelyne Goubert**

Maître de Conférences - Section 36

---

15 septembre 2017

---

Ce manuscrit est constitué de deux parties :

La **première partie** est un compte rendu **des activités universitaires depuis 1990**, avec un CV synthétique et le détail des activités administratives, pédagogiques et des activités liées à la recherche.

La **seconde partie** est consacrée à la **présentation scientifique des travaux de recherche** :

- ✓ Les modalités de suivi et d'enregistrement du fonctionnement des systèmes littoraux par les foraminifères
- ✓ La reconstitution des paléoenvironnements/paléoclimats
  - Les paléoenvironnements de la crise messinienne
  - L'Holocène de l'Europe de l'Ouest
- ✓ Les relations entre les activités humaines et les environnements littoraux
- ✓ Présentation générale de la Bretagne Sud
- ✓ Études intégrées : dynamique hydromorphosédimentaire, foraminifères actuels, reconstitutions paléoenvironnementales et activités humaines
  - La baie et de l'estuaire de la Vilaine de 8 000 ans à nos jours : synthèse, relevés et modélisations
  - Le Golfe du Morbihan 1 : modèle de distribution des corps sédimentaires et des foraminifères benthiques
  - Le Golfe du Morbihan 2 : la conchyliculture
  - La Baie de Quiberon : le comblement de la baie et son fonctionnement actuel
- ✓ Les éléments traces métalliques dans les environnements littoraux du Morbihan
- ✓ Conclusions et perspectives



---

# Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

**Evelyne Goubert**

---

Maître de Conférences, Section 36

**Mai 2017**

---

## Sommaire de la première partie : CV et synthèse des activités universitaires

<b>Remerciements .....</b>	<b>3</b>
<b>Curriculum vitae.....</b>	<b>9</b>
État civil.....	9
Titres universitaires.....	9
Formation pédagogique.....	9
Parcours professionnel.....	9
<b>Structuration des géosciences au sein de l'UBS .....</b>	<b>10</b>
<b>Synthèse des activités pédagogiques .....</b>	<b>11</b>
Activités d'enseignement .....	11
Activités d'administration de l'enseignement à l'UBS.....	11
Activités pédagogiques de vulgarisation et de communication depuis 2001 .....	12
<b>Synthèse des activités de recherche .....</b>	<b>13</b>
Les thématiques de recherche et les sites d'études.....	13
Organisation des activités de recherche depuis 1990.....	15
• La succession des activités de recherche depuis 1990.....	15
• Détail des programmes de recherche, contrats et convention.....	17
• Participations à des programmes de recherche .....	18
• Participations à des réseaux de recherche.....	19
• Activités d'administration de la recherche.....	20
Participation à des jurys de thèse.....	20
• Rapporteur (avec dérogation d'HDR) .....	20
• Examineur .....	20
Encadrements d'étudiants .....	21
• Thèse en cours.....	21
• Thèses soutenues : encadrement ou co-encadrement.....	21
• Formation de doctorants à l'étude des foraminifères .....	22
• Encadrements/co-encadrements de DEA / Master 2 et Master 1 .....	22
• Personnes formées à l'analyse des foraminifères .....	23
Participation à l'organisation de colloques et à l'édition d'ouvrages .....	24
Principales typologies des missions à terre et en mer .....	24
• L'Holocène de l'Ouest de l'Europe.....	24
• Le Cénozoïque de l'Ouest de l'Europe .....	24
• Les systèmes littoraux de l'Ouest de la France .....	24
Productions scientifiques .....	25
• Publications rang A et assimilées [23] .....	25
• Publications rang B [11].....	27
• Thèse.....	28
• Congrès internationaux [33 contributions] .....	28
• Congrès nationaux [35 contributions] .....	31
<b>Liste des figures et des tableaux .....</b>	<b>34</b>





# Curriculum vitae

## État civil

**Evelyne GOUBERT**  
Née le 27 mai 1970 à Nantes

[evelyne.goubert@univ-ubs.fr](mailto:evelyne.goubert@univ-ubs.fr)

**Laboratoire Géosciences Océan - LGO**  
UMR 6538 CNRS - UBO - UBS  
Université Bretagne Sud  
Campus de Tohannic, 56 000 VANNES

**Maitre de Conférences en section 36 à l'Université Bretagne Sud depuis septembre 2001**

## Titres universitaires

1997 **Doctorat** de l'Université de Nantes en « Géologie marine » (mention "Très honorable avec félicitations"), sous la direction de J.P. Margerel (U. Nantes) et P. Maggi (Ifremer Nantes). Jury composé de L. Hottinger, G. Bignot, T. Ginsburger-Vogel et B. Long.

« Les *Elphidium excavatum* (Terquem), foraminifères benthiques, vivant en Baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement. Réflexions sur l'approche méthodologique, la lignée évolutive et sur l'utilisation en paléoécologie. »

1993 **DEA** « Environnements Océaniques Actuels, Paléoocéanographie et Paléoclimatologie », Université de Bordeaux 1 (2<sup>ème</sup>, Bien). « Structure et dynamique des populations d'*Elphidium excavatum* (foraminifères benthiques) de Baie de Vilaine ».

1992 **Maîtrise** de Géologie Fondamentale et Appliquée, Université de Nantes (1<sup>ère</sup>, Bien).

1991 **Licence** de Géologie Fondamentale et Appliquée, Université de Nantes (1<sup>ère</sup>, AB).

1990 **DEUG B**, Université de Nantes.

1988 **Bac D**, Lycée Clémenceau, Nantes.

## Formation pédagogique

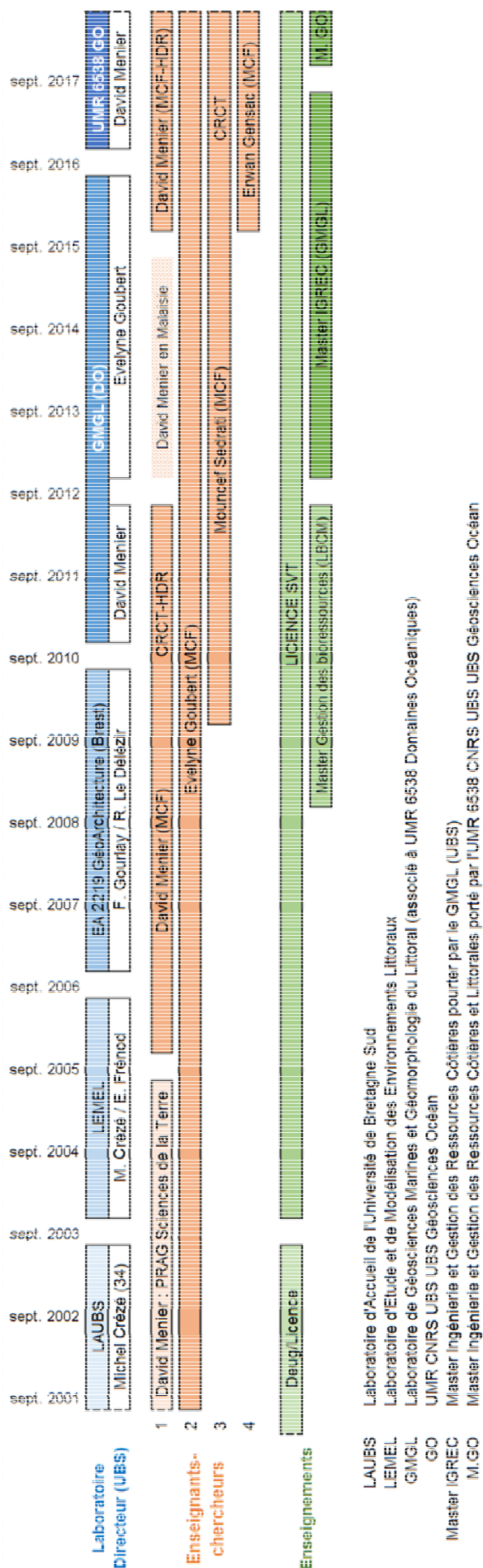
1994-1997 Formation pédagogique dans le cadre du **MONITORAT**. Stages organisés par le CIES de Rennes et par l'IUFM de Nantes.

## Parcours professionnel

Période	Lieu	Activités de recherche	Activités d'enseignement
2001 →	UBS	Maître de conférences, poste n°0044, sections 35/36	
2000 / 2001	Univ. Angers	Contrat post-doctoral	Vacataire (96 h TD)
1999 / 2000	Univ. Angers	Vacataire de recherche	Professeur contractuel à mi-temps (192 h TD)
1998 / 1999	Univ. Rennes 1	ATER 100% (240 h TD)	
1997 / 1998	Univ. Nantes / Angers	ATER spécifique 50% (96 h TD)	
1994 / 1997	Univ. Nantes	Allocataire MESR	Moniteur (3 x 64 h TD)
1992	Service Eau, CG 85, La Roche-sur-Yon	CDD 2 mois Hydrogéologue	
1991	Service Eau CG 85, La Roche-sur-Yon	CDD 1 mois Hydrogéologue	
1990 / 1992	AFAN* Univ. Nantes	Vacataire de recherche	

\* Association des Fouilles Archéologiques Nationales, actuellement INRAP : Institut National de Recherches Archéologiques Préventives.

# Structuration des géosciences au sein de l'UBS



Les géosciences (CNU 35-36) en 2001 étaient représentées par un maître de conférences, moi-même, et un PRAG (D. Menier). Nous étions dans une structure nommée « Laboratoire d'Accueil de l'Université de Bretagne Sud » (LAUBS) dirigée par Michel Crézé (PR 34) et qui regroupait tous les enseignants-chercheurs et enseignants de disciplines faiblement représentées. Actuellement, il y a quatre maîtres de conférence en géosciences, dont un HDR et nous faisons partie de l'UMR 6538 Géosciences Océan (équipes principales : DYNELI et PEPS).

En 2001, les enseignements en géosciences n'étaient présents que du L1 au L3 et ne représentaient que 1/6 de l'ensemble des enseignements. Actuellement, la part des géosciences est toujours de 1/6 en L2 et L3, mais est passée à 1/2 au maximum en L3 en fonction des choix d'options. De plus, depuis 2012, l'équipe littorale vannetaise est porteuse d'un Master Ingénierie et Gestion des Ressources Côtières et à partir de septembre 2017, le Master sera porté par l'UMR 6538 Géosciences Océan et co-habilité par l'UBO et l'UBS.

Le schéma de la Figure 1 illustre la structuration progressive de l'enseignement et de la recherche en géosciences à l'UBS depuis 2001.

**Figure 1. Structuration progressive de l'enseignement et de la recherche en géosciences à l'UBS depuis 2001.**

## Synthèse des activités pédagogiques

### Activités d'enseignement

Depuis septembre 1994, j'ai enseigné :

- ➔ les principales disciplines de la géologie : géodynamique externe (environnements sédimentaires actuels et passés, sédimentologie, paléontologie, cartographie), bases de la géodynamique interne (tectonique, sismologie, gravimétrie, paléomagnétisme, pétrologie magmatique et métamorphique), synthèses géologiques, histoire géologique de la France.
- ➔ de la Licence 1<sup>ère</sup> année au Master 2 et en préparation CAPES / Agreg.
- ➔ dans les filières de Biologie ainsi que des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Environnement.
- ➔ dans quatre établissements différents (Université de Nantes, Rennes I, Angers, Bretagne-Sud).
- ➔ en CM / TD / TP / Terrain (Ile de Bailleron, Crozon, Sud de Rennes, Littoral morbihannais,...).
- ➔ pour un total d'heure TD d'environ : 4 500 h TD, dont 820 h TD avant le recrutement à l'UBS.

Lieu	Année(s)	Statut	Niveau
UBS	2012 / 2016	MCF 35/36	Licence SVT / Master IGREC*
	2009 / 2012		Licence SVT / Master VB**
	2001 / 2009		DEUG/Licence SV / Licence SVT
Angers	2000 / 2001	Vacataire	Maîtrise SV / SE / BE DEUG 1 ST
	1999 / 2000	Professeur contractuel à 50 %	
Rennes I	1998 / 1999	ATER (100%)	Prépa CAPES / Agreg Maîtrise SVT / ST DEUG 2 SVT / Licence SV / SVT
Nantes	1997 / 1998	ATER (50%)	Maîtrise ST
	1994 / 1997	Moniteur	DEUG SVT

\* Ingénierie et Gestion des Ressources Côtières

\*\* Valorisation des Bioressources

### Activités d'administration de l'enseignement à l'UBS

Période	Responsabilités pédagogiques
Depuis 2012	Co-responsable du Master IGREC Responsable des emplois du temps du Master IGREC
Depuis 2004	Responsable du parcours Sciences de l'Environnement du L3 SVT Responsable des emplois du temps du L3 SVT
Depuis 2002	Participation aux dossiers d'habilitation des formations
2001 / 2004	Sous-directrice du département SMV (dir. N. Bourgougnon) : passage au LMD, co-porteur du dossier L3 SVT
Depuis 2001	Responsable pédagogique des enseignements de géologie

---

## **Activités pédagogiques de vulgarisation et de communication depuis 2001**

---

25 conférences : Planète Conférence de l'UBS, Conférence Réserve de Séné/UBS, Fête de la Sciences, Université Tous Ages, Semaine du Golfe, Cycle de conférences de Mairies, Observatoire du Plancton, Institution d'Aménagement de la Vilaine...

12 interventions sur le terrain et en salle de TP pour des lycéens de première d'Auray et de Vannes

8 sorties géologiques : Journées du Patrimoine, Journée de la Réserve de Séné, Découverte en kayak du Golfe du Morbihan, Fête de la Science, Sorties « Nature » du CD 56...

5 expositions des activités du laboratoire pour les Semaines du Golfe et pour les Fêtes de la Science

2 interventions à l'École primaire de Tohannic (Vannes) : « Pourquoi est-ce que la Terre tremble ? »

1 co-organisation avec D. Menier de deux journées (tectonique, magmatisme, métamorphisme en Bretagne Sud) pour la formation continue des enseignants de SVT du secondaire dans le cadre du Plan Académique de Formation de Rennes.

### Les systèmes littoraux passés, actuels et futurs : Approches paléobiologiques (foraminifères benthiques) et morphosédimentologiques

#### Les thématiques de recherche et les sites d'études

Au cours des temps géologiques, les systèmes littoraux et marins ont subi diverses fluctuations et événements extrêmes à échelle globale et locale. Ces événements ont deux principales conséquences, séparées ou couplées : la migration des systèmes littoraux (destruction / reconstruction) et la modification des paramètres environnementaux (oxygène, matières organiques, température, salinité, courants, flux sédimentaires). Parmi les événements majeurs, nous pouvons noter les baisses extrêmes du niveau marin (-250 m à l'échelle globale au cours du Permien, -1 500 m en Méditerranée au cours du Messinien), les fluctuations glacio-eustatiques (de  $\pm 50$  à  $\pm 120$  m au cours des 3 derniers millions d'années), ainsi que les crises anoxiques et dystrophiques (les crises de l'Ordovicien, du Permien, du Crétacé, du Paléogène, du Quaternaire). Tous ces événements et fluctuations sont d'origine tectonique, volcanique, climatique, eustatique, météoritique, mais depuis 10 000 ans un facteur forçant nouveau est apparu : l'Homme qui s'est sédentarisé progressivement. Cette sédentarisation s'est traduite par des modifications des cycles sédimentologiques, hydrologiques, géochimiques et biologiques affectant très rapidement les domaines littoraux : mobilisation des sols par l'érosion suite aux phases de déforestation dès le Néolithique, modifications de la composition des matières en suspension et des eaux de ruissellement, aménagement de la morphologie des cours d'eau, variations des débits liquides et solides arrivant au niveau des littoraux.

Par définition, ces écotones, aux interfaces océan/fleuve/continent, sont des milieux très changeants qui répondent très rapidement aux variations environnementales. Ils sont les premiers affectés par les variations du niveau marin, les apports en nutriments et en particules en suspension et plus globalement par les changements du climat et par toutes les fluctuations induites par les activités humaines.

Quelle que soit l'époque, il y a plusieurs millions d'années ou aujourd'hui, le fonctionnement d'un système littoral et ses fluctuations ou dérèglements peuvent être suivis et enregistrés par les populations d'organismes et par les dépôts sédimentaires.

Depuis 1990, avec une première étude pour reconstituer les paléoenvironnements holocènes d'un site archéologique à partir des foraminifères benthiques d'une carotte des marais maritimes atlantiques, mes activités de recherche se sont toujours articulées autour des **milieux littoraux** :

- ✓ Caractérisation et dynamique spatio-temporelle des **environnements littoraux actuels** et des **foraminifères benthiques** : calibration biologique des foraminifères comme bio-indicateurs de la qualité actuelle et passée des milieux littoraux ; modalités d'enregistrement des variations environnementales dans les archives sédimentaires ; suivis sédimentologiques et morphodynamiques, impacts des événements ponctuels et extrêmes sur l'évolution des systèmes littoraux à des échelles temporelles et spatiales variées,
- ✓ Reconstitution des **paléoenvironnements** et des **paléoclimats** au niveau des littoraux de l'Europe de l'Ouest au **Cénozoïque** et à l'**Holocène**,

Les relations entre **activités humaines**, le **fonctionnement des environnements littoraux** et les **foraminifères benthiques** : utilisation des foraminifères pour estimer l'impact des activités ostréicoles ; qualité des milieux pour la conchyliculture ; aménagement des littoraux et envasement ; teneurs des sédiments de surface en éléments traces métalliques

Les différents travaux se répartissent en Europe occidentale aussi bien à terre qu'en mer, de l'amont des estuaires jusqu'à une bathymétrie d'une centaine de mètres (Figure 2 et Figure 3).

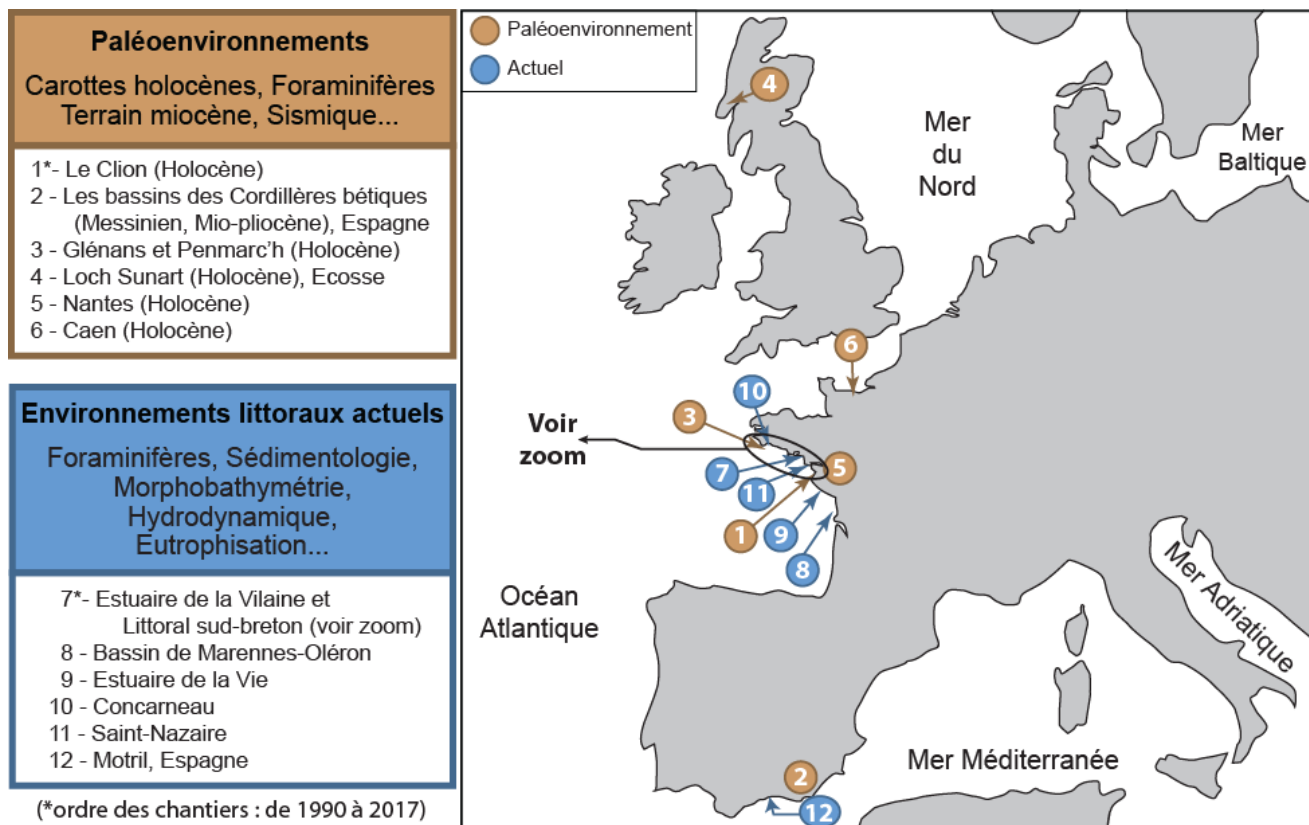


Figure 2. Localisation en Europe occidentale des principaux sites étudiés.

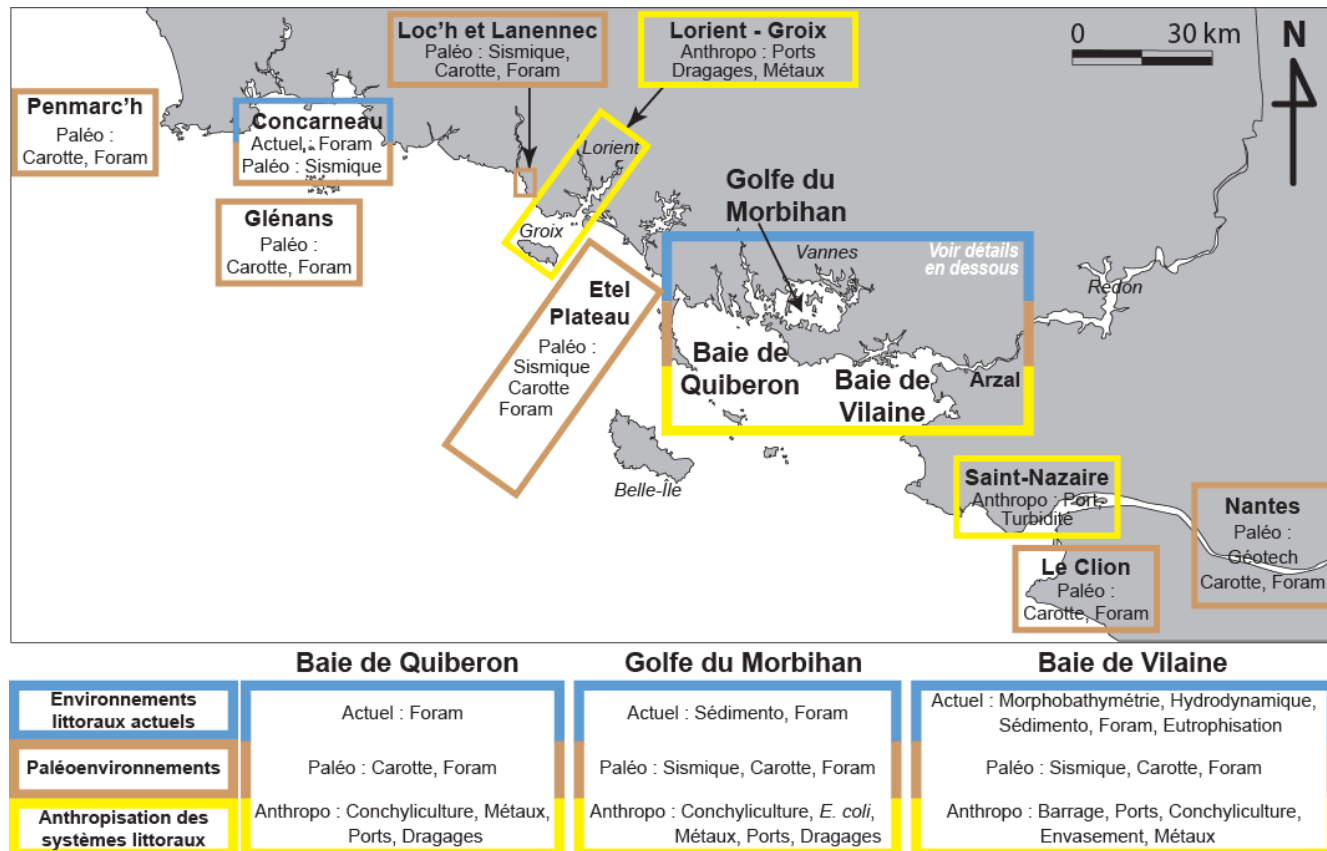
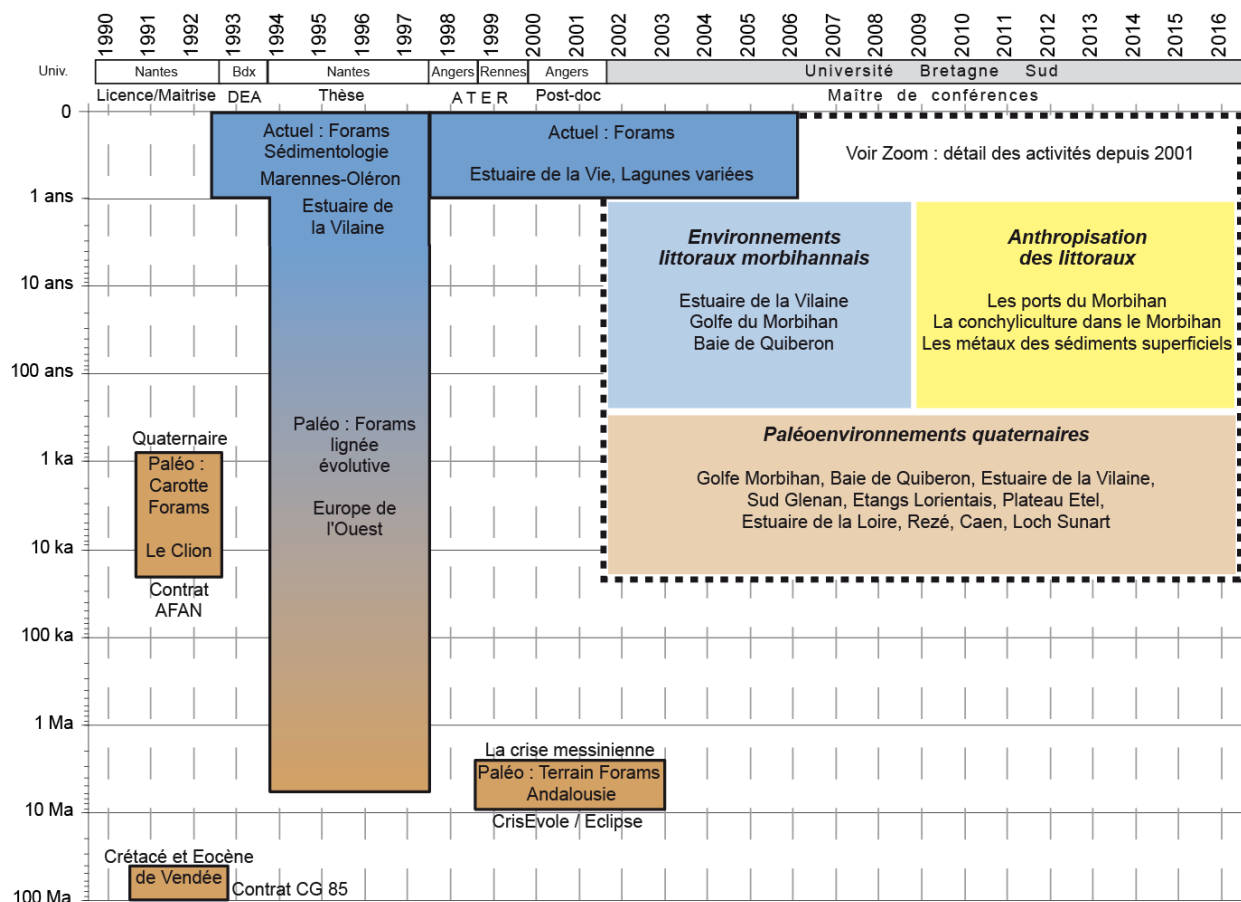


Figure 3. Localisation des sites étudiés de Penmarc'h à La Loire et des thématiques abordées.

## Organisation des activités de recherche depuis 1990

### • La succession des activités de recherche depuis 1990

Les différentes activités se sont organisées en fonction des universités et des projets scientifiques des laboratoires dans lesquels j'ai exercé avant 2001 (Nantes, Rennes et Angers) puis en fonction des financements à partir de mon recrutement comme maître de conférences en septembre 2001 à l'Université Bretagne Sud (Figure 4 et Figure 5).



**Figure 4. Succession des différentes activités de recherche de 1990 à 2017, en fonction de la fenêtre temporelle étudiée.**

De 1990 à 1992, en licence et maîtrise de géologie fondamentale et appliquée à l'Université de Nantes, j'ai eu deux activités de recherche : un contrat avec l'AFAN (Association Française d'Archéologie Nationale) pour reconstituer le paléoenvironnement holocène d'un site archéologique au Clion (Loire-Atlantique) à partir des foraminifères benthiques et des contrats avec le Conseil Général de Vendée pour faire l'inventaire des gisements de graviers aquifères du Crétacé et l'Eocène déposés en milieu littoral et estuarien dans le bassin de Challans/Soulans (Vendée).

D'octobre 1992 à fin 1997, j'ai poursuivi en DEA à l'Université de Bordeaux puis en thèse à Nantes en océanographie, climatologie et géosciences du littoral afin de mieux comprendre l'articulation entre le fonctionnement actuel des environnements littoraux et la reconstitution de leur fonctionnement passé à partir de l'enregistrement par les foraminifères benthiques. Les travaux de DEA et de thèse ont porté sur l'étude d'une espèce de foraminifère benthique qui prolifère actuellement dans l'estuaire de la Vilaine (Morbihan) et dont les écophénotypes se répartissent le long des côtes européennes en fonction de la température et des variations climatiques cénozoïques. La reconstitution de la lignée évolutive du Miocène à l'actuel a montré les occurrences de ces écophénotypes en fonction de l'entrée progressive en glaciation.



En 1998, mon recrutement comme ATER à l'Université de Rennes s'est traduit par un élargissement de la fenêtre temporelle dans le cadre des programmes « CrisEvoLe » puis « Eclipse » pilotés par Didier Néraudeau. Je me suis alors tournée vers l'enregistrement de la crise messinienne par les foraminifères (extinctions/apparitions, niveau marin, ventilation de la masse d'eau et salinité) dans les terrains mio-pliocènes du bassin de Sorbas (Andalousie, Espagne).

Les périodes universitaires, 1997/98 (ATER) puis 1999/2001 (contrat enseignement et contrat post-doc) se sont déroulées à l'Université d'Angers dans le laboratoire LEBIM dirigé par Jean-Pierre Debenay. Au cours de ces trois années, j'ai pu participer au développement des études des foraminifères benthiques actuels de différents environnements littoraux avec des approches méthodologiques variées menées par les doctorants et les enseignants-chercheurs du laboratoire : suivis mensuels, distribution spatiale, impact de contaminations sur le développement et la distribution des foraminifères, variations morphologiques en fonction des paramètres environnementaux...

À partir de 2001, en tant que maître de conférences à l'Université Bretagne Sud, mes activités de recherche ont été menées dans le cadre de différents programmes de recherche en réponses à des questionnements scientifiques en relation avec les problématiques locales et régionales concernant le fonctionnement des environnements littoraux, les usages et les impacts des usages (Figure 5).

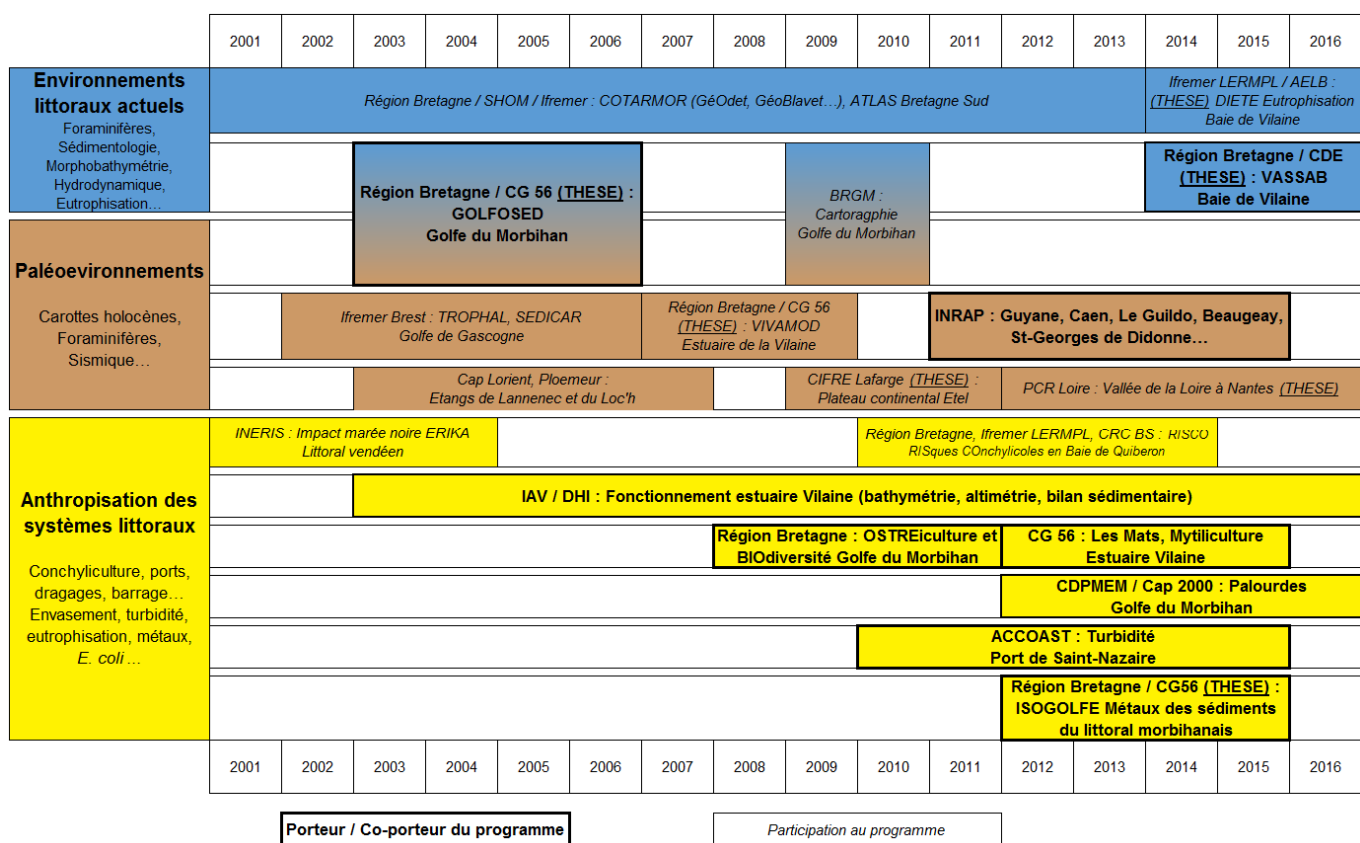


Figure 5. Les programmes et activités de recherche développés à l'Université Bretagne Sud comme maître de conférences depuis septembre 2001.

---

- **Détail des programmes de recherche, contrats et convention**

Depuis 1990, j'ai porté ou co-porté différents programmes de recherche, contrats et conventions avec des collectivités territoriales (CD, région), l'Institution d'Aménagement de la Vilaine, l'INRAP, IFREMER, des bureaux d'études... Certains programmes ont été le support pour des thèses et pour des recrutements de techniciens, de post-doc et de stagiaires de Master 1 et 2.

**2013-2016 : Programme « VASSAB » financé par Région Bretagne et CG56. THESE :** O. Morio (dir. dérogation HDR : E. Goubert et co-dir. : M.Sedrati (UBS, LGO).

**2013-2015 : Programme « HistoVila » avec Ifremer LERMPL « Historique des flux de nutriments en Baie de Vilaine et bilan sédimentaire ».** M1 / M2.

**2013-2014 : INRAP GSO « Étude paléoenvironnementale préliminaire des carottages du site de Le Châta, St-Georges-de-Didonne (17) ».** Collaborateur : D. Barbier-Pain (INRAP GO/UBS, LGO).

**2013 : INRAP GO « Reconstitution paléoenvironnementale à partir de l'étude des microfossiles du carottage Caen-Presqu'île ».** Collaborateur : D. Barbier-Pain (INRAP GO/UBS, LGO).

**2012-2016 : Convention d'étude avec l'Institution d'Aménagement de la Vilaine « Assistance scientifique à la réalisation de recherches en sédimentologie en Vilaine ».** Technicien (R. Le Gall).

**2012-2016 : Conventions d'études avec le CDPMEM (Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins) et CAP 2000 (Conchyliculteurs, Agriculteurs, Pêcheurs) « Les gisements de palourdes du Golfe du Morbihan : stock, reproduction et qualité bactériologique ».** M1 / M2.

**2012-2015 : Programme ISOGOLFE « les métaux des sédiments du Morbihan » financé par Région Bretagne et CG56. THESE :** J. Jimenez (dir : D. Menier et co-dir : E. Goubert).

**2012-2013 : CG 56 Cluster Cultures Marines « Expertise sur le projet d'implantation de bouchots sur le secteur des Mats, estuaire de la Vilaine ».** Collaborateur : M. Sedrati (UBS, LGO). Technicien (R. Le Gall).

**2011 : INRAP Antilles-Guyane « Étude préliminaire du potentiel paléoenvironnemental ».** Collaborateur : D. Barbier-Pain (INRAP GO/UBS, LGO).

**2010-2015 : Convention de partenariat technique et scientifique avec la société ACCOAST (Arradon). Accompagnement pour des suivis de turbidité du port de Saint Nazaire.**

**2008-2012 : Programme « OstreBio » Asosc Région Bretagne « Ostréiculture et Biodiversité dans le Golfe du Morbihan ».** Collaborateurs : F. Chlous-Ducharme (Géoarchitecture, UBO), A. Dréano (CRC-BS), G. Gélinaud (SEPNB). Post-doc (V. Le Cadre) et Technicien (R. Le Gall).

**2008-2009 : Convention d'étude avec l'Institution d'Aménagement de la Vilaine « Évolution de l'altimétrie des vasières de l'estuaire de la Vilaine ».**

**2007-2008 : Convention d'étude avec le Danish Hydraulic Institut « Suivi Altus dans l'estuaire de la Vilaine et intégration des données dans le modèle numérique ».**

**2006-2012 : Convention d'étude avec l'Institution d'Aménagement de la Vilaine et le Danish Hydraulic Institut « Modélisation hydrodynamique et hydrosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine ».** Porteurs : E. Goubert et E. Frénod (UBS)

- 
- 2003-2006 : Programme « GOLFOSED »** financé par la **Région Bretagne** « Évolution récente du Golfe du Morbihan : enregistrement des variations environnementales par les foraminifères et par les dépôts sédimentaires ». **THESE** : L. Perez-Belmonte (dir dérogation HDR : **E. Goubert**).
- 2003-2005** : Convention d'étude avec l'**Institution d'Aménagement de la Vilaine** « Mission d'assistance à la tenue et à la valorisation des données bathymétriques de l'estuaire de la Vilaine ». Porteurs : E. Goubert et D. Menier (UBS LGO).
- 2002-2006** : Contrat avec **Ifremer Brest** dans le cadre du programme « TROPHAL - Défi Golfe de Gascogne : Reconstitution de l'évolution paléoenvironnementale du secteur Sud-Glénan de la "Grande Vasière" depuis 9 000 ans : apports des foraminifères ».
- 1993-1994** : Contrat avec **Ifremer la Tremblade** « Étude de la distribution des foraminifères benthiques dans le Bassin de Marennes-Oléron ».
- 1992** : Contrat avec le **Service Départemental d'Hydrogéologie du CG85** « Reconnaissance hydrogéologique de la région de Soullans (Vendée) ».
- 1991** : Contrat avec le **Service Départemental d'Hydrogéologie du CG85** « Suivi de forages d'eau et étude d'une nappe de surface exploitée par des carrières de graviers (Vendée) ».
- 1990-1993** : Contrat **AFAN** « Étude des foraminifères dans un sondage réalisé au Clion (Loire-Atlantique) et mise en évidence des fluctuations du niveau marin depuis 10 000 ans ».

- **Participations à des programmes de recherche**

Mes différentes participations à des programmes de recherche reposent sur les compétences particulières suivantes : études des foraminifères benthiques actuels **[FBA]**, reconstitutions paléoenvironnementales à partir des foraminifères benthiques des carottes **[RPFB]**, expertise sur le fonctionnement hydromorphosédimentaire des littoraux morbihannais **[FH]**. Comme dans le cas des programmes précédents, ces participations ont été des supports pour des post-doc, des techniciens et des stagiaires de Master que j'ai recrutés et encadrés ainsi que pour des thèses pour lesquelles je suis intervenue à différents niveaux.

- 2014-2017 : DIETE** « Diagnostic Étendu de l'Eutrophisation en Baie de Vilaine ». Coord : P. Souchu, IFREMER LERMPL, Nantes. **THESE** : W. Ratmaya (dir : P. Souchu, Ifremer). **[FH]**
- 2012-2016 : Programme Collectif de Recherche (PCR)** « Archéologie fluviale et Environnements holocènes des vallées de la Loire et de ses affluents en Pays Nantais ». Coord. R. Arthuis, INRAP. **Post-Doc 18 mois** : V. Le Cadre. **[RPFB]**
- 2011-2015 : ANR COCORISCO** « COnnnaissance, COmpréhension et gestion des RISques Côtiers ». 6 laboratoires dont LDO. **THESE** : A. Fernane (dir : B. Van Vliet Lanoë, LDO). **[RPFB]**
- 2010-2014 : Programme « RISCO : Risque Conchylicole en Baie de Quiberon » Pôle Mer Bretagne - Région Bretagne.** Responsables : A. Dréano (CRC) et J. Mazurier (IFREMER LERMPL, La Trinité). Partenaires : LEMNA (U. Nantes), A. Nicolazo (CER Nautil), Cochet-Environnement. **Post-Doc** : C. Poirier. **[FBA, FH]**
- 2008-2011 : Bourse thèse CIFRE (Lafarge).** « Étude de la couverture sédimentaire du plateau continental au large d'Étel ». **THESE** : G. Estournes (dir D. Menier UBS, LGO ; F. Guillaucheu U. Rennes 1 ; P. Leroy UBO, LGO). **[RPFB]**

- 
- 2004 : SEDICAR** « Étude du bord du plateau continental et du talus du Golfe de Gascogne ». Responsable : J.F. Bourillet (IFREMER-Brest). **[RPFb]**
- 2003-2013 :** « Atlas cartographique du plateau continental sud-breton ». Convention entre IFREMER, BRGM, SHOM, Université de Bretagne Occidentale, Université de Rennes I, Université de Bretagne-Sud (D. Menier et E. Goubert), Université d'Angers. **[FBA, FH, RPFb]**
- 2004-2007 :** « Étude de carottes effectuées dans les étangs de **LANNÉNEC** et du **LOC'H** ». Convention d'étude entre CAP Lorient, Ploemeur et UBO-IUEM. Responsable : J.J. Tiercelin (UBO, IUEM). **[RPFb]**
- 2003 :** « Étude d'une carotte effectuée dans l'étang de **LANNÉNEC** ». Convention d'étude entre CAP Lorient, Ploemeur et UBO-IUEM. Responsable : J.J. Tiercelin (UBO, IUEM). **[RPFb]**
- 2002-2006 : Participation au programme de recherche « Défi Golfe de Gascogne » (IFREMER).** « Études sédimentologiques du bord du plateau continental au pied du talus du Golfe de Gascogne : transferts/ dépôts sédimentaires et reconstructions paléoenvironnementales à partir de l'étude des foraminifères ». Responsable : J.F. Bourillet (IFREMER-Brest). **[RPFb]**
- 2001-2004 : ATI 2001/ECLIPSE** "Reconstitution des changements paléohydrologiques au cours des 7 000 dernières années dans les lagunes côtières de Cabo Frio (R.J., Brésil)". Responsables : J.P. Debenay et F. Sylvestre (U. Angers). **[FBA, FH]**
- 2001-2004 :** Contrat INERIS : Conséquences écologiques et écotoxicologiques de la marée noire Erika. Projet n°17 "Evaluation de l'impact à court et moyen terme de la marée noire de l'Erika sur le littoral vendéen et suivi de la récupération du milieu, par l'utilisation de bio-indicateurs" Responsable : J.P. Debenay (U. Angers). **[FBA]**
- 2001-2004 : ECLIPSE (CNRS)** - La crise de salinité messinienne : modalités, conséquences régionales et globales, quantification. Responsables : J.M. Rouchy (MNHN) et J.P. Suc (U. Lyon I). **[RPFb]**
- 1999-2003 : COTARMOR (Région/CNRS/INSU)** - Le domaine côtier péri-armoricain : état ancien, état actuel et prévisions d'évolution pour le 21ème siècle. Responsables : J.N. Proust (U. Rennes I). **[FBA, FH]**
- 1998-2001 : CRISEVOLE** - Impact de la Crise Messinienne sur l'évolution du biota méditerranéen entre le Tortonien et l'Actuel. Responsables : Didier Néraudeau (U. Rennes I), avec Jean-Marie Rouchy (MNHN) et Jean-Paul Saint-Martin (U. Aix-Marseille I). **[RPFb]**

- **Participations à des réseaux de recherche**

Depuis 2012, l'appartenance comme membre associé au laboratoire Domaines Océaniques m'a permis de participer à deux réseaux.

**SOERE Trait de côte et aménagements littoraux :** Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement labéllisé par le **Réseau AIIEnvi** (Alliance nationale de recherche pour l'environnement). Coord. C. Delacourt.

**Labex Mer Axe 5** Observation, modélisation, élaboration de scénarios en zone côtière.

---

- **Activités d'administration de la recherche**

- ✓ **À l'UBS**

Période	Recherche
2012 / 2016	Directrice du laboratoire GMGL
2004 / 2007	Membre élu au Conseil Scientifique de l'UBS
Depuis 2002	Membre de différentes Commissions de Spécialistes CNU 35/36

- ✓ **Hors UBS**

- Comités éditoriaux et responsabilités de collection**

- Membre du comité de rédaction thématique des « Comptes Rendus Palévol » (Elsevier)

- Membre du groupe de reviewer de la revue « Paralia »

- Membre du groupe de reviewer de la revue « Revue de Micropaléontologie » (Elsevier)

- Missions d'expertise**

- Membre invité du groupe **GEODE** (Groupe d'Études et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement)

- Expert pour le **CD 56 et le sous-préfet** : dragage des ports et devenir des produits de dragage

- Expert pour **l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne** : qualité des masses d'eau littorale

- Membre du **Conseil Scientifique de l'Environnement du Morbihan** (CSEM du CD 56)

- Membre du **Comité d'Estuaire de la Vilaine**, piloté par l'Institution d'Aménagement de la Vilaine

---

## Participation à des jurys de thèse

- **Rapporteur (avec dérogation d'HDR)**

Vincent Bouchet, **2007**. Dynamique et réponse fonctionnelle des foraminifères et de la macrofaune benthique en zone ostréicole dans les Pertuis Charentais. Doctorat Univ. Angers, dir J.P. Debenay et P.G. Sauriau.

Julie Morvan, **2006**. Foraminifères benthiques de l'estran de la Baie de Bourgneuf : variabilités spatiale et temporelle - Utilisation en tant que bio-indicateurs après une pollution par hydrocarbures. Doctorat Univ. Angers, dir. F. Jorissen.

- **Examineur**

Valérie Le Cadre, **2003**. Impact de stress naturels et de polluants sur la morphologie et la cytologie des foraminifères en culture - Implications pour leur utilisation comme biomarqueurs. Doctorat Univ. Angers, dir. J.P. Debenay.

## Encadrements d'étudiants

### • Thèse en cours

	Olivier MORIO	<b>Thèse UBS</b>	Encadrement
<b>2017</b>	Titre du travail	Compréhension des transitions vase/sable à différentes échelles spatio-temporelles : cas du littoral morbihannais	<b>70 %</b>
<b>2013</b>	Financement	½ CDE et ½ ARED Région Bretagne	Co-encadrant : M. Sedrati (30 %)
	Situation actuelle	CDD au SHOM à Brest	

### • Thèses soutenues : encadrement ou co-encadrement

	Joselyn JIMENEZ	<b>Thèse UBS</b>	Encadrement
<b>2016</b>	Titre du travail	Comportement des éléments traces métalliques (ETMs) dans les sédiments de surface du Golfe du Morbihan et de la Baie de Quiberon (France) : distribution spatiale, spéciation, biodisponibilité et relation avec les sédiments des ports et rivières	<b>70 %</b>
<b>2012</b>	Financement	½ ARED Région Bretagne et ½ CD56	Dir : D. Menier 30 %, en détachement en Malaisie
	Situation actuelle	Recherche d'emploi/formation complémentaire à San Francisco	

	Clément POIRIER	Thèse U. La Rochelle	Encadrement
<b>2010</b>	Titre du travail	Enregistrement couplé par la macrofaune et la microfaune des variations environnementales récentes en Baie de Marennes-Oléron	<b>20 %</b>
<b>2007</b>	Situation actuelle	Post-doc	Dir : E. Chaumillon Co-dir : P.G. Sauriau et F. Caurant

	Lucia PEREZ-BELMONTE	<b>Thèse UBS (doctorat européen)</b>	Encadrement
<b>2008</b>	Titre du travail	Caractérisation environnementale, morphosédimentaire et stratigraphique du Golfe du Morbihan pendant l'Holocène terminal : implications évolutives	<b>100 %</b>
<b>2003</b>	Financement	100 % Région Bretagne	Dir U. Vigo : G. Francès-Pedraz
	Situation actuelle	en CDI à FUGRO en Norvège	

	Éric ARMYNOT du CHÂTELET	Thèse U. Angers	Encadrement
<b>2003</b>	Titre du travail	Évaluation des possibilités d'utilisation des foraminifères comme bio-indicateurs de pollution dans les environnements paraliques	<b>30 %</b>
<b>2000</b>	Situation actuelle	Maître de conférences à U. Lille1	Dir : J.P. Debenay

	Valérie LE CADRE	Thèse U. Angers	Encadrement
<b>2003</b>	Titre du travail	Impact de stress naturels et de polluants sur la morphologie et la cytologie des foraminifères en culture - Implications pour leur utilisation comme biomarqueurs	<b>20 %</b>
<b>1999</b>	Situation actuelle	En recherche de contrats	Dir : J.P. Debenay

- **Formation de doctorants à l'étude des foraminifères**

Il s'agit de deux thèses où j'ai seulement formé les doctorantes à l'étude des foraminifères benthiques.

	Assia FERNANE	Thèse UBO LDO	Encadrement
<b>2014</b> <b>2011</b>	Titre du travail	Reconstitution des fluctuations holocènes en relation avec les changements climatiques et l'anthropisation sur les côtes bretonnes à partir de bio-indicateurs fossiles (Chironomidae, pollen et foraminifères benthiques)	B. Van Vliet-Lanoë, A. Penaud (UBO) et E. Gandouin (CEREGE)
	Formation	Reconnaissance des foraminifères et interprétations paléoenvironnementales	

	Zohra MOKEDDEM	Thèse Caen	Encadrement
<b>2009</b> <b>2005</b>	Titre du travail	Enregistrements des changements climatiques et reconstitution des paléoenvironnements depuis le dernier maximum glaciaire dans le Loch Sunart (Nord-Ouest Ecosse).	B. Tessier et A. Baltzer (U. Caen)
	Formation	Reconnaissance des foraminifères et interprétations paléoenvironnementales	

- **Encadrements/co-encadrements de DEA / Master 2 et Master 1**

M2 / DEA 6 mois		Titre du travail	Étudiant	Co-encadrement
<b>2017</b>	<b>MP</b>	Mise en oeuvre d'un observatoire des changements dans le cadre de la réouverture à la mer de la Réserve Naturelle Régionale des Étangs du Loc'h	<b>Romain BAZIRE</b>	<b>CD 56 F.Daniel</b>
<b>2016</b>	<b>IGREC</b>	Les échouages d'algues dans le Morbihan : quelles modalités de gestion et de valorisation	<b>Tifenn NEVEU</b>	<b>CD 56 F.Daniel</b>
<b>2016</b>	<b>IGREC</b>	Étude de la croissance de <i>Crassostrea gigas</i> dans un environnement soumis à l'eutrophisation, le Morbraz	<b>Vincent SOULIER</b>	<b>Ifremer N. Cochenne-Laureau</b>
<b>2016</b>	<b>IGREC</b>	Étude du plancton dans trois systèmes « estuaires / mers intérieures » : La ria d'Étel, la baie de Plouharnel et la rivière de Pénerf	<b>Amandine RUEL</b>	<b>CAP 2000 P.Y. Roussel</b>
<b>2014</b>	<b>IGREC</b>	Diminution des stocks de palourdes japonaises ( <i>Ruditapes philippinarum</i> ) du Golfe du Morbihan des années 1990 à 2014 : étude de la dynamique des populations et suivi de la reproduction en 2014	<b>Mikaël KEDZIERSKI</b>	<b>CDPMEM C. d'Hardivillé</b>
<b>2014</b>	<b>ENSIL</b>	Évolution de la qualité bactériologique des eaux littorales dans le Morbihan Facteurs et conditions de son amélioration	<b>Floriane DE LUCA</b>	<b>CD 56 F.Daniel</b>
<b>2011</b>	<b>VBR</b>	Impact of Predators on Oyster Mortality: The Case of the Quiberon Bay From May to December 2010	<b>Ika MEIDY DEVIAMI</b>	

MP : Université Montpellier

IGREC : Ingénierie et Gestion des Ressources Côtières (UBS)

ENSIL : École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoge

VBR : Valorisation des Bioressources (UBS)

M2 / DEA 6 mois		Titre du travail	Étudiant	Co-encadrement
2006	U.Perp	Dynamique du comblement quaternaire des lagunes de Lannec et du Loc'h (Lorient)	Steven MARREC	UBO J.J. Tiercelin
2004	U.Bdx1	Évolution paléogéographique des étangs littoraux sur le littoral du Morbihan (Bretagne Sud, France) au cours de l'Holocène : relation avec l'eustatisme et les variations climatiques	Marie THORAVAL	UBO J.J. Tiercelin
2003	DEA UR1/MP	Comparaison de l'enregistrement des variations environnementales messiniennes par les foraminifères, les bivalves, les échinodermes et les dépôts sédimentaires, cas du Messinien du SE de l'Espagne (Cordillères bétiques).	Harold SAULNIER	
2000	DEA UR1	Les Ostréidés actuels, du Messinien du bassin de Sorbas (SE Espagne), du Cénomaniens de l'île Madame (Charente-Maritime).	Blaise VIDET	UR1 D. Néraudeau
1999	DEA DLAMT	Évolution de la biodiversité des échinides et des bivalves méditerranéens du Miocène terminal à l'Actuel: application au Messinien du bassin de Sorbas (sud-est de l'Espagne).	Denis LACOUR	UR1 D. Néraudeau

U. Perp : Université de Perpignan

U. Bdx1 : Université Bordeaux 1

UR1/MP : Université de Rennes1 et Montpellier

DLAMT : Dijon/Lyon/Aix-Marseille/Toulouse

M1 / Maitrise 3 mois		Titre du travail	Étudiant	Co-encadrement
2015	IGREC	Étude du fonctionnement de la vasière de Rosvelec : Aspect bactériologique, sédimentologique et conchylicole	Amandine RUEL	
2015	IGREC	Caractéristiques hydro-morpho-sédimentaire de la baie de Vilaine au cours du temps (de 1960 à 2015) incluse dans le projet DIETE (Diagnostic ETendu de l'Eutrophisation de la baie de Vilaine)	Tifenn NEVEU	
2013	IGREC	Intérêts du sablage des vasières pour la pérennité des gisements de coquillages de pêche à pied du Golfe du Morbihan	Mikaël KEDZIERSKI	
2004	UBS	Conception et élaboration d'un site Internet à visée pédagogique en sciences de la Terre.	Cécile ANGER	UBS D. Menier T. Morineau
2003	UBO	Variation du niveau de la mer au cours de l'Holocène enregistrées par les sédiments de l'étang de Lannec, Morbihan	Marie THORAVAL	UBO J.J. Tiercelin
2002	UR1	Evolution de la morphobathymétrie de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 1998 d'après le SHOM	Jérôme DOS SANTOS	UBS D. Menier
1999	UR1	Les séquences fauniques des Ostréidés du Cénomaniens de l'île Madame	Blaise VIDET	UR1 D. Néraudeau

Au fil de ces années, j'ai également encadré une **vingtaine de stages de 2 mois de Licence 3 SVT de l'UBS et des stages hors-cursus pour des étudiants de L2.**

- **Personnes formées à l'analyse des foraminifères**

De 2003 à 2016, **11 personnes ont été formées à l'analyse des foraminifères** : 1 chargé de recherche, 1 post-doc, 4 doctorants, 3 étudiants de Master et 2 étudiants de L3.



---

## Participation à l'organisation de colloques et à l'édition d'ouvrages

---

**Goubert E.** et Frénod E., **2008**. Les 11<sup>ème</sup> journées du Golfe du Morbihan « Modélisation du comportement des sédiments complexes en domaine estuarien » 25 et 26 septembre 2008, Université de Bretagne Sud, Vannes. Financé par la Région Bretagne.

Frénod E., **Goubert E.**, Menier D., **2006**. Les Environnements Côtiers. Vannes, Golfe du Morbihan, 6-7 septembre 2006, Vannes, France.

Néraudeau D., **Goubert E.**, **2002**. Edition dans la revue *Géodiversitas* des articles issus des journées de l'Association Paléontologique Française, Groupe Français d'Etude du Néogène et CRISEVOLE "L'Événement Messinien : Approches Paléobiologiques et Palaéoécologiques", 6-7 décembre 2000, Rennes, France.

Néraudeau D., **Goubert E.**, **2000**. Journées de l'Association Paléontologique Française, Groupe Français d'Etude du Néogène et Programme CRISEVOLE : "L'Événement Messinien : Approches Paléobiologiques et Palaéoécologiques", 6-7 décembre 2000, Rennes, France.

Margerel J.P., **Goubert E.**, **1995**. Intercolloquium Regional Committee on Atlantic Neogene Stratigraphy (R.C.A.N.S.) International Geological Correlation Program (Project n°343) - Atlantic Neogene Climates and Paléoenvironments, 24-27 mai 1995, Tours, France.

Margerel J.P., **Goubert E.**, **1991**. Colloque et excursion du Groupe Français d'Etude du Néogène. Septembre 1991, Doué-la-Fontaine et Tours, France.

---

## Principales typologies des missions à terre et en mer

---

- **L'Holocène de l'Ouest de l'Europe**

- ✓ Étangs lorientais et remplissage de la vallée de la Loire à Nantes : Sondages carottés pour des reconstitutions paléoenvironnementales
- ✓ Plateau continental de l'ouest européen : Carottages gravitaires pour des reconstitutions paléoenvironnementales

- **Le Cénozoïque de l'Ouest de l'Europe**

- ✓ Le Cénozoïque de Vendée : Reconnaissance des gisements de graviers et de sables pour les granulats et les ressources en eau
- ✓ Le Miocène d'Anjou et de Touraine : échantillonnages pour reconstituer les lignées évolutives des foraminifères benthiques des littoraux de l'Ouest de l'Europe
- ✓ Le Messinien et le Mio-Pliocène d'Andalousie (Espagne) : reconstitution des paléoenvironnements associés à la crise de salinité messinienne.

- **Les systèmes littoraux de l'Ouest de la France**

- ✓ Prélèvements de sédiments superficiels du plateau continental breton
- ✓ Prélèvements de coquillages pour le suivi de la qualité des milieux de production conchylicoles
- ✓ Étude de la colonne d'eau : prélèvements, mesures physico-chimiques et courantométriques
- ✓ Géophysique marine : sismique Sparker et Boomer, bathymétrie, sonar, sondeur à sédiment
- ✓ Altimétrie des vasières intertidales par mesures Altus ©NKE

---

## Productions scientifiques

---

- **Publications rang A et assimilées [23]**

- Ratmaya W., Soudant D., Salmon Monviola J., Cochenne-Laureau N., **Goubert E.**, Barillé L., Souchu P., **2017**. Long-term trends and seasonality of nutrients, Chlorophyll a and phytoplankton abundances in the Vilaine Bay (France). *Estuaries and Coasts*, ss press.
- Morio O., Sedrati M., **Goubert E.**, Floc'h F., Furgerot L., Garlan T., **2016**. Morphodynamic of a sandy-muddy macrotidal estuarine beach under contrasted energy conditions (Vilaine estuary, France). *SI 75, Journal of Coastal Research*, 258-262.
- Arthuis R., Nauleau J.F., **Goubert E.**, Barbier-Pain D., Baudouin V., **2015**. Reconstitution paléogéographique de la vallée de la Loire à Nantes depuis 8 000 ans. *PUR*, 22 pages.
- Baltzer A., Mokeddem Z., **Goubert E.**, Lartaud F., Labourdette N., Fournier J., Bourillet J.F., **2015**. The "Turritella Layer": A Potential Proxy of a Drastic Holocene Environmental Change on the North-East Atlantic Coast. *Sediment Fluxes in Coastal Areas, Coastal Research*, 10, 3-21.
- Delaine M., Arminot du Châtelet E., Bout-Roumazelles V., **Goubert E.**, Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A., Arthuis R., **2015**. Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyses: The infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *The Holocene*, 25, 407-420.
- Baltzer A., Walter-Simonet A.V., Mokeddem Z., Tessier B., **Goubert E.**, Cassen S., Difo J.A., **2014**. Climatically-driven impacts on sedimentation processes in the Bay of Quiberon (south Brittany, France) over the last 10,000 years. *The Holocene*, 24, 6, 679-688.
- Vested H.J., Tessier C., Christensen B.B., **Goubert E.**, **2013**. Numerical modelling of morphodynamics, Vilaine estuary. *Ocean Dynamics*, 63, 423-446.
- Estournès G., Menier D., Guillocheau F., Le Roy P., Paquet F., **Goubert E.**, **2012**. The paleo-Etel River incised valley on the Southern Brittany inner shelf (Atlantic coast, France): Preservation of Holocene transgression within the remnant of a middle Pleistocene incision? *Marine Geology*, 329-331, 1, 75-92.
- Menier D., Tessier B., Dubois A., **Goubert E.**, Sedrati M., **2011**. Geomorphological and hydrodynamic forcing of sedimentary bedforms - Example of Gulf of Morbihan (South Brittany, Bay of Biscay). *Journal of Coastal Research*, 64,
- Goubert E.**, Frenod E., Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., Bernard N., **2010**. The use of altimetric data (Altus) in the characterization of hydrodynamic climates controlling hydrosedimentary processes of intertidal mudflat : the Vilaine estuary case (Brittany, France). *Paralia*, 3, 6.17-6.31.
- Mokeddem Z., Baltzer A., **Goubert E.**, Clet-Pellerin M., **2010**. Multiproxy reconstruction of palaeoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in a fjord environment : Loch Sunart (NW Scotland). *From: Howe, J. A., Austin, W. E. N., Forwick, M. & Paetzel, M. (eds) Fjord Systems and Archives. Geological Society, London, Special Publications*, 344, 341-355.
- Mertens K.N., Ribeiro, S., Bouimetarhan, I., Caner, H., Combourieu Nebout, N., Dale, B., De Vernal, A., Ellegaard, M., Filipova, M., Godhe, A., **Goubert E.**, et al., **2009**. Process length variation in cysts of a dinoflagellate, *Lingulodinium machaerophorum*, in surface sediments : Investigating its potential as salinity proxy. *Marine Micropaleontology*, 70, 54-69.
- Blanche C., **Goubert E.**, Morineau T., **2007**. Une approche d'ingénierie cognitive pour la Gestion Intégrée de Zones Côtières : le cas d'un barrage sur un estuaire. *Vertigo*, 7, 3, 12 p.

- 
- Frenod E., **Goubert E.**, 2007. A first step towards modelling confinement of paralic ecosystems. *Ecological Modelling*, 200, 139-148.
- Debenay J.P., Bicchi E., **Goubert E.**, Armynot du Châtelet E., 2006. Spatio-temporal distribution of benthic foraminifera in relation with estuarine dynamics (Vie estuary, Vendée, W France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 181-197.
- Menier D., Reynaud JY, Proust JN, Guillocheau F., Guennoc P., Tessier B., Bonnet S., **Goubert E.**, 2006. Inherited fault control on the drainage pattern and infilling sequences of late glacial incised valleys, SE coast of Brittany, France. SEPM Special Publication « Incised Valleys in Time and Space », 85, 37–55.
- Néraudeau D., **Goubert E.**, 2002. L'événement messinien... Trente ans après. in Néraudeau D. & Goubert E. (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 505-510.
- Néraudeau D., Videt B., Courville P., **Goubert E.**, Rouchy J.M., 2002. Corrélation des niveaux fossilifères marins interstratifiés dans les gypses messiniens, entre la carrière de Los Yesos et la carrière de Molinos de Aguas (bassin de Sorbas, SE Espagne). in Néraudeau D. & Goubert E. (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 659-667.
- Lacour D., Lauriat-Rage A., Saint-Martin J.P., Videt B., Néraudeau D., **Goubert E.**, Bongrain M., 2002. Les associations de bivalves (Mollusca, Bivalvia) du Messinien du bassin de Sorbas (SE Espagne). in Néraudeau D. & Goubert E. (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 641-657.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Rouchy J.M., Lacour D., 2001. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordillera, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 61-78.
- Néraudeau D., **Goubert E.**, Lacour D., Rouchy J.M., 2001. Evolution of the biodiversity of Mediterranean irregular echinoids from the Messinian to the Present-Day. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 43-60.
- Saint-Martin J.-P., Néraudeau D., Lauriat-Rage A., **Goubert E.**, Secrétan S., Babinot J.F., Boukli-Hacene S., Pouyet S., Lacour S., Pestrea S., Conesa G., 2000. La faune interstratifiée dans les gypses messiniens de Los Yesos (Bassin de Sorbas, SE, Espagne): implications. *Geobios*, 33, 5, 637-649.
- Goubert E.**, 1997. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes *lidoensis* et *selseyensis* en Baie de Vilaine (France) et lignée évolutive. *Geobios*, 21, 303-310.

---

- **Publications rang B [11]**

- Souchu P., Cochennec-Laureau N., Ratmaya W., Retho M., Andrieux-Loyer F., Le Merrer Y., Barille L., **Goubert E.**, Laverman A., **2016**. Diagnostic Étendu de l'Eutrophisation. Rôle des sédiments dans le cycle des nutriments et impacts sur l'eutrophisation de la baie de Vilaine. Rapport IFREMER pour l'AELB, 117 p.
- Arthuis R., Barbier-Pain D., Baudouin V., **Goubert E.**, Nauleau J.F., **2015**. Paléogéographie holocène de la Loire à Nantes réalisée à partir de l'étude des sondages géotechniques et palynologiques. Conséquences géomorphologiques et archéologiques. In « L'environnement en mémoire : marqueurs, outils et perspectives », Actes de la journée d'étude de l'Université de la Rochelle, décembre 2012. Numéro thématique de la revue Natures Sciences et Sociétés. 30 p.
- Goubert E.**, **2013**. Reconstitution paléoenvironnementale à partir de l'étude des microfossiles du carottage « Caen-Presqu'île ». Publication INRAP, dir. E. Ghesquière, 57-66.
- Mazurie J., Stanisiere J.Y., Bouget J.F., Langlade A., Leclerc E., Quinsat K., Herve G., Augustin J.M., Ehrhold A., Sinquin J.M., Meidi-Deviarni I., **Goubert E.**, Cochet H., Dreano A., **2013**. Les risques conchylicoles en Baie de Quiberon. Deuxième partie : le risque de prédation sur l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport final du projet Risco 2010-2013. <http://dx.doi.org/10.13155/29130>, 37p.
- Paugam L., Mao A., Deborde J., **Goubert E.**, Menard N., Refait R., Pineau S., **2013**. Comportement électrochimique des structures métalliques en conditions de variations environnementales en zone estuarienne. *Matériaux & Techniques*, 101, 5-6, 12 pages.
- Stanisiere J.Y., Mazurie J., Bouget J.F., Langlade A., Gabellec R., Retho M.1, Quinsat K., Leclerc E., Cugier P., Dussauze M., Menesguen A., Dumas F., Gohin F., Augustin J.M., Ehrhold A., Sinquin J.M., **Goubert E.**, Dreano A., **2013**. Les risques conchylicoles en Baie de Quiberon. Troisième partie : le risque d'hypoxie pour l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport final du projet Risco 2010-2013. <http://dx.doi.org/10.13155/29131>, 72p.
- Tessier C., Vested H.J., Christensen B.B., **Goubert E.**, Salaün F., **2012**. Modélisation numérique de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine. *Paralia*, XII, 471-480.
- Augier R., Menier D., Van Vliet-Lanoë B., Chauris L., Thion I., Mougin B., Hallegouët B., avec la collaboration de Do Couto D., Turrillot P., Bellanger M., **Goubert E.**, Perrot J., Gautier C., **2011**. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Vannes – Saint-Gildas-de-Rhuys (417). Orléans : BRGM, 263 p.
- Goubert E.**, Frenod E., Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., Bernard N., **2009**. Utilisation de données altimétriques (Altus) dans la caractérisation de climats hydrodynamiques contrôlant le fonctionnement hydrosédimentaire d'une vasière intertidale : cas de l'estuaire de la Vilaine (Bretagne, France). *Paralia*, vol.2, 14 p.
- Goubert E.**, Frenod E., Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., Bernard N., Veron V., Allano L., **2008**. Caractérisation du fonctionnement hydrosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine à partir d'études bathymétriques et altimétriques (Altus). Actes des Xe journées nationales de Génie Cotier, Génie Civil, Sophia-Antipolis, 14-16 octobre 2008, 1-10.
- Debenay J.P., **Goubert E.**, Bicchi E., Redois F., Sylvestre F., Armynot du Chatelet E., **2003**. Fonctionnement hydrodynamique d'un système estuarien contrôlé par des écluses : exemple de la Vie (Vendée, France). *Journal de Recherche Océanographique*, 28, 3-4, 256-267.

---

- **Thèse**

**Goubert E., 1997.** Les *Elphidium excavatum* (Terquem), foraminifères benthiques, vivant en Baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement. Réflexions sur l'approche méthodologique, la lignée évolutive et sur l'utilisation en paléocéologie. Thèse de de l'Université de Nantes, 2 vol., 186 p., 78 fig., 30 pl.

- **Congrès internationaux [33 contributions]**

Morio O., Boivin J.P., Sedrati M., Garlan T. **Goubert E., 2016.** Kite Aerial Photography system for seasonal monitoring of morpho-sedimentary variations on a muddy-sandy macrotidal estuarine beach (Vilaine estuary, France). Estuarine Coastal Conference, ECSA 56, Bremen, Germany.

Morio O., Sedrati M., **Goubert E.,** Floc'h F., Furgerot L., Garlan T., **2016.** Morphodynamic of a mixed-sediment (sand and mud) macrotidal estuarine beach under contrasted energy conditions (Vilaine Estuary, France). Internation Coastal Symposium, 2016, Sydney, Australie.

Jimenez J., **Goubert E.,** Labeyrie L., Coynel A., Menier D., **2015.** Spatial and seasonal variability of reactive metals in surface sediments of the Morbihan coast (South Brittany). 13th International Estuarine Biogeochemistry Symposium, 2015, Bordeaux, France.

**Goubert E.,** Gensac E., **2015.** Impact of intertidal fluid mud on morphodynamic of guianese coast : Feedback of experience from the Vilaine Estuary. Workshop "Littoral de Guyane sous influence amazonienne", Cayenne, nov. 2015.

Ratmaya W., Souchu P., Salmon Monviola J., **Goubert E., 2015.** Comparison of nutrient concentration in the Vilaine Bay with nutrient inputs from the Vilaine River: indication of additional internal sources during summer months. 50th European Marine Biology Symposium, Alfred Wegener Institut, 20-25 sept. 2015.

Morio O., Sedrati M., **Goubert E., 2014.** Analyze of waves dynamic over an intertidal mudflat of a sandy-gravelly estuarine beach – Field survey and preliminary modeling approach. EGU, General Assembly, 2014,16-7738M.

Jimenez J., Goubert E., Labeyrie L., Coynel A., Menier D., **2014.** Quantification of MTE in surface sediments of Morbihan Coast (South Brittany, France): A preliminary approach for determination of sources and dynamics. EGU-2014, Geophysical Research Abstracts, 16-7521-2.

Jimenez J., Goubert E., Labeyrie L., Coynel A., Menier D., **2014.** Assessment of reactivity and mobility of MTE in surface sediments in Morbihan Coast (South Brittany, France). Goldschmidt, june 2014, California, Sacramento.

Mazurié J., Stanisière J.Y., Bouget J.F., Langlade A., Leclerc E., Hervé G., Meidy I., **Goubert E., 2011.** Towards restoration of endangered oyster aquaculture in a French subtidal bay (Baie of Quiberon) through control of predators. 14th International Conference on Shellfish Restoration 23rd - 27th August 2011, Stirling, Scotland, UK.

Ciret, P., Clarysse, A., Coudret, R., Damaj, R., Derian, C., Douzenel, P., Durrieu, G., Duval, H., **Goubert, E.,** Gouno, E., Grama, I., Le Tilly, V., Massabuau, J.-C., Maxime, V., Saracco, J., Sedrati, M., Tran, D. and Tricot, J.-M., **2011.** Study of the effect of environmental, statistical and biological perturbations on the behavior of bivalves. The international symposium "Coastal ecosystems vulnerability to global change and extreme events", Biarritz, France, October 18 to 21, 2011.

- 
- Tiercelin J.J., Proust J.N., **Goubert E.**, Vidal M., Regnaud H., **2011**. Responses of coastal sedimentary ecosystems of Southern Brittany to extreme meteorological events at different time and space scales. The international symposium "Coastal ecosystems vulnerability to global change and extreme events", Biarritz, France, October 18 to 21, 2011.
- Menier D., Dubois A., Tessier B., **Goubert E.**, Sedrati M., **2011**. Geomorphological and hydrodynamical control on sedimentary bedforms : example of Morbihan Gulf. 11th International Coastal Symposium, Szczecin, Poland.
- Vested H.J., Tessier C., Christensen B.B., **Goubert E.**, **2011**. Numerical modelling of morphodynamics - The Vilaine estuary. INTERCOH XI, 11th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes, October 18 –21, 2011, Shanghai – China.
- Poirier C., **Goubert E.**, Chaumillon E., **2010**. Foraminiferal record of climate and land use changes during the last centuries in Marennes-Oléron Bay (Atlantic coast of France). *Forams 2010, International Symposium on Foraminifera, septembre 5-10, Bonn, Germany*.
- Poirier C., Chaumillon E., Arnaud F., **Goubert E.**, Sauriau P.G., Caurant F., **2010**. Consequences of land use and climate changes on sediment deposition in estuaries during the last centuries. *EGU, 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol.12, EGU2010-4706*.
- Poirier C., Chaumillon E., Arnaud F., **Goubert E.**, Sauriau P.G., **2010**. Late Holocene estuarine mud drapes: a record of human activities and/or climate changes? International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina.
- Baltzer A., **Goubert E.**, Mokeddem Z., Lartaud F., Fournier J., Bourillet J.F., **2009**. Correlation of a characteristic reflecto to a Turritella layer in two lochs of Scotland and in a Bay in south Brittany. *2<sup>nd</sup> International Workshop on Fjord environments : Past, Present and Future, 7-8 May 2009, Bergen, Norvège*.
- Poirier C., Chaumillon E., Sauriau P.G., **Goubert E.**, Caurant F., Arnaud F., Churlaud C., **2009**. Benthic paleocommunities record environmental changes in modern coastal environments. *27th IAS Meeting of Sedimentologists, Alghero, Italy, 20-23 septembre 2009*.
- Baltzer A. , Mokeddem Z., **Goubert E.**, Clet-Pellerin M., Walter-Simonnet A.V., Bonnot-Courtois C., **2008**. First pollen analyses combined to foraminifera assemblages, a key to follow the climatic changes in a fjordic environment : the loch Sunart (NW Scotland). *EPICA 2008, Venice, Italia, 10-13 novembre 2008*.
- Mokeddem, Z., Baltzer, A., Clet-Pellerin, M., **Goubert, E.**, Walter-Simonnet, A.V., **2008**. Multi-data study to reconstitute climate changes since 20,000 yr in a coastal environment : the Loch Sunart (NW Scotland). *EGU, 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-06567*.
- Perez-Belmonte L., **Goubert E.**, Francés Pedraz G., **2008**. Recent environmental changes in the Morbihan Gulf (NW France) from benthic foraminifera. *ECSA 44, Estuarine and Coastal Sciences Association Instituto Argentino de Oceanografía, Oct. 2008, Bahia Blanca, Argentina*.
- Tiercelin JJ., **Goubert E.**, Marrec S., Vidal M., Schuster M., Hautot S., Tarits P., **2007**. Littoral lakes along the Atlantic shorelines of Southern Brittany, France: Archives of sea level variations and storm events during Holocene times. *ILIC 2007, 4<sup>th</sup> international Limnogeology Congress, 11-14 july 2007, Barcelona, Spain*.
- Goubert E., 2006**. The 1995 flood in the Vilaine Estuary (France): consequences on bathymetry, sedimentation and living foraminifera. *Forams 2006, International Symposium on Foraminifera, 10-15 septembre 2006, Natal, RN, Brésil*.

- 
- Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, 2006. Surface distribution of foraminifera from the Morbihan's Gulf, France: study for palaeoenvironmental reconstructions. *Forams 2006, International Symposium on Foraminifera, 10-15 septembre 2006, Natal, RN, Brésil.*
- Menier D., Bourillet F.J., Proust J.N., Perez-Belmonte L., **Goubert E.**, Thinnon I., Guennoc P., Guillocheau F., Leroy P., 2006. Morphology and infilling of Quaternary incised valleys on the Armorican margin of the Bay of Biscay. *10 th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay, 18-20 avril 2006, Vigo, Espagne.*
- Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, 2005. Multi-proxy description of major sedimentary environments in Morbihan's Gulf (NW France). *Coastal Hope 2005, 24-29 juillet 2005, Lisboa, Portugal.*
- Redois F., Duchemin G., **Goubert E.**, Debenay J.P., 2003. Relationships between vegetation and some Foraminifera on the tidal zone of Auray River (France). *Spring Meeting 2003 of The Micropalaeontological Society's Foraminiferal Group, 25-26 avril 2003, GEOMAR Research Center for Marine Geosciences in Kiel, Germany.*
- Bicchi, E., **Goubert E.**, Debenay, J.P., Armynot du Chatelet, E., 2002. How to characterise a paralic system: with total or with living foraminiferal assemblages ? *International Symposium on Foraminifera FORAMS 2002 (4-8 février 2002, Perth, Australie) p. 25.*
- Goubert E.**, Redois F., Debenay J.P., 2000. Foraminiferal recolonization of the Vilaine estuary (W France) after a flood event. *2<sup>nd</sup> Internat. Conf. "Application of Micro- and Meioorganisms to Environmental Problems" (27 août / 1<sup>er</sup> septembre 2000, Winnipeg, Canada).*
- Redois F., Debenay J.P., **Goubert E.**, Soulard R., Gossel H., 2000. Benthic foraminifers in a anthropogenic environment: the harbour of Sables d'Olonne (France). *The 2<sup>nd</sup> International Conference "Application of Micro- and Meioorganisms to Environmental Problems" (27 août / 1<sup>er</sup> septembre 2000, Winnipeg, Canada).*
- Goubert E.**, Lacour D., Néraudeau D., 1999. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordilleras, SE Spain). *"Paleoceanology of Reefs and Carbonate Platforms: Miocene to Modern. PRCP'99", Aix-en-Provence, sept. 1999, Abstract book, Publication ASF, Paris, n°32 (Eds G.F. Camoin & W.-Chr. Dullo), p.87-89.*
- Lacour D., Néraudeau D., **Goubert E.**, 1999. Evolution of the biodiversity of Mediterranean irregular echinoids between the late Miocene and the present-day. *"Paleoceanology of Reefs and Carbonate Platforms: Miocene to Modern. PRCP'99" (sept. 1999, Aix-en-Provence, France). Abstract book, Publication ASF, Paris, n°32 (Eds G.F. Camoin & W.-Chr. Dullo), p.133-135.*
- Goubert E.**, Margerel J.P., 1994. Ecophenotypy of a benthonic foraminifera *Elphidium excavatum* living in the Vilaine estuary (southern Brittany, France) : Consequences on the evolutionary lineage. *"FORAMS'94", Berkeley, juil. 1994.*

---

- **Congrès nationaux [35 contributions]**

- Arthuis R., Nauleau J.F., Barbier-Pain D., **Goubert E.**, Baudoïn V., 2011. Paléogéographie des vallées de la Loire et ses affluents en région nantaise. Résultats et perspectives. Journée Université et INRAP, « L'environnement en mémoire : marqueurs, outils et perspectives », La Rochelle, 13 décembre 2011.
- Poirier C., Chaumillon E., Sauriau P.G., **Goubert E.**, 2011. Paléoécologie de la baie de Marennes-Oléron : 2000 ans d'histoire vus par les mollusques et les foraminifères. Journée Université et INRAP, « L'environnement en mémoire : marqueurs, outils et perspectives », La Rochelle, 13 décembre 2011.
- Poirier C., Chaumillon E., Arnaud F., Sauriau P.G., **Goubert E.**, Caurant F., Churlaud C., **2009**. L'enregistrement des changements environnementaux dans les sédiments côtiers : les apports par l'analyse des paléo-communautés benthiques. *12<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie, Rennes, 21-27 Octobre 2009*.
- Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., **Goubert E.**, Frenod E., Bernard N., **2009**. Modélisation numérique hydrosédimentaire de l'Estuaire de la Vilaine (Morbihan, France). *31<sup>ème</sup> journées de l'Hydraulique, Paris, 22-23 septembre 2009*.
- Goubert E.**, Mokkedem Z., Baltzer A., **2007**. Une nouvelle utilisation des foraminifères pour les reconstitutions paléoenvironnementales: la méthode rang/fréquence appliquée à l'étude du remplissage sédimentaire du Loch Sunart (NW, Ecosse) depuis 20 000 ans. *11<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie, Caen,, 21-27 Octobre 2007*.
- Baltzer A., Bates R., **Goubert E.**, Mokkedem Z., Bourillet J.-F. and Bonnot Courtois C., **2007**. Corrélation d'un réflecteur sismique mystérieux à un niveau riche en Turitelles? *11<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie, Caen,, 21-27 Octobre 2007*.
- Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, Francés-Pedraz G., **2007**. Le remplissage tardi-holocène du Golfe du Morbihan : une étude paléoenvironnementale. *11<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie, Caen,, 21-27 Octobre 2007*.
- Baltzer A., **Goubert E.**, Perez-Belmonte L., Tessier B., Menier D., Allano L., **2006**. Sonar images in the "Golfe du Morbihan" (Britanny, NW France): Spots on *Crepidula* and *Zostera* facies. Congrès « Environnements Côtiers », Vannes, 6-7 septembre 2006, p.23.
- Frenod E., **Goubert E.**, **2006**. Modélisation du confinement d'une lagune. Congrès « Environnements Côtiers », Vannes, 6-7 septembre 2006, p.37.
- Perez-Belmonte L., **Goubert E.**, **2006**. Distribution actuelle des foraminifères benthiques dans le Golfe du Morbihan, France : une étude préliminaire pour les reconstitutions paléoenvironnementales. Congrès « Environnements Côtiers », Vannes, 6-7 septembre 2006, p.53.
- Perez-Belmonte L., Tessier B., **Goubert E.**, Baltzer A., Menier D., **2006**. Caractérisation morphodynamique sédimentaire du Golfe du Morbihan. Congrès « Environnements Côtiers », Vannes, 6-7 septembre 2006, p.54.
- Tiercelin J.J., **Goubert E.**, Menier D., Thoraval M., Tessier B., Carbonel P., Barbier D., Marrec S., **2006**. Les lagunes en amont de la marge proximale sud-armoricaine : exemple des étangs de Lannec et du Loc'h (Morbihan, France). Congrès « Environnements Côtiers », Vannes, 6-7 septembre 2006, p.60.



- 
- Goubert E.**, Menier D., Qu  t   Y., **2005**. Evolution morphosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine (Bretagne Sud, France) : analyse des enregistrements bathymétriques depuis 1960. *10  me Congrès Français de Sédimentologie, Giens, 11-13 Octobre 2005*.
- Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, **2005**. Distribution spatiale des foraminifères benthiques actuels dans le Golfe du Morbihan. *10  me Congrès Français de Sédimentologie, Giens, 11-13 Octobre 2005*.
- Bourillet J.F., **Goubert E.**, Cortijo E., Dubrulle C., Jouanneau J.M., Lesueur P., Vicaire O., **2005**. Architecture, mise en place et évolution des sédiments holocènes de la plate-forme armoricaine. *Colloque Ifremer « Défi Golfe de Gascogne » 2005*.
- Bourillet J.F., Dubrulle C., **Goubert E.**, Jouanneau J.M., Cortijo E., Weber O., Lesueur P., **2005**. La Grande Vasière : architecture, mise en place et estimation des facteurs de son évolution. *Colloque Golfe de Gascogne 2005*.
- Pérez-Belmonte L., Tessier B., Menier D., Thinon I., **Goubert E.**, **2004**. Histoire sédimentaire récente du Golfe du Morbihan. *Séance spécialisée SGF-ASF « Les incisions et dépôts de la marge atlantique française depuis le Néogène », Paris, 25-26 novembre 2004*.
- Tiercelin J.J., **Goubert E.**, Menier D., Thoraval M., Tessier B., Carbonel P., Barbier D., **2004**. Les lagunes en amont de la marge proximale sud-armoricaine : exemple de l'étang de Lannenc (Morbihan, France). *Les incisions et dépôts de la marge atlantique française depuis le Néogène, Séance spécialisée SGF-ASF, Paris, 25-26 novembre 2004*.
- Bourillet J.F., Folliot B., Lesueur P., **Goubert E.**, **2004**. Architecture des sédiments holocènes de la plate-forme armoricaine et lien avec l'eustatisme. *Les incisions et dépôts de la marge atlantique française depuis le Néogène, Séance spécialisée SGF-ASF, Paris, 25-26 novembre 2004*.
- Pérez-Belmonte L., Tessier B., Baltzer A., Menier D., Thinon I., **Goubert E.**, **2004**. Multi-proxy description of major sedimentary environments in the gulf of morbihan (s britanny, nw France). *RST 2004, 20   (20-25 sept. 2004, Strasbourg)*.
- Thoraval M., Tiercelin J.-J., **Goubert E.**, Menier D., **2004**. Paleogeographical evolution of coastal ponds on the littoral of Morbihan (south Brittany, France) during Holocene : relations with eustatism and climatic changes. *RST 2004, 20   (20-25 sept. 2004, Strasbourg)*.
- Menier D., Reynaud J.Y., Proust J.N., Guillocheau F., Guennoc P., **Goubert E.**, Frenod E., Monbet V., Le Corre C., **2003**. Quantification de la déformation et évolution morphologique des vallées fossiles sud armoricaine : Apport de la sismique réflexion. *9  me Congrès Français de Sédimentologie, Bordeaux, 13-15 Octobre 2003, p350*.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Videt B., Lacour D., **2002**. La "Crise Messinienne" dans les Cordillères Bétiques (SE, Espagne) : foraminifères, paléoenvironnements et modèles. *RST 2002, 19   (9-11 avril 2002, Nantes)*.
- Equipe COTARMOR, 2001**. Cartographie 3D des sédiments péri-armoricains : Géodynamique, migration de la ligne de rivage, ressources naturelles. *Congrès du CIRMAT, Brest, 12-13 décembre 2001*.
- Néraudeau D., André J.P., Babinot J.F., Blanc-Valleron M.M., Borghi E., Boukli-Hacene S., Chaix C., Conesa G., Cornée J.J., David B., Freneix S., Gaudant J., **Goubert E.**, Lacour S., Lauriat-Rage A., Merle D., Moissette P., Orszag-Sperber F., Pestrea S., Pouyet S., Roman J., Rouchy J.M., Saint-Martin J.-P., Secretan S., Videt B., Villier L., **2001**. Impact de la crise messinienne sur l'évolution du biota méditerranéen entre le Tortonien et l'actuel. *Paléobiodiversité, Crise, Paléoenvironnement, Séance spécialisée SGF-APF, Paris 6-7 déc. 2001, p. 60*.

- 
- Goubert E., 2001.** Les foraminifères du bassin méditerranéen occidental depuis 7Ma : paléoenvironnements et biodiversité. *Paléobiodiversité, Crise, Paléoenvironnement, Séance spécialisée SGF-APF, Paris, 6-7 déc. 2001*, p. 40.
- Menier D., Tessier B., Baltzer A., Proust J.N., **Goubert E.**, Le-Corre C., Bonnet S., **2001.** Mise en évidence d'un ancien talweg de la Vilaine à l'embouchure du fleuve actuel. *8<sup>ème</sup> Congrès Français de Sédimentologie (ASF), Orléans, 12-14 novembre 2001*.
- Goubert E., 2000** – Estimation de l'impact de la crise de salinité messinienne sur les foraminifères. *"L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques"* (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 9.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Lacour D., Videt B., **2000** – Les foraminifères messiniens des Cordillères bétiques (SE Espagne). *"L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques"* (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 8.
- Lacour D., Néraudeau D., Saint-Martin J.P., Lauriat-Rage A., **Goubert E., 2000** – Paléoécologie des peuplements messiniens d'échinides irréguliers et de bivalves du bassin de Sorbas (SE Espagne). *"L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques"* (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 10.
- Videt B., Freneix S., Néraudeau D., **Goubert E., 2000** – Analyse de la distribution des huîtres dans le Messinien du bassin de Sorbas (Cordillères bétiques, SE Espagne). *"L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques"* (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 28.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Lacour D., **2000** - Evolution de la biodiversité des foraminifères au cours du Messinien: exemple du bassin de Sorbas (Cordillères bétiques, SE Espagne). *RST 2000, 18° (17-20 avril 2000, La Villette - Paris)*.
- Goubert E., 1995** - Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes *lidoensis* et *selseyensis* en Baie de Vilaine (Bretagne, France) et lignée évolutive. *"Contraintes et instabilités de l'environnement : stratégies adaptatives des organismes récents et fossiles"*, CNRS, Univ. de Lyon I, nov. 1995.
- Goubert E., 1995** - Apport de l'étude des formes *lidoensis* et *selseyensis* du groupe *Elphidium excavatum* de Baie de Vilaine (France) et rôle du facteur température dans l'établissement d'un schéma évolutif. *"Evolution et environnement des organismes microscopiques"*, GDR 88, M.N.H.N., Paris, sept. 1995.
- Goubert E., 1995** - Adaptation d'*Elphidium excavatum* forma *lidoensis* à l'environnement estuarien de la Baie de Vilaine (France) : conséquences sur la morphologie du test, la reproduction et l'écophénotypie. *99ème congrès de la Société Zoologique de France (juil. 1995, Nantes)*.

---

## Liste des figures et des tableaux

Figure 1. Structuration progressive de l'enseignement et de la recherche en géosciences à l'UBS depuis 2001. ....	10
Figure 2. Localisation en Europe occidentale des principaux sites étudiés. ....	14
Figure 3. Localisation des sites étudiés de Penmac'h à La Loire et des thématiques abordées.....	14
Figure 4. Succession des différentes activités de recherche de 1990 à 2017, en fonction de la fenêtre temporelle étudiée. ....	15
Figure 5. Les programmes et activités de recherche développés à l'Université Bretagne Sud comme maître de conférences depuis septembre 2001. ....	16

**Les systèmes littoraux passés, actuels et futurs :  
Approches paléobiologiques (foraminifères benthiques)  
et morphosédimentologiques**

---

**Evelyne Goubert**

Maître de Conférences - Section 36

---

15 septembre 2017

---

**Sommaire de la seconde partie : Partie scientifique**

<b>I. Contexte général des activités de recherche depuis 1990.....</b>	<b>37</b>
I.1. Préambule scientifique .....	37
I.2. Les thématiques et les principaux sites d'études .....	37
I.3. La succession des activités de recherche depuis 1990 .....	39
<b>II. Les modalités de suivi et d'enregistrement du fonctionnement des systèmes littoraux par les foraminifères.....</b>	<b>41</b>
II.1. Quelques notions sur les foraminifères benthiques .....	41
II.2. Les foraminifères benthiques bio-indicateurs des systèmes littoraux .....	45
II.2.a. Préambule historique .....	45
II.2.b. Généralités sur la bio-indication.....	45
II.2.c. Approche statistique sur les assemblages actuels d'un estuaire .....	46
II.2.d. L'approche morphofonctionnelle des groupements écologiques.....	49
II.2.e. L'approche par diagramme rang-fréquence .....	50
II.2.f. Les indices biotiques basés sur les foraminifères benthiques.....	51
II.3. Le cas des Elphidium excavatum de la baie et de l'estuaire de la Vilaine .....	55
<b>III. La reconstitution des paléoenvironnements/paléoclimats .....</b>	<b>58</b>
III.1. Les paléoenvironnements de la crise messinienne.....	58
III.1.a. La crise messinienne en quelques mots .....	58
III.1.b. Le bassin de Sorbas .....	59
III.1.c. La coupe de Los Yesos.....	60
III.1.d. La crise de salinité messinienne une crise biologique pour les foraminifères benthiques ?.....	62
III.2. L'Holocène de l'Europe de l'Ouest.....	63
III.2.a. Préambule et localisation des sites étudiés .....	63
III.2.b. Le comblement de la vallée de la Loire à Nantes .....	66
III.2.c. Les étangs lorientais de Lannéec et du Loc'h : ouverture/fermeture des étangs et changements climatiques rapides ? .....	73
III.2.d. Le Loch Sunart : mise en évidence des changements climatiques rapides ? .....	76
III.2.e. L'identification de phases majeures dans les fluctuations environnementales : les niveaux à turritelles d'Ecosse et de Bretagne Sud.....	77

<b>IV. Études intégrées : dynamique hydromorphosédimentaire, foraminifères actuels, reconstitutions paléoenvironnementales et activités humaines</b> .....	<b>79</b>
IV.1. Les relations entre les activités humaines et les environnements littoraux.....	79
IV.1.a. Des systèmes naturels vers des anthroposystèmes .....	79
IV.1.b. Les différentes études menées sur le littoral morbihannais .....	79
IV.2. Présentation générale de la Bretagne Sud.....	80
IV.2.a. Les caractéristiques géographiques, géologiques et morphostructurales.....	80
IV.2.b. Les facteurs forçants hydrométéorologiques .....	82
IV.2.c. Les grandes caractéristiques morphobathymétriques et sédimentologiques du plateau continental sud-breton.....	83
IV.2.d. Les activités humaines.....	84
IV.3. La baie et l'estuaire de la Vilaine de 8 000 ans à nos jours : synthèse, relevés et modélisations.....	87
IV.3.a. Les principales caractéristiques de l'estuaire de la Vilaine .....	87
IV.3.b. La dynamique hydromorphosédimentaire depuis 1960 : des suivis aux modèles numériques .....	89
IV.3.c. Synthèse de la dynamique sédimentaire à l'échelle de la baie de Vilaine depuis 8 000 ans. ....	100
IV.4. Le Golfe du Morbihan 1 : modèle de distribution des corps sédimentaires et des foraminifères benthiques .....	103
IV.4.a. Présentation du Golfe du Morbihan et des campagnes d'acquisition de données .....	103
IV.4.b. Distribution des faciès et des corps sédimentaires .....	105
IV.4.c. Modèle de distribution des foraminifères benthiques dans le Golfe du Morbihan .....	105
IV.4.d. Participation à la carte géologique de Vannes (1/50 000) du BRGM .....	107
IV.5. Le Golfe du Morbihan 2 : la conchyliculture .....	108
IV.5.a. Impact des pratiques ostréicoles sur la biodiversité des foraminifères benthiques .....	108
IV.5.b. Les gisements de palourdes du Golfe du Morbihan.....	110
IV.6. La Baie de Quiberon : le comblement de la baie et son fonctionnement actuel .....	113
IV.6.a. La carotte MD08-3204CQ : Mise en évidence de changements climatiques rapides depuis 9 000 ans .....	113
IV.6.b. Risques Conchylicoles en Baie de Quiberon (RISCO) : distribution des foraminifères et relation avec le cycle de vie des huîtres.....	115
IV.7. Les éléments traces métalliques dans les environnements littoraux du Morbihan .....	120
IV.7.a. Distribution des ETMs dans les sédiments de surface du Morbihan.....	120
IV.7.b. Biodisponibilité et spéciation solide des ETMs.....	122
IV.7.c. Les ETMs dans les ports du Morbihan.....	123
IV.7.d. Les ETMs en Baie de Quiberon, les foraminifères et la mortalité des huîtres.....	126
<b>V. Conclusions et perspectives</b> .....	<b>128</b>
<b>VI. Références bibliographiques</b> .....	<b>131</b>
<b>VII. ANNEXES</b> .....	<b>141</b>
<b>VIII. Liste des figures et des tableaux</b> .....	<b>151</b>

---

# I. Contexte général des activités de recherche depuis 1990

## I.1. Préambule scientifique

Au cours des temps géologiques, les systèmes littoraux et marins ont subi diverses fluctuations et événements extrêmes à échelle globale et locale. Ces événements ont deux principales conséquences, séparées ou couplées : la migration des systèmes littoraux (destruction / reconstruction) et la modification des paramètres environnementaux (oxygène, matières organiques, température, salinité, courants, flux sédimentaires). Parmi les événements majeurs, nous pouvons noter les baisses extrêmes du niveau marin (-250 m à l'échelle globale au cours du Permien, -1 500 m en Méditerranée au cours du Messinien), les fluctuations glacio-eustatiques (de  $\pm 50$  à  $\pm 120$  m au cours des 3 derniers millions d'années), ainsi que les crises anoxiques et dystrophiques (les crises de l'Ordovicien, du Permien, du Crétacé, du Paléogène, du Quaternaire). Tous ces événements et fluctuations sont d'origine tectonique, volcanique, climatique, eustatique, météoritique, mais depuis 10 000 ans un facteur forçant nouveau est apparu : l'Homme qui s'est sédentarisé progressivement. Cette sédentarisation s'est traduit par des modifications des cycles sédimentologiques, hydrologiques, géochimiques et biologiques affectant très rapidement les domaines littoraux : mobilisation des sols par l'érosion suite aux phases de déforestation dès le Néolithique, modifications de la composition des matières en suspension et des eaux de ruissellement, aménagement de la morphologie des cours d'eau, variations des débits liquides et solides arrivant au niveau des littoraux.

Par définition, ces écotones, aux interfaces océan/fleuve/continent, sont des milieux très changeants qui répondent très rapidement aux variations environnementales. Ils sont les premiers affectés par les variations du niveau marin, les apports en nutriments et en particules en suspension et plus globalement par les changements du climat et par toutes les fluctuations induites par les activités humaines.

Quelle que soit l'époque, il y a plusieurs millions d'années ou aujourd'hui, le fonctionnement d'un système littoral et ses fluctuations ou dérèglements peuvent être suivis et enregistrés par les populations d'organismes et par les dépôts sédimentaires.

## I.2. Les thématiques et les principaux sites d'études

Depuis 1990, avec une première étude pour reconstituer les paléoenvironnements holocènes d'un site archéologique à partir des foraminifères benthiques d'une carotte des marais maritimes atlantiques, mes activités de recherche se sont toujours articulées autour des **milieux littoraux** :

- ✓ Caractérisation et dynamique spatio-temporelle des **environnements littoraux actuels** et des **foraminifères benthiques** : calibration biologique des foraminifères comme bio-indicateurs de la qualité actuelle et passée des milieux littoraux ; modalités d'enregistrement des variations environnementales dans les archives sédimentaires ; suivis sédimentologiques et morphodynamiques, impacts des événements ponctuels et extrêmes sur l'évolution des systèmes littoraux à des échelles temporelles et spatiales variées,
- ✓ Reconstitution des **paléoenvironnements** et des **paléoclimats** au niveau des littoraux de l'Europe de l'Ouest au **Cénozoïque** et à l'**Holocène**,
- ✓ Les relations entre **activités humaines**, le **fonctionnement des environnements littoraux** et les **foraminifères benthiques** : utilisation des foraminifères pour estimer l'impact des activités ostréicoles ; qualité des milieux pour la conchyliculture ; aménagement des littoraux et envasement ; teneurs des sédiments de surface en éléments traces métalliques

Les différents travaux se répartissent en Europe occidentale aussi bien à terre qu'en mer, de l'amont des estuaires jusqu'à une bathymétrie d'une centaine de mètres (Figure 1 et Figure 2).

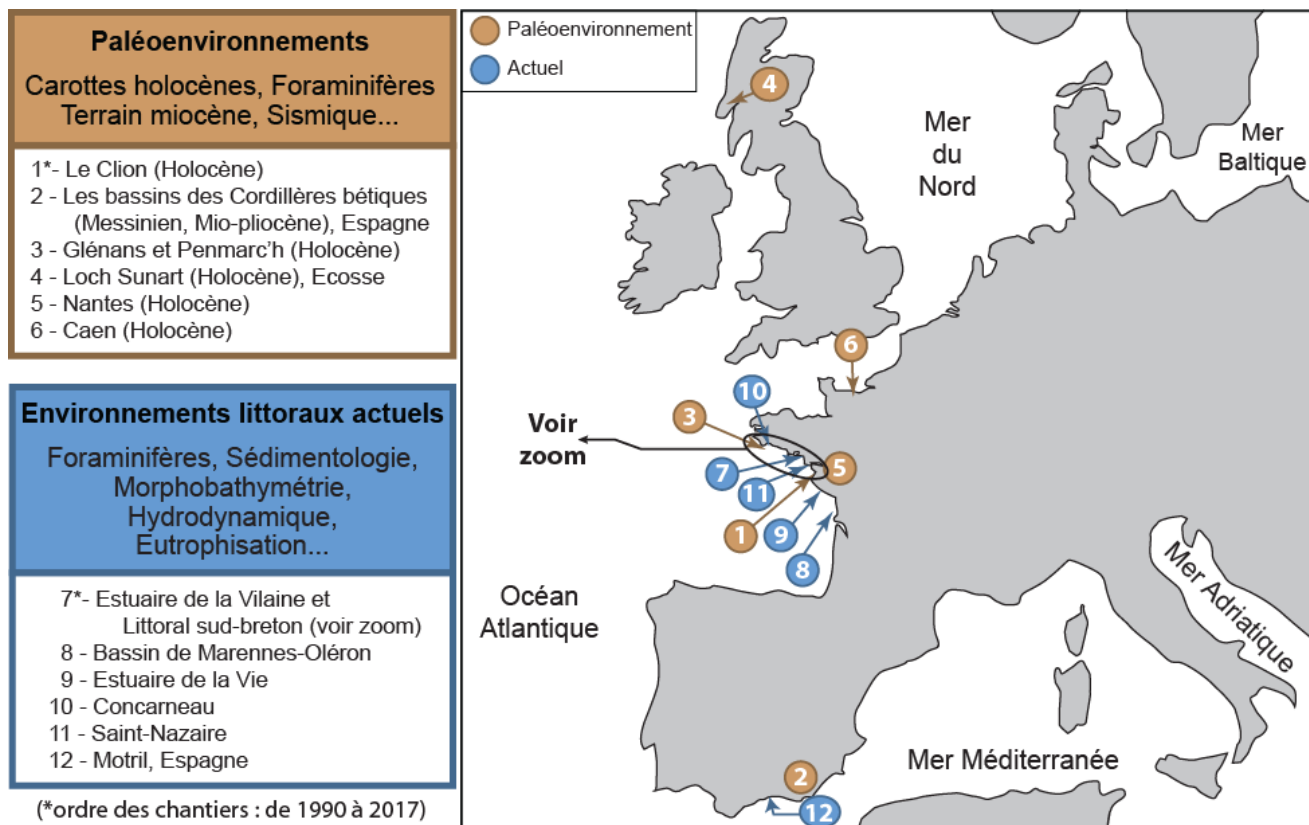


Figure 1. Localisation en Europe occidentale des principaux sites étudiés.

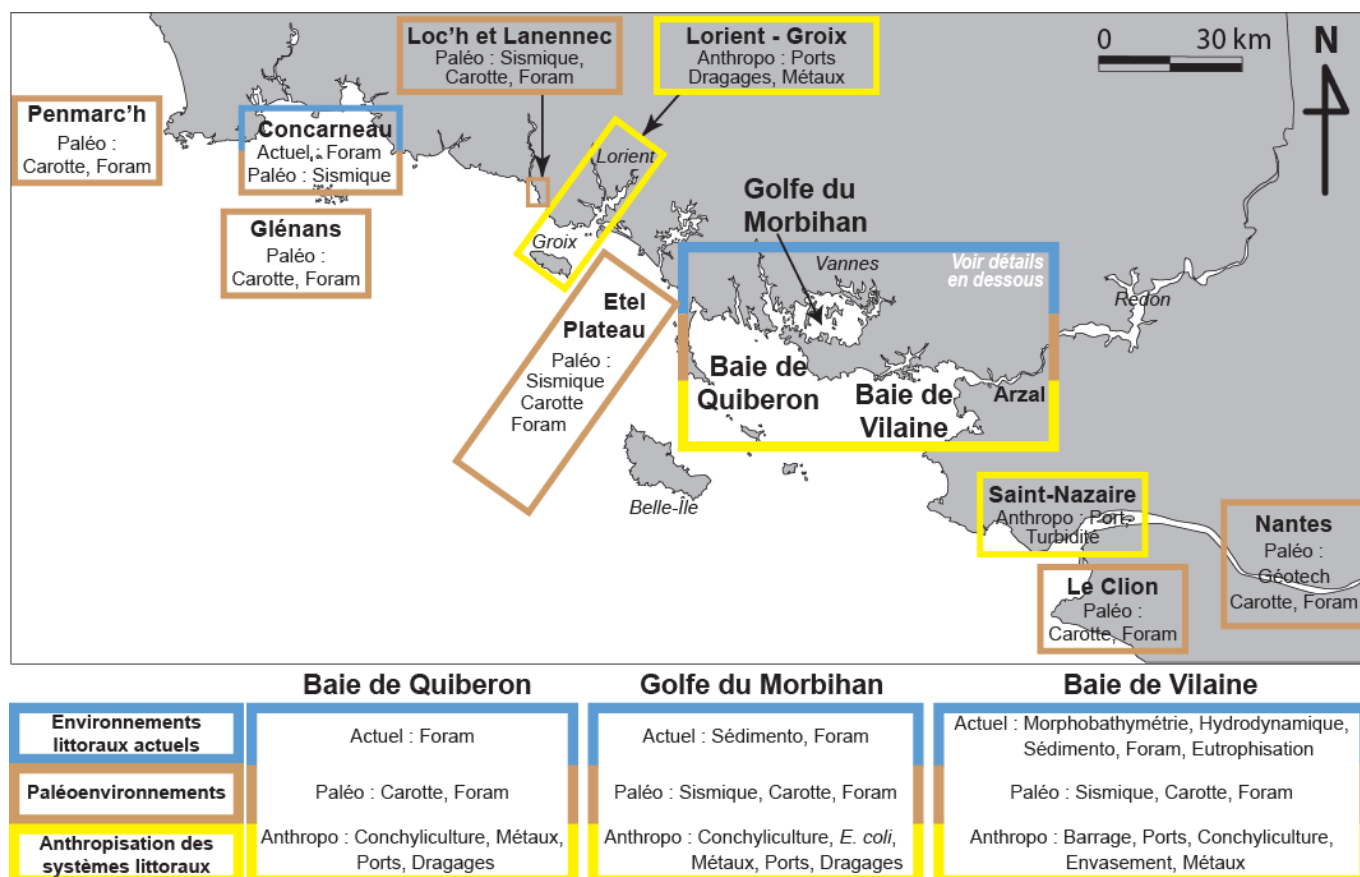
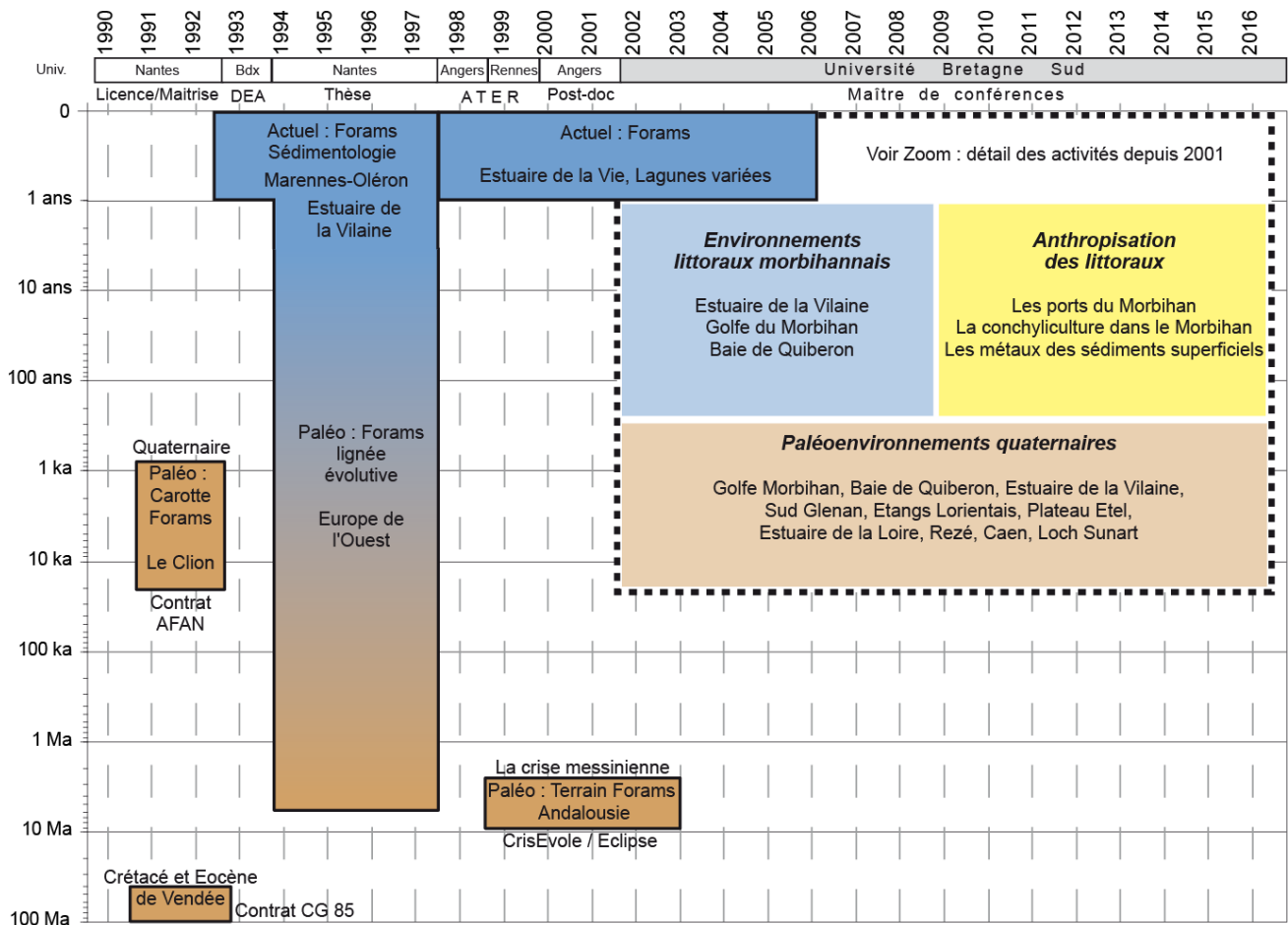


Figure 2. Localisation des sites étudiés de Penmarc'h à La Loire et des thématiques abordées.

### 1.3. La succession des activités de recherche depuis 1990

Les différentes activités se sont organisées en fonction des universités et des projets scientifiques des laboratoires dans lesquels j'ai exercé avant 2001 (Nantes, Rennes et Angers) puis en fonction des financements à partir de mon recrutement comme maître de conférences en septembre 2001 à l'Université Bretagne Sud (Figure 3 et Figure 4).



**Figure 3. Succession des différentes activités de recherche de 1990 à 2017, en fonction de la fenêtre temporelle étudiée.**

De 1990 à 1992, en licence et maîtrise de géologie fondamentale et appliquée à l'Université de Nantes, j'ai eu deux activités de recherche : un contrat avec l'AFAN (Association Française d'Archéologie Nationale) pour reconstituer le paléoenvironnement holocène d'un site archéologique au Clion (Loire-Atlantique) à partir des foraminifères benthiques et des contrats avec le Conseil Général de Vendée pour faire l'inventaire des gisements de graviers aquifères du Crétacé et l'Eocène déposés en milieu littoral et estuarien dans le bassin de Challans/Soulans (Vendée).

D'octobre 1992 à fin 1997, j'ai poursuivi en DEA à l'Université de Bordeaux puis en thèse à Nantes en océanographie, climatologie et géosciences du littoral afin de mieux comprendre l'articulation entre le fonctionnement actuel des environnements littoraux et la reconstitution de leur fonctionnement passé à partir de l'enregistrement par les foraminifères benthiques. Les travaux de DEA et de thèse ont porté sur l'étude d'une espèce de foraminifère benthique qui prolifère actuellement dans l'estuaire de la Vilaine (Morbihan) et dont les écophénotypes se répartissent le long des côtes européennes en fonction de la température et des variations climatiques cénozoïques. La reconstitution de la lignée évolutive du Miocène à l'actuel a montré les occurrences de ces écophénotypes en fonction de l'entrée progressive en glaciation.



En 1998, mon recrutement comme ATER à l'Université de Rennes s'est traduit par un élargissement de la fenêtre temporelle dans le cadre des programmes « CrisEvole » puis « Eclipse » pilotés par Didier Néraudeau. Je me suis alors tournée vers l'enregistrement de la crise messinienne par les foraminifères (extinctions/apparitions, niveau marin, ventilation de la masse d'eau et salinité) dans les terrains mio-pliocènes du bassin de Sorbas (Andalousie, Espagne).

Les périodes universitaires, 1997/98 (ATER) puis 1999/2001 (contrat enseignement et contrat post-doc) se sont déroulées à l'Université d'Angers dans le laboratoire LEBIM dirigé par Jean-Pierre Debenay. Au cours de ces trois années, j'ai pu participer au développement des études des foraminifères benthiques actuels de différents environnements littoraux avec des approches méthodologiques variées menées par les doctorants et enseignants-chercheurs du laboratoire : suivis mensuels, distribution spatiale, impact de contaminations sur le développement et la distribution des foraminifères, variations morphologiques en fonction des paramètres environnementaux...

À partir de 2001, en tant que maître de conférences à l'Université Bretagne Sud, mes activités de recherche ont été menées dans le cadre de différents programmes de recherche en réponse à des questionnements scientifiques en relation avec les problématiques locales et régionales concernant le fonctionnement des environnements littoraux, les usages et les impacts des usages (Figure 4).

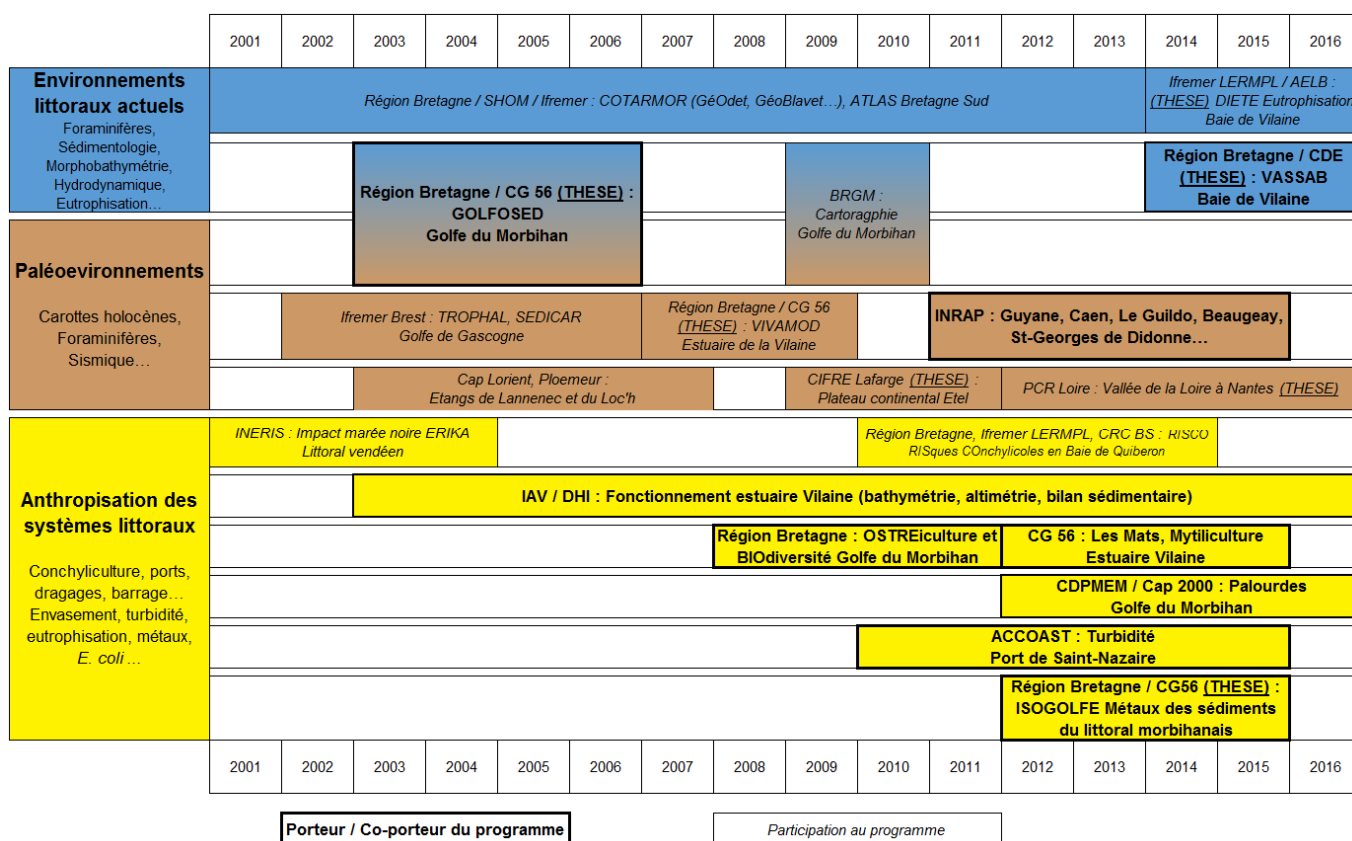


Figure 4. Détail des activités et des programmes de recherche développés à l'Université Bretagne Sud comme maître de conférences depuis septembre 2001.

L'estuaire et la baie de Vilaine, la baie de Quiberon et le Golfe du Morbihan, ayant été l'objet d'études intégrées, seront abordés séparément après avoir présenté les approches menées sur les autres sites (Foraminifères bio-indicateurs, Paléoenvironnements ; Figure 2).

## II. Les modalités de suivi et d'enregistrement du fonctionnement des systèmes littoraux par les foraminifères

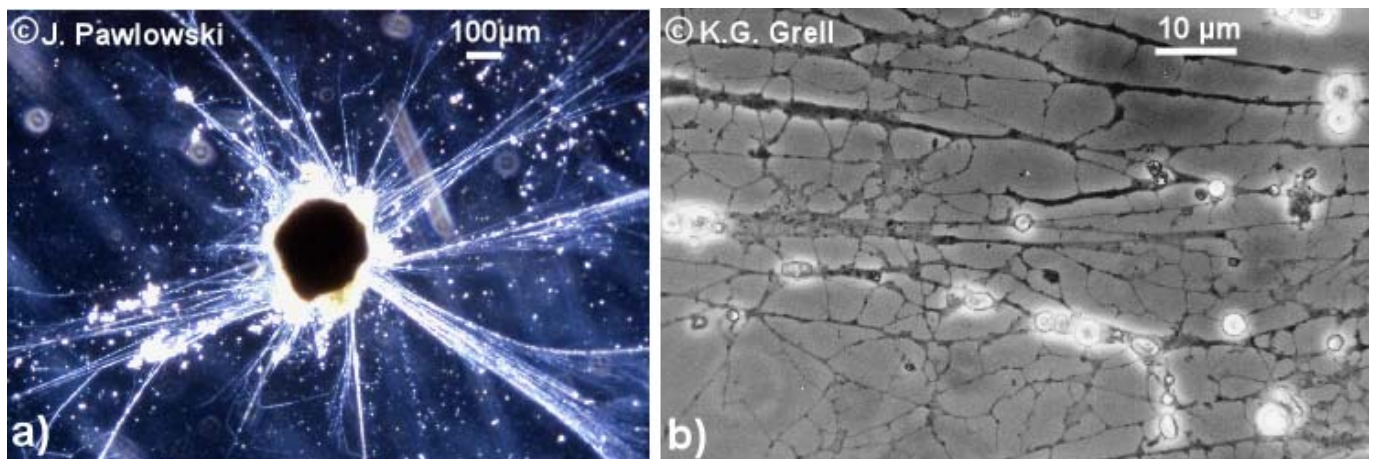
### II.1. Quelques notions sur les foraminifères benthiques

Les foraminifères sont des organismes constitués d'une seule cellule entourée d'un squelette appelé un test. Les foraminifères sont considérés actuellement comme un embranchement dans la nouvelle classification phylogénétique du vivant (Lecointre & Le Guyader, 2016) :

Eucaryotes => Bicontes => Chromalvéolés => Clade SAR => Rhizariens => Foraminifères

**La cellule** d'un foraminifère est une cellule animale qui contient un cytoplasme granulo-réticulé caractérisé par une très grande quantité de réticulum endoplasmique, de vésicules fibrillaires, de vésicules de Golgi, de vésicules résiduelles de phagocytose et de gouttelettes lipidiques et caractérisé par des expansions cytoplasmiques correspondant à des pseudopodes très fins réticulés (Figure 5). Ces pseudopodes servent à la locomotion, à la fixation sur un substrat, à la nutrition et à l'édification du test.

La membrane cellulaire est protégée par une couche organique glycoprotéique plus ou moins épaisse puis recouverte d'un squelette. Dans la grande majorité des cas l'ensemble de l'individu est entouré par un cocon constitué de déchets organiques placés par les pseudopodes (Figure 5).



**Figure 5. a) Foraminifère vivant avec les pseudopodes et la couche de déchets organiques visibles en microscopie à contraste de phase ; b) Pseudopodes granulo-réticulés en microscopie électronique à transmission.**



## Les traits de vie des foraminifères

Les foraminifères sont soit planctoniques, soit benthiques. Les traits de vie des foraminifères correspondent aux grandes phases et caractéristiques du cycle de vie (Tableau 1). Dans le cas des environnements littoraux, la hauteur de la colonne d'eau n'est pas suffisante pour avoir un développement complet du cycle de vie des foraminifères planctoniques.

Ces traits de vie très variables permettent aux foraminifères benthiques de coloniser une grande gamme d'environnements et de maintenir des populations grâce aux nombreuses modalités de reproduction même dans le cas de conditions environnementales stressantes.

**Tableau 1. Traits de vie des foraminifères benthiques.**

Trait de vie	Explications	Dans le cas des environnements littoraux sud-bretons
Reproduction	La reproduction s'effectue par division de la cellule. Il peut alors s'agir d'une reproduction sexuée ou de deux modes de reproduction asexuée.	Printemps : bloom dû à des reproductions sexuées Été et automne : reproductions asexuées et quelques blooms Hiver : reproduction stoppée, mais la croissance se poursuit.
Régime alimentaire	Dans la grande majorité des cas, les foraminifères sont hétérotrophes suspensivores et détritivores. Ils ingèrent par phagocytose des fragments de matières organiques. Mais ils peuvent également faire de la kleptomanie de chloroplastes de diatomées, par exemple. Les chloroplastes sont maintenus en vie dans le cytoplasme. Les individus sont alors mixotrophes ou autotrophes temporaires. De plus, certaines espèces sont capables de vivre en symbiose avec des bactéries qui se développent dans des sédiments réduits et riches en matières organiques.	Les environnements étant peu profonds et les zones intertidales étant fortement développées, le régime mixotrophe est très présent. Les niveaux vaseux réduits peuvent être occupés par des espèces vivant en symbiose avec des bactéries.
Durée de vie d'un individu	La mort d'un foraminifère peut correspondre à la reproduction par division de la cellule ou à une mort réelle de la cellule due à des conditions défavorables	6 mois à 2 ans

## Les milieux et modes de vie des foraminifères benthiques

Les foraminifères ont colonisé tous les environnements marins, depuis la plaine abyssale jusqu'aux milieux littoraux les plus extrêmes (marais maritime, amont des estuaires, lagune hypersalée...). Ils peuvent vivre fixés ou posés sur un support (végétal, rocher, coquille), posés sur le sédiment, à l'interface eau/sédiment, dans le sédiment (jusqu'à 15 cm de profondeur). Pour chaque bathymétrie, ce motif de répartition est reproduit, excepté pour les espèces qui vivent fixées ou en association avec les végétaux pour lesquelles la tranche bathymétrique dépend de la profondeur de pénétration de la lumière (Figure 7). Les foraminifères peuvent donc être utilisés comme bioindicateurs.

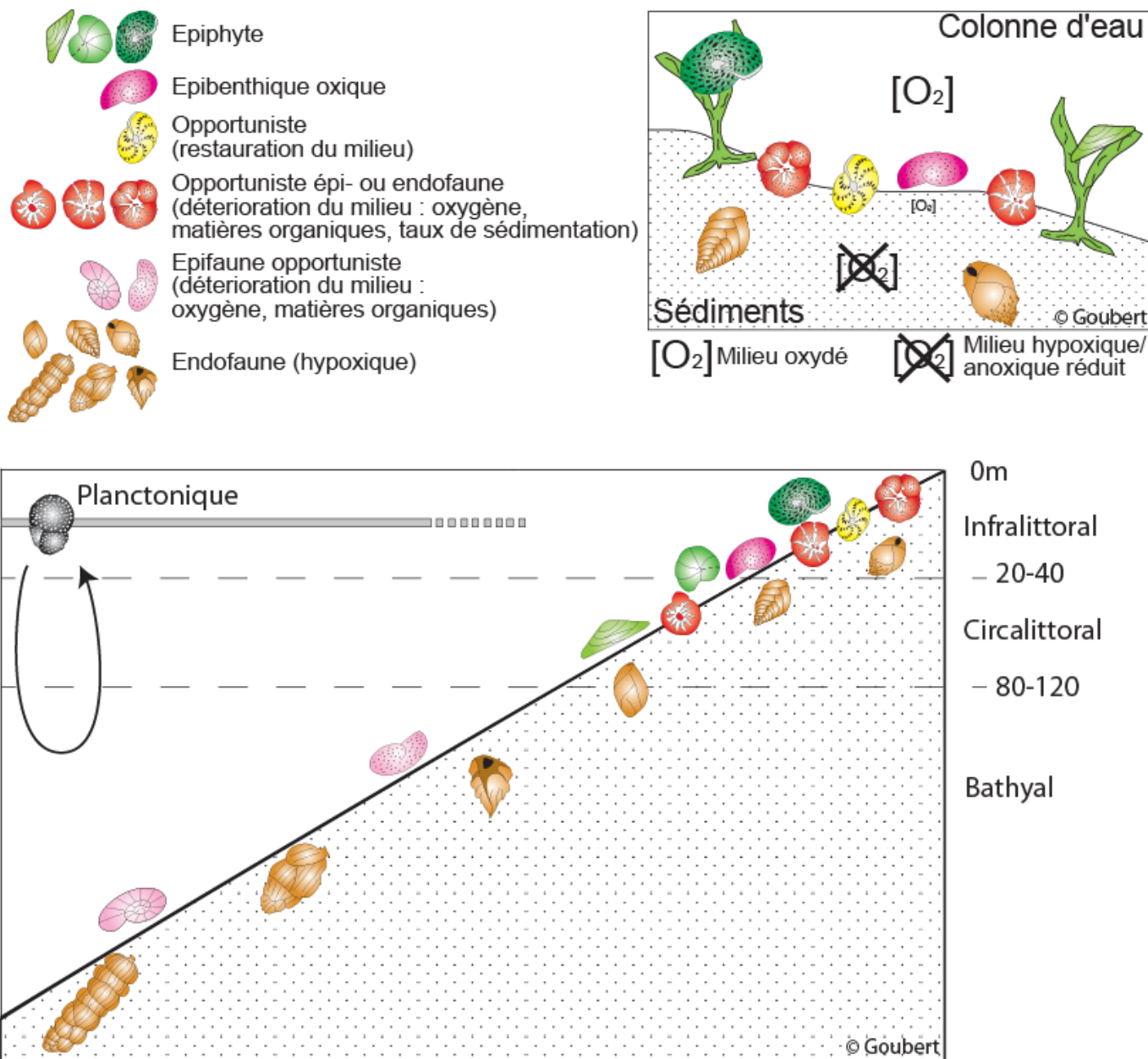


Figure 7. Milieux et modes de vie des foraminifères.

---

## **II.2. Les foraminifères benthiques bio-indicateurs des systèmes littoraux**

### **II.2.a. Préambule historique**

Leur large distribution temporelle aussi bien que spatiale confère aux foraminifères un statut particulier parmi les organismes marins. Ces organismes unicellulaires, caractérisés par un squelette minéralisé dépassant parfois le millimètre, présents dans tous les environnements marins dès la fin du Protérozoïque, sont étudiés depuis plus de deux siècles par des naturalistes, des systématiciens, des géologues, des biologistes et des écologues. Au fil des années, les axes de recherche ont évolué en fonction des enjeux scientifiques, économiques et des effets de mode : recherche des ressources (pétrole, granulats...), reconstitutions paléoenvironnementales, suivi de la qualité des environnements dans le cadre des réglementations européennes (DCE, DCSMM...).

L'utilisation des foraminifères comme bio-indicateurs actuels et fossiles est abordée par d'Orbigny dès la proposition du nom « Foraminifère » en 1826. À partir des années 1920, les distributions temporelles et spatiales des espèces de foraminifères constituent les principales préoccupations des chercheurs, afin d'être utilisées en géologie appliquée à la recherche de ressources naturelles. À partir des années 1950, de nombreuses études portant sur la distribution géographique et sur l'écologie ont été entreprises afin d'apporter une dimension paléoécologique aux travaux sur les organismes fossiles. En parallèle, des années 1930 à maintenant, la reproduction, la croissance et les dynamiques des populations ont été étudiées par de nombreux biologistes et écologues (Alve, Buzas, Grell, Hemleben, Hofker, Jepps, Lee, Murray, Parker, Phleger, Röttger...).

Depuis les années 1990, sous la pression d'une demande écologique de la société, les études se sont considérablement développées dans des environnements menacés par l'Homme comme les littoraux (estuaires, lagunes, deltas...). Ces milieux sont primordiaux pour les océans (nurseries, production biologique) et pour l'Homme (zones de concentrations urbaines, industrielles et agricoles). Ainsi, les foraminifères benthiques sont maintenant étudiés selon différentes optiques scientifiques et sociétales : distribution des espèces, relations entre présence d'une espèce et paramètres physico-chimiques, études *in vitro*, dynamique des populations, marqueurs de pollutions, homogénéisation des approches méthodologiques, définition d'index...

### **II.2.b. Généralités sur la bio-indication**

La bio-indication de la qualité des environnements s'effectue à six niveaux d'organisation (Elliott, 2011) : l'écosystème, la communauté, la population, l'individu, les tissus et la cellule. Dans le cas des foraminifères, ces niveaux peuvent se décliner de la manière suivante : nombre d'espèces, indices de diversité (Shannon, équitabilité...), assemblages (nombre d'individus par espèce) en abondances relatives ou absolues, groupements écologiques basés sur les principes de morphofonction, variations morphologiques au sein d'une espèce, caractéristiques cellulaires en microscopie, teneurs des squelettes en isotopes, en éléments traces...

Dans tous les cas, l'approche méthodologique doit être validée par des calibrations adaptées au système littoral étudié et à la bio-indication souhaitée (Spilmont, 2013) : caractériser un état moyen de l'environnement sur un an ou sur 10 ans, un phénomène extrême et fugace, une variation d'un paramètre, un paramètre à action directe ou indirecte, une action couplée de différents paramètres, un contaminant particulier. De plus, il est important d'estimer si les amplitudes des variations du fonctionnement du système littoral ne dépassent pas les capacités de l'approche méthodologique choisie. Dans le cas où il n'est pas possible d'effectuer une calibration, la méthode choisie doit être robuste pour être appliquée sans distorsion.

---

Dans le cas de la bio-indication en milieu littoral, le principal obstacle est l'amplitude des variations environnementales importantes dues au fonctionnement hydromorphosédimentaire de ces écosystèmes peu profonds. Les fortes variations des paramètres environnementaux (Martins et al., 2016) et une dynamique sédimentaire active de la couche où vivent les foraminifères entraînent le développement d'espèces tolérantes/opportunistes contribuant ainsi à la réduction de la richesse spécifique et à l'augmentation de l'abondance (Murray, 2006). Ainsi dans le cas des estuaires, les espèces de foraminifères benthiques qui se développent sont très souvent les mêmes (Mojtahid et al., 2016) : *Ammonia tepida*, *Haynesina germanica*, *Elphidium excavatum*, *Quinqueloculina seminula*, *Miliolinella subrotunda*, *Trochammina inflata*, *Jadammina macrescens*. L'usage de ces espèces pour déceler une variation du fonctionnement d'un estuaire nécessite une approche poussée du traitement statistique des données, le développement d'indices spécifiques (Debenay, 1990) et/ou des études des variations morphologiques fines de certaines espèces des genres *Ammonia* (Debenay et al., 1998 ; Hayward et al., 2004 ; Saad & Wade, 2016) et *Elphidium* (Goubert, 1997a et 1997b ; Pillet et al., 2013 ; Darling et al., 2016). Depuis la mise en place des réglementations européennes sur la qualité des environnements avec la DCE et la DCSMM, de nombreux indices basés sur les foraminifères benthiques ont été proposés (Bouchet et al., 2012 ; Schönfeld et al., 2012 ; Alve et al., 2016).

La caractéristique de la bio-indication par les foraminifères par rapport aux autres organismes marins, est l'application aussi bien pour le fonctionnement actuel des environnements littoraux que pour la reconstitution du fonctionnement passé. *A priori*, ces deux usages créent une opposition entre une bio-indication pour l'actuel basée sur les biocénoses et une bio-indication par les assemblages fossiles qui correspondent aux accumulations de biocénoses mortes sur place puis modifiées par les filtres taphonomiques *s.l.* (préservation spécifique des squelettes en fonction de la nature et de la taille, diagenèse précoce, dynamique sédimentaire érosion/dépôt, méthodologie d'extraction et de comptage des foraminifères... Berkeley et al., 2007 ; Loubere & Rayray, 2016).

Au cours des travaux que j'ai pu mener sur les foraminifères benthiques, différentes approches de bio-indication actuelles ont été mises en œuvre sur de l'actuel mais aussi sur des assemblages fossiles. Seules les méthodes sont abordées dans les points suivants ; les discussions de certains résultats seront présentées dans les parties III et IV.

### II.2.c. Approche statistique sur les assemblages actuels d'un estuaire

Le principal cas d'étude est celui de la distribution des foraminifères benthiques le long de l'estuaire de la Vie (Vendée). Mensuellement pendant un an et en quatorze stations, quinze paramètres environnementaux sur la colonne d'eau ont été mesurés et des échantillons de sédiments ont été prélevés pour le comptage des foraminifères (Figure 8). À partir de cette base de données très conséquente, différents traitements mathématiques et statistiques ont été menés pour comprendre la dynamique annuelle de la distribution des foraminifères benthiques sous la contrainte du fonctionnement de l'estuaire de la Vie (Figure 9).

La dynamique de population est fortement contrainte par les variations environnementales estuariennes. La distribution générale des espèces au sein de l'estuaire suit un gradient du pôle marin vers le pôle continental en fonction de l'amplitude des variations des paramètres environnementaux.

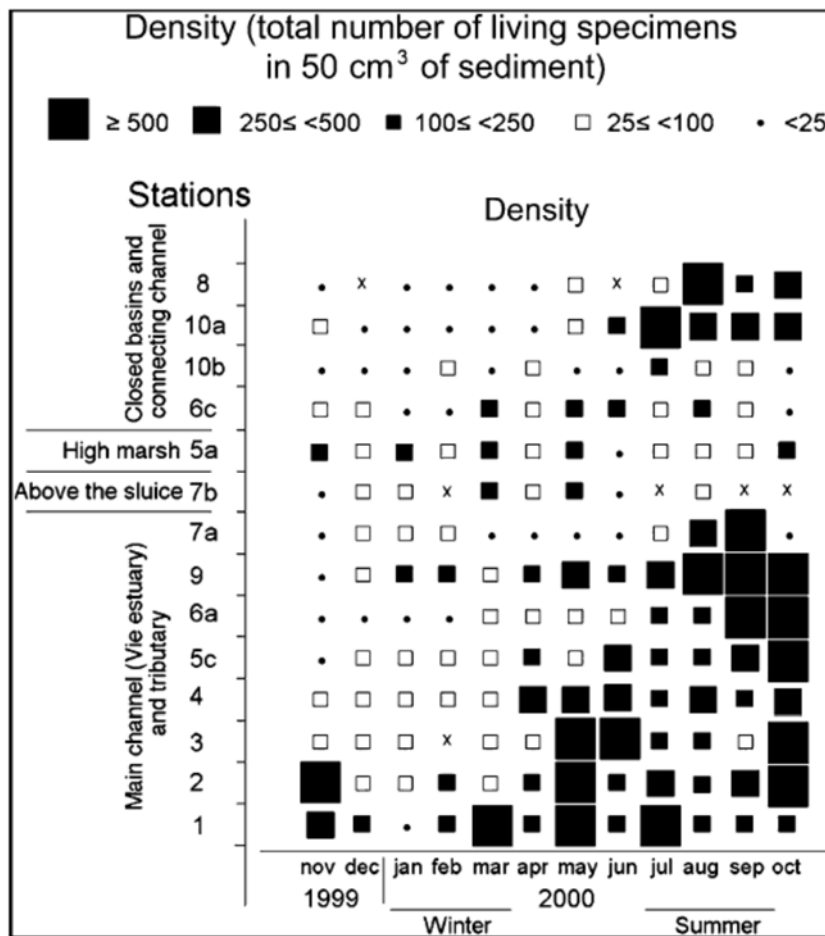
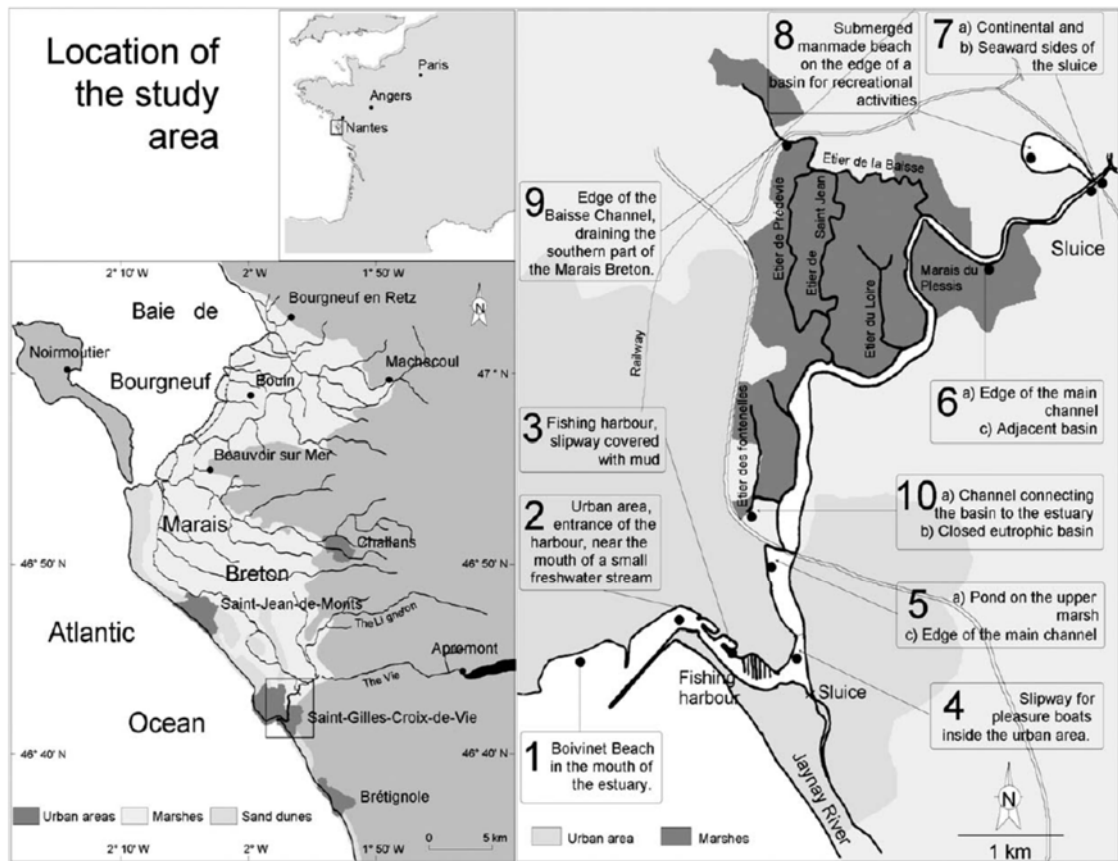


Figure 8. Carte de localisation des points de prélèvement dans l'estuaire de la Vie ; Diagramme spatio-temporel de la densité de foraminifères vivants (Debenay et al., 2006).



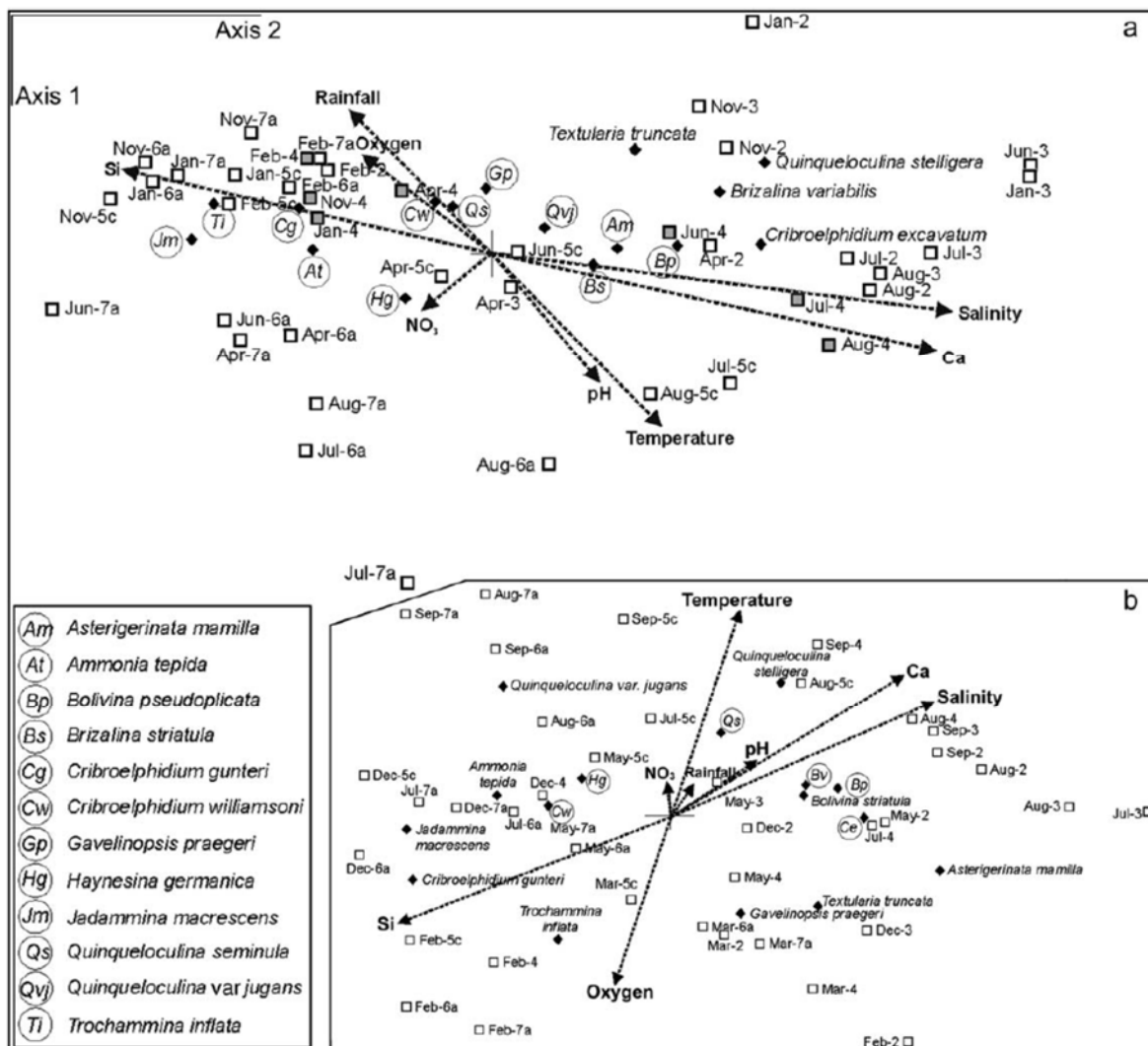


Figure 9. Traitements des données de l'estuaire de la Vie (Debenay et al., 2006) : Représentation des analyses canoniques des correspondances.

**Participations aux programmes de recherche :**

- > Thèse : E. Armynot du Châtelet (U. Angers, J.P. Debenay)
- > INERIS : Le littoral vendée, avant/après la marée noire de l'Erika (U. Angers, J.P. Debenay)

**Travaux réalisés**

- Bicchi, E., **Goubert E.**, Debenay, J.P., Armynot du Chatelet, E., 2002. How to characterise a paralic system: with total or with living foraminiferal assemblages? International Symposium on Foraminifera FORAMS 2002 (4-8 février 2002, Perth, Australie) p. 25.
- Debenay J.P., **Goubert E.**, Bicchi E., Redois F., Sylvestre F., Armynot du Chatelet E., 2003. Fonctionnement hydrodynamique d'un système estuarien contrôlé par des écluses : exemple de la Vie (Vendée, France). Journal de Recherche Océanographique, 28, 3-4, 256-267.
- Debenay J.P., Bicchi E., **Goubert E.**, Armynot du Châtelet E., 2006. Spatio-temporal distribution of benthic foraminifera in relation with estuarine dynamics (Vie estuary, Vendée, W France). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 67, 181-197.

## II.2.d. L'approche morphofonctionnelle des groupements écologiques

Cette approche est basée sur le fait qu'une morphologie traduit une fonction qui est associée à des conditions de vie (mode et milieu de vie). Pour les espèces vivantes, il est possible de faire le lien entre la morphologie, les fonctions, les conditions de vie et les affinités écologiques. Dans le cas d'espèces fossiles ou d'espèces dont on ne connaît pas les affinités écologiques, il est possible d'estimer les conditions de vie à partir des traits morphologiques de l'espèce. On définit alors des groupes écomorphologiques. La définition de ces groupes est basée sur de nombreux travaux menés dans les années 1980 : Severin (1983), Jones & Charnock (1985), Bernhard (1986), Corliss and Chen (1988). Cette approche morphofonctionnelle a été menée sur les études de reconstitutions paléoenvironnementales du Messinien d'Andalousie (Figure 10) et sur différentes carottes holocènes.

Bathymetrical distribution	E.G.	Species
Infralittoral to circalittoral	(1) Paralic species epifaunal or shallow infaunal oxic to dysoxic	<i>Ammonia tepida</i> , <i>Haynesina germanica</i> , <i>Porosonion granosum</i>
	(2) Epifaunal or shallow infaunal oxic to dysoxic	<i>Ammonia beccarii</i> , <i>Oolina</i> sp., <i>Parafissurina</i> sp.
	(3) Epiphytic species, oxic preferentially photophile (ph) or sciaphile (sc)	<i>Textularia gramen</i> (sc), <i>Asterigerinata planorbis</i> , <i>Cancris auriculus</i> , <i>Lobatula lobatula</i> (sc), <i>Cibicides refulgens</i> (sc), <i>Elphidium aculeatum</i> (ph), <i>Elphidium crispum</i> , <i>Elphidium fichtellianum</i> , <i>Elphidium hauerinum</i> , <i>Elphidium margaritaceum</i> , <i>Globulina gibba</i> (sc), <i>Neoconorbina terquemi</i> (sc), <i>Rosalina globularis</i> (sc)
Circalittoral to bathyal	(4) Epifaunal, oxic	<i>Anomalinoidea granosus</i> , <i>Hanzawaia boueana</i> , <i>Cibicidoides ungerianus</i> , <i>Gyroidinoidea soldanii</i> , <i>Hoeglundina elegans</i> , <i>Neoponides schreibersii</i> , <i>Melonis pompiloides</i> (or shallow infaunal)
	(5) Infaunal, opportunistic (opp), dysoxic (dys)	<i>Martinottiella communis</i> , <i>Brizalina dentelata</i> (opp; dys), <i>Brizalina aff. dilatata</i> (opp; dys), <i>Bulimina aculeata</i> (opp; dys), <i>Bulimina echinata</i> (opp; dys), <i>Bulimina elongata</i> (opp; dys), <i>Bulimina minima</i> (opp; dys), <i>Glandulina laevigatus</i> , <i>Polymorphina</i> sp., <i>Reussella spinulosa</i> , <i>Uvigerina peregrina</i> (opp; dys), <i>Uvigerina rutila</i> (opp; dys)
From upper bathyal to lower bathyal	(6) Epifaunal, oxic	<i>Lenticulina calcar</i> , <i>Planulina ariminensis</i>
	(7) Infaunal, opportunistic (opp), dysoxic (dys)	<i>Bulimina costata</i> (opp; dys), <i>Uvigerina ? bononiensis</i> , <i>Rectuvigerina siphogenerinoides</i> (dys)

**Figure 10. Définition et distribution bathymétrique des groupes écomorphologiques de E.G.1 à E.G.7 (Goubert et al., 2001).**

### Participations aux programmes de recherche :

- > *CrisEvo* et *Eclipse* sur la crise messinienne (U. Rennes 1, D. Néraudeau)
- > Thèses : Z. Mokeddem (U. Caen, B. Tessier et A. Baltzer) ; G. Estournes (UBS, D. Menier)
- > PCR Loire : Comblement de la vallée de la Loire à Nantes (INRAP, R. Arthuis et U. Nantes, M. Monteil)

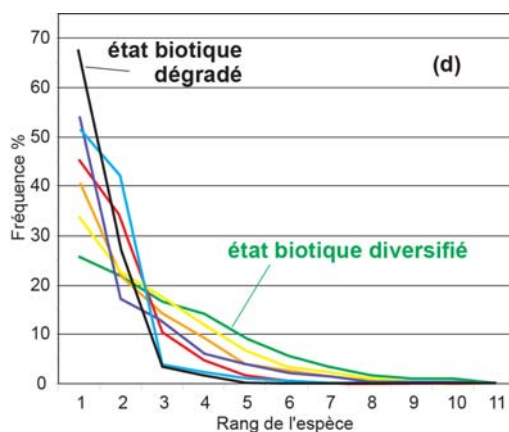
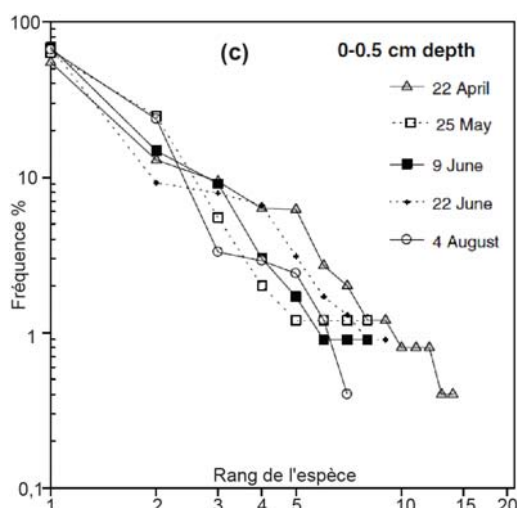
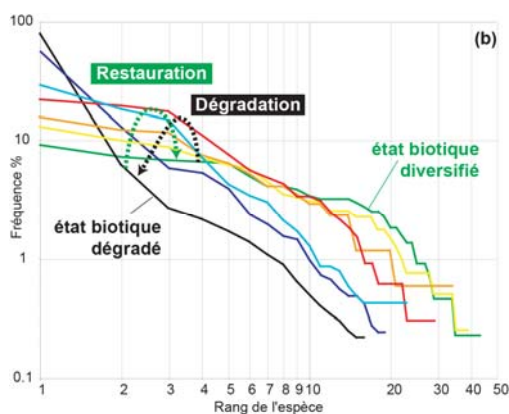
### Travaux réalisés

- Goubert E.**, Néraudeau D., Rouchy J.M., Lacour D., 2001. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordillera, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 61-78.
- Mokeddem Z., Baltzer A., **Goubert E.**, Clet-Pellerin M., 2010. Multiproxy reconstruction of palaeoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in a fjord environment: Loch Sunart (NW Scotland). From: Howe, J. A., Austin, W. E. N., Forwick, M. & Paetzel, M. (eds) *Fjord Systems and Archives*. Geological Society, London, Special Publications, 344, 341-355.
- Estournès G., Menier D., Guillocheau F., Le Roy P., Paquet F., **Goubert E.**, 2012. The paleo-Etel River incised valley on the Southern Brittany inner shelf (Atlantic coast, France): Preservation of Holocene transgression within the remnant of a middle Pleistocene incision? *Marine Geology*, 329-331, 1, 75-92.
- Arthuis R., Nauleau J.F., **Goubert E.**, Barbier-Pain D., Baudouin V., 2015. Reconstitution paléogéographique de la vallée de la Loire à Nantes depuis 8 000 ans. *PUR*, 22 pages.
- Baltzer A., Mokeddem Z., **Goubert E.**, Lartaud F., Labourdette N., Fournier J., Bourillet J.F., 2015. The "Turritella Layer": A Potential Proxy of a Drastic Holocene Environmental Change on the North-East Atlantic Coast. *Sediment Fluxes in Coastal Areas*, Coastal Research Library, 10, 3-21.
- Delaine M., Armynot du Châtelet E., Bout-Roumazielles V., **Goubert E.**, Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A., Arthuis R., 2015. Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyses: The infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *The Holocene*, 25, 407-420.

## II.2.e. L'approche par diagramme rang-fréquence

Rang	Échantillons							
	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	Ech 6	Ech 7	Ech 8
1	57.0	59.8	52.8	54.1	49.7	35.3	38.1	48.1
2	12.1	17.1	17.0	18.9	16.8	23.5	21.4	26.5
3	8.4	16.2	11.0	11.5	16.2	20.6	19.0	10.8
4	7.5	3.4	8.3	10.7	5.6	14.7	11.9	10.3
5	7.0	2.6	6.4	2.5	3.9	2.9	4.8	2.7
6	4.2	0.9	3.2	0.8	2.8	2.9	2.4	1.1
7	2.3	0.0	0.9	0.8	2.2	0.0	2.4	0.5
8	0.5	0.0	0.5	0.8	1.1	0.0	0.0	0.0
9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
10	0.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0

Rang de l'espèce Fréquences (%) triées par ordre décroissant



(a) Cette approche consiste à classer, pour chaque échantillon compté, les espèces par ordre décroissant d'abondances relatives (Figure 11a). Ainsi, l'espèce de Rang 1 est celle qui présente la fréquence la plus élevée dans l'échantillon, celle de Rang 2 présente la deuxième fréquence la plus élevée et ainsi de suite jusqu'aux dernières espèces qui ne sont représentées que par un individu. Pour un lot d'échantillons, ces données sont mises en graphique (Figure 11b) à axes logarithmiques (Legendre & Legendre, 1984). La succession des courbes indique l'état biotique du milieu et caractérise ainsi la dynamique biotique (Frontier, 1985) : stabilité, dégradation, restauration (Figure 11b). Cette méthode est classiquement utilisée en biologie marine à partir des données de macrofaune. Elle a été mise en œuvre par Bouchet (2007) et Bouchet et al. (2007) sur des assemblages vivants de foraminifères benthiques prélevés à différents moments pour détecter l'impact des activités ostréicoles (Figure 11c). La principale limite à cette méthode est qu'un état biotique donné peut être associé à des espèces différentes et à des conditions environnementales variées.

J'ai utilisé cette approche dans le traitement des données, non pas des foraminifères actuels vivants, mais dans le cas des assemblages fossiles de carottes holocènes. Dans ce cas, la diversité spécifique étant faible par échantillon, le diagramme n'est pas réalisé en bi-log pour une meilleure distinction des états biotiques (Figure 11d). De plus, le nombre d'échantillons étant souvent important, l'attribution d'une signification (dégradé ou non) à un échantillon est faite à partir d'une analyse statistique des assemblages en cluster par la méthode Ward's avec le logiciel PAST.

### Participations aux programmes de recherche :

- > Thèses : Z. Mokeddem (U. Caen, B. Tessier et A. Baltzer)
- > Les étangs lorientais (UBO, J.J. Tiercelin)

### Travaux réalisés

**Goubert E.**, Mokeddem Z., Baltzer A., 2007. Une nouvelle utilisation des foraminifères pour les reconstitutions paléoenvironnementales: la méthode rang/fréquence appliquée à l'étude du remplissage sédimentaire du Loch Sunart (NW, Ecosse) depuis 20 000 ans. 11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen,, 21-27 Octobre 2007.

Tiercelin J.J. coordinateur, 2008. Transferts littoraux à l'échelle millénaire : les leçons du littoral sud-breton. Rapport Projet INSU « Reliefs de la Terre ».

**Goubert** et al., publication en cours.

Figure 11. Principe de la méthode rang-fréquence (Goubert, en prép.) : (a) tableau de données ; (b) diagramme rang-fréquence et interprétation ; (c) échelle bi-log (Bouchet et al., 2007) ; (d) échelle non-log pour les échantillons à faible diversité spécifique.

## II.2.f. Les indices biotiques basés sur les foraminifères benthiques

Depuis bientôt 30 ans, différents auteurs ont été tentés de concevoir des indices biotiques à partir des foraminifères. L'un des premiers obstacles concerne la méthodologie de prélèvement, d'extraction et de comptage des foraminifères. Un groupe de réflexion (FOBIMO : FOraminiferal Blo-MOnitoring, Schönfeld et al., 2012) a donc été constitué afin de trouver un consensus en terme de méthodologie d'échantillonnage, d'extraction des foraminifères actuels et de comptage.

Quel que soit l'indice, ils sont tous basés sur :

- des formules de calcul intégrant parfois des facteurs multiplicatifs pour obtenir des valeurs plus faciles à manipuler ou bien basées sur l'utilisation de l'indice de Shannon-Wiener corrigé,
- le regroupement des espèces en catégories de sensibles à tolérantes à un paramètre,
- la nécessité de connaître les préférences écologiques des espèces pour les regrouper. Ces connaissances reposent soit sur de réelles études écologiques, soit sur des traitements statistiques ou soit sur des approches morphofonctionnelles.

Les indices ne constituent donc qu'une information chiffrée facile à illustrer le long d'une échelle ou par des nuances de couleur s'échelonnant de « milieu en mauvais état » à « milieu en bon état ». De plus, comme évoqué précédemment (II.2.b.), il faut être prudent sur la mise en place d'outils de bio-indication actuelle applicables aux reconstitutions paléoenvironnementales.

- **L'indice de confinement (Ic)**

Cet indice basé sur la notion de confinement selon Guélorget & Perthuisot (1983) a été défini par Debenay (1990) pour caractériser le confinement du domaine paralytique de l'estuaire de la Casamance (Sénégal), puis transposé pour être utilisé le long des côtes brésiliennes (Debenay et al., 1996), méditerranéennes (Debenay et al., 2005) et asiatiques (Debenay & Luan, 2006).

$$Ic = (C/B+C)-A/(A+B)+1)/2$$

Avec A : assemblage d'espèces traduisant une forte influence marine  
B : assemblage traduisant une influence continentale modérée à forte  
C : assemblage traduisant une très forte influence continentale.

Un Ic de 0 correspond à un environnement marin franc, un Ic de 1 à un environnement très fortement confiné à très forte influence continentale. A noter que cette notion de très forte influence continentale ne se traduit pas obligatoirement par des faibles salinités, mais par un ensemble de paramètres traduisant le faible renouvellement des masses d'eau et la qualité trophique continentale ou marine du milieu. Il s'agit d'un indice descripteur/intégrateur du fonctionnement global d'un environnement qui a été transposé pour de nombreuses provinces biogéographiques avec la prise en compte des différentes espèces. Cet indice peut être facilement mis en œuvre pour des échantillons fossiles.

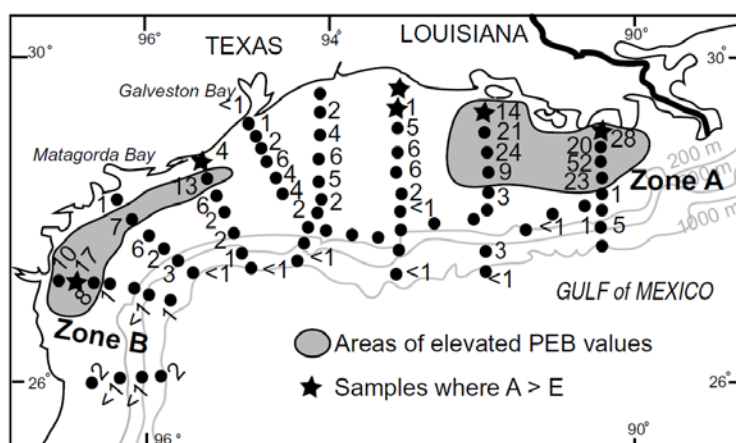
Dans les milieux paralytiques, la distribution des espèces à affinité continentale ou marine est légèrement différente en fonction de l'amplitude de la marée. Pour certains auteurs dont Murray (2006), l'indice de confinement ne peut s'appliquer que dans le cas d'environnement micro à mésotidal. Dans le cas de milieux paralytiques soumis à de forts marnages, les distributions des espèces à affinité continentale ou marine peut être légèrement différentes : deux espèces peuvent être présentes simultanément dans un cas et pas dans l'autre. Ces comportements opposés de cohabitation possible ou impossible peuvent s'expliquer par la notion de confinement (Frénod & Goubert, 2007).

Frénod E., **Goubert E.**, 2007. A first step towards modelling confinement of paralytic ecosystems. Ecological Modelling, 200, 139-148.

- **Les indices de mise en évidence d'hypoxie et de teneurs en matières organiques**

Après la publication par Jorissen (1995) du modèle conceptuel TROX (les microhabitats des foraminifères benthiques expliqués par les conditions Trophiques et les concentrations en OXYgène), différents auteurs ont proposé des index pour estimer les phases d'enrichissement en carbone organique total et les phases d'hypoxies/anoxies adaptés à des environnements moins profonds que ceux associés au modèle TROX. Les trois index proposés sont tous issus d'études sur les environnements peu profonds du Golfe du Mexique, principalement ceux associés au delta du Mississippi (côtes de Louisiane et du Texas).

- ✓ **A-E Index (Sen Gupta et al., 1996)** : cet index repose sur les proportions relatives de deux espèces largement présentes dans les sédiments de surface pour des fonds inférieurs à 30 m et dans les carottes du Golfe du Mexique (*Ammonia parkinsonian* et *Elphidium discoidale*).
- ✓ **PEB Index (Osterman, 2003)** : cet index repose sur le pourcentage cumulé des trois espèces (*Pseudonion atlanticum*, *Epistominella vitrea* et *Bulliminella morgani*) qui tolèrent des faibles teneurs en oxygène. La comparaison de l'application de ces deux index par Osterman (2003), montre la complémentarité de ces méthodes en fonction des assemblages présents (Figure 12).



**Figure 12. Carte montrant les zones d'hypoxie dans le Golfe du Mexique d'après les index basés sur les foraminifères benthiques (Osterman, 2003).**

**Zone A : zone d'hypoxie connue au large de la Louisiane ; Zone B : zone d'hypoxie suspectée au large du Texas. Les étoiles indiquent les zones d'hypoxie d'après l'A-E Index de Sen Gupta et al. (1996).**

- ✓ **A-P Index (Platon et al., 2005)** : cet index est le plus général, il repose sur les pourcentages totaux des formes Agglutinées par rapport aux Porcelanés.

Ces trois Index complémentaires peuvent être appliqués dans le Golfe du Mexique, aussi bien sur des assemblages actuels que fossiles pour reconstituer la progression de l'hypoxie dans le Golfe du Mexique depuis environ 1 000 ans (Osterman et al., 2008). L'application de ces approches nécessite d'identifier les espèces similaires à celles du Golfe du Mexique dans les autres provinces biogéographiques.

- **Ecological Quality Status (EcoQS)**

L'EcoQS appliqué aux foraminifères benthiques a été défini par Bouchet et al. (2012) en s'appuyant sur les teneurs en oxygène des eaux de fond. Il s'agit d'un indice qui reprend les approches des index précédents pour répondre aux directives européennes sur la qualité des environnements aquatiques de transition, littoraux et marins (DCE et DCSMM). Cet indice EcoQS a été calculé à partir de deux méthodologies pour comparer la pertinence d'une approche pour les échantillons actuels (triplicat sur un point de prélèvement à un instant donné : 2 premiers centimètres de sédiment, tamisage à 63 µm et comptage des individus vivants dans le refus humide) et l'autre pour les échantillons fossiles (triplicat sur un point de prélèvement à un instant donné : premier centimètre de sédiment, tamisage à 125 µm et comptage des individus vivants dans le refus sec). La valeur de l'EcoQS correspond à  $\text{Exp}(H'bc)$  avec  $H'bc$  correspondant au calcul de l'indice de Shannon-Wiener (Shannon & Weaver, 1963) dont les biais sont corrigés par Chao & Shen (2003). Les états de santé de l'environnement donnés par les deux valeurs de l'EcoQS ont été intercalibrés avec les teneurs en oxygène des eaux de fond afin de représenter un état de santé de « mauvais » à « très bon » comme il est recommandé par les directives européennes (Figure 13).

EcoQS and associated colour code	Bad	Poor	Moderate	Good	High
EcoQS derived from 0-2 cm, >63 µm, living wet-picked assemblages	<5	5-10	10-15	15-20	>20
EcoQS derived from 0-1 cm, >125 µm, living dry-picked assemblages	<2.5	2.5-5	5-7.5	7.5-10	>10

**Figure 13. Amplitude des valeurs des EcoQS « actuels » (1<sup>ère</sup> ligne) et « fossiles » (2<sup>ème</sup> ligne) pour représenter un état de santé de « Mauvais » à « Très bon » (Bouchet et al., 2012).**

La calibration d'un indice utilisable pour les échantillons fossiles à partir d'un triplicat d'échantillons sur lesquels les individus vivants ont été comptés ne me paraît pas pertinente. En effet, dans un échantillon de 1 centimètre d'une carotte, les assemblages trouvés peuvent être la résultante de plusieurs paramètres tels que (Berkeley et al. 2007 ; Loubere & Rayray, 2016) :

- une accumulation de biocénoses mortes sur place ;
- des apports par les courants d'individus vivants dans une niche écologique similaire ou différente ;
- des apports par les courants d'individus morts ayant vécu dans une niche écologique similaire ou différente et à un moment différent des biocénoses mortes sur place ;
- des soustractions d'individus vivants ou morts par les courants ;
- une migration verticale passive additive ou soustractive par bioturbation.

De plus, le comptage des individus vivants à un instant donné, même avec un triplicat, n'est pas représentatif d'une biocénose annuelle (Bicchi et al., 2002 ; Armynot du Châtelet, 2003).

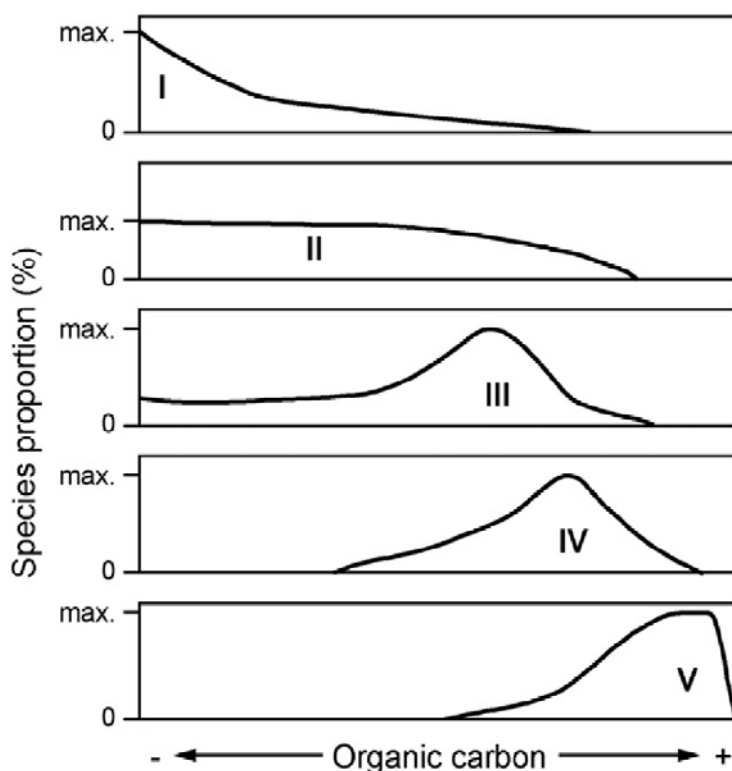
Cet indice peut être difficilement mis en œuvre sur des échantillons fossiles. De plus, le paramètre de calibration étant l'oxygène, il est évident que les paramètres environnementaux qui contrôlent les teneurs en oxygène (photosynthèse, température, profondeur, hydrodynamisme) et qui sont contrôlés par les teneurs en oxygène (matière organique) interviennent dans la présence et l'abondance des espèces.

- **Foram-AMBI**

L'indice AMBI défini par Borja et al. (2000) a été transposé pour les foraminifères benthiques par Alve et al. (2016). Comme pour l'AMBI basé sur la macrofaune benthique, le Foram-AMBI est basé sur les parts respectives de groupes d'espèces sensibles à tolérantes vis-à-vis des teneurs en carbone organique total des sédiments de surface (Figure 14).

$$\text{AMBI} = \{(0 \times \% \text{ G I}) + (1,5 \times \% \text{ G II}) + (3 \times \% \text{ G III}) + (4,5 \times \% \text{ G IV}) + (6 \times \% \text{ G V})\} / 100$$

- Group I. "Sensitive species" are sensitive to organic matter enrichment. Their abundance is highest under unimpacted conditions (at lowest TOC values) and drops to zero as organic matter concentration increases.
- Group II. "Indifferent species" are indifferent to organic matter enrichment. They never dominate the assemblage. They occur in low abundance over a broad range of organic matter concentrations, but are absent at very high concentrations.
- Group III. "Tolerant species" are tolerant to excess organic matter enrichment. They may occur at low TOC, their highest frequencies are stimulated by organic enrichment but they are absent at very high organic matter concentrations.
- Group IV. "2nd-order opportunistic species" show a clear positive response to organic matter enrichment with maximum abundance between the maxima of Groups III and V.
- Group V. "1st-order opportunistic species" show a clear positive response to excess organic matter enrichment with maximum abundance at a higher stress level induced by organic load than species of Group IV. At even higher organic matter concentrations, no foraminifera are able to survive.



**Figure 14. Les 5 cinq groupes écologiques définis pour le calcul du Foram-AMBI et schéma montrant la distribution des abondances relatives de ces cinq groupes écologiques le long d'un gradient de teneurs en carbone organique total (Alve et al., 2016).**

### II.3. Le cas des *Elphidium excavatum* de la baie et de l'estuaire de la Vilaine

Mes premiers travaux sur les foraminifères benthiques actuels à partir de 1992 ont été effectués dans le cadre d'une étude initiée par Ifremer Nantes à partir de 1983 pour comprendre les phénomènes d'eaux colorées dus aux développements massifs de phytoplancton et leurs impacts sur l'écosystème de l'estuaire et de la baie de Vilaine (Figure 2). Dans les estuaires comparables à celui de la Vilaine (mésotidal, tempéré), entre 5 et 10 espèces de foraminifères benthiques peuvent vivre simultanément (Goubert, 1997b ; Murray, 2006 ; Mojtahid et al., 2016) avec une densité de quelques milliers d'individus vivants pour 50 cm<sup>3</sup> de sédiment brut. Dans le cas de la Vilaine, seule l'espèce *Elphidium excavatum* se développe avec parfois une densité très importante de plus de 1 000 vivants pour 1 cm<sup>3</sup> de sédiment brut. Le suivi mensuel des populations en association avec les mesures de certains paramètres environnementaux ont permis de mettre en évidence les liens entre le fonctionnement de l'écosystème estuarien, les traits de vie de l'espèce *Elphidium excavatum* (reproduction, croissance, dynamique de population) et les caractéristiques morphologiques des individus. Cette espèce présente des écophénotypes qui se distribuent latitudinalement de l'Europe du Sud méditerranéenne jusqu'en Europe du Nord atlantique et en Islande (Figure 15). Dans les zones de transition entre deux formes, comme au niveau de l'estuaire de la Vilaine, la température est trop chaude pour la forme du Nord (*E. excavatum selseyensis*) et trop froide pour la forme du Sud (*E. excavatum lidoensis*). Ainsi, l'occurrence d'une forme ou d'une autre dans l'estuaire de la Vilaine peut traduire l'influence de paramètres autres que la température.

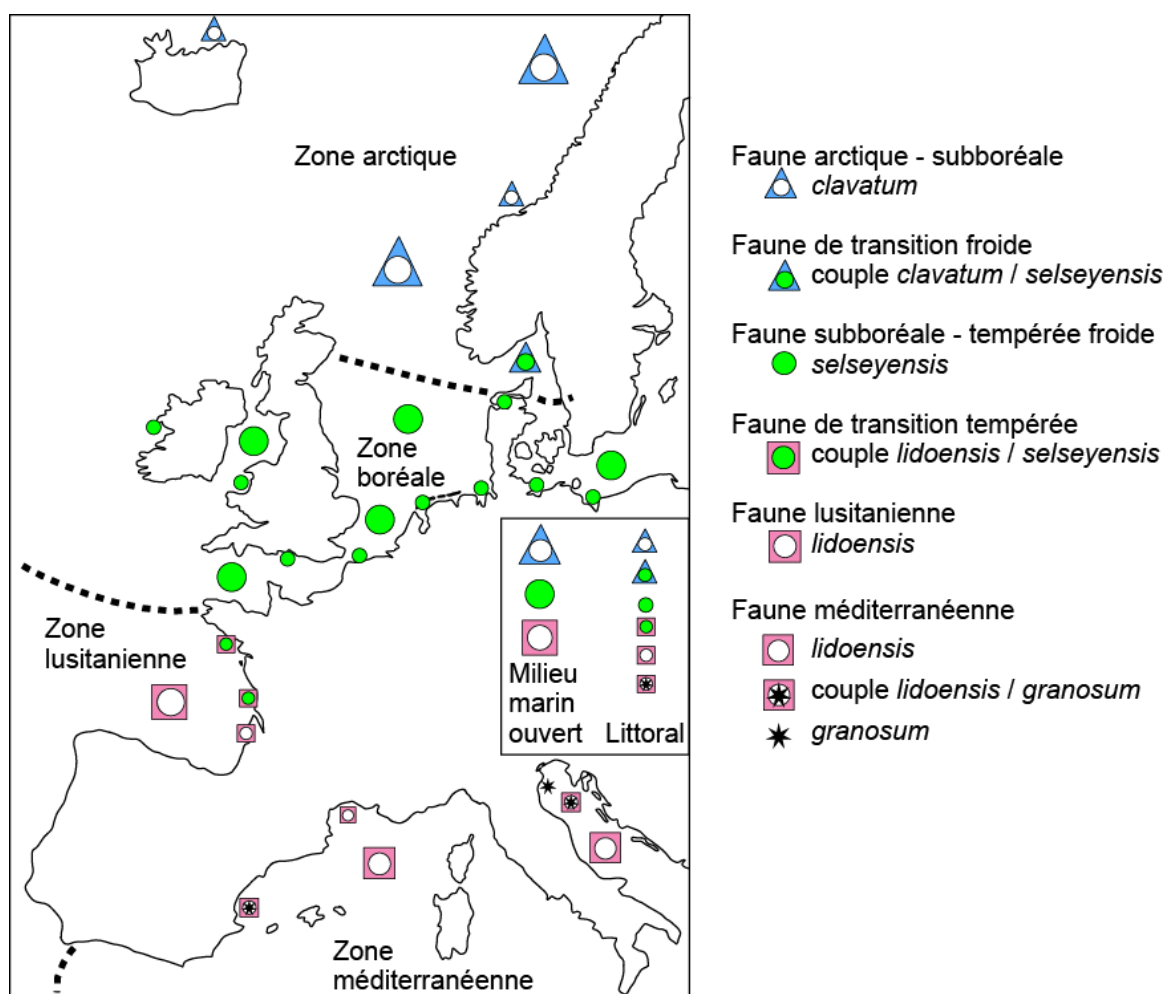
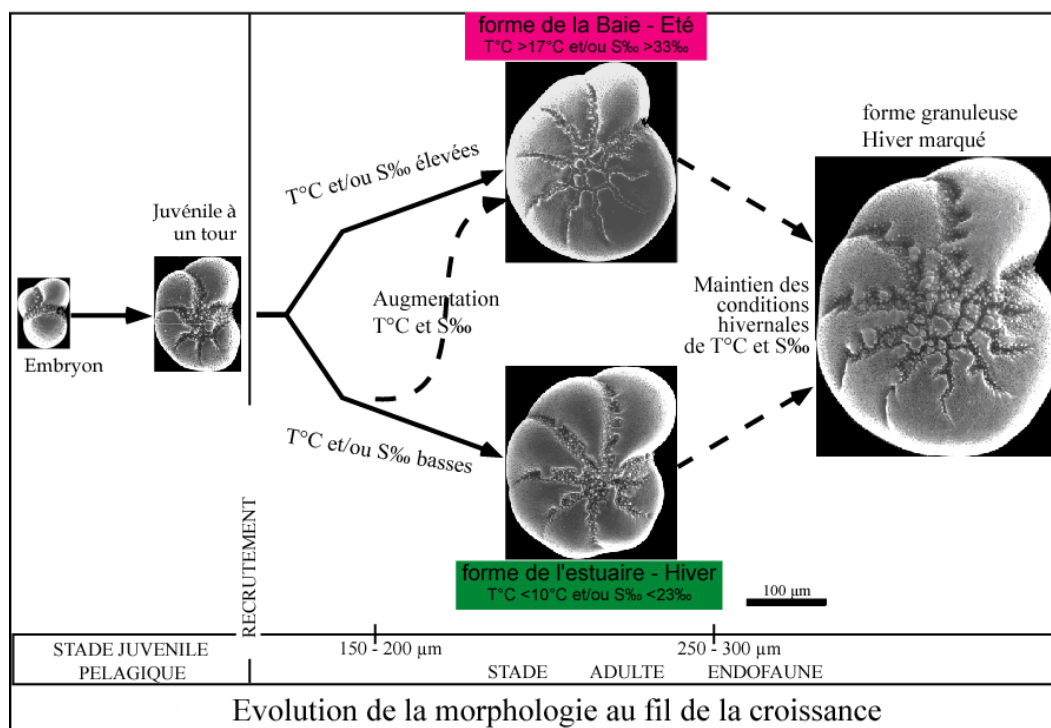


Figure 15. Distribution des écophénotypes d'*Elphidium excavatum* de la Méditerranée à l'Islande d'après les illustrations dans les études citant cette espèce (modifiée d'après Goubert, 1997b).



La présence de l'une ou l'autre forme dans la baie ou l'estuaire de la Vilaine dépend des conditions favorables ou non à la précipitation de la calcite pour réaliser la lamelle qui recouvre l'intégralité du squelette lors de la croissance. Ainsi avec une température élevée et/ou une salinité élevée (l'été), la lamelle est plus épaisse que lorsque la température est basse et/ou la salinité est basse (l'hiver). Une lamelle épaisse donne une morphologie arrondie avec un empâtement des détails morphologiques (*E. excavatum lidoensis* [forme de la Baie-Été, Figure 16]) alors qu'une lamelle fine maintient un aspect lobé avec des détails morphologiques plus nets (*E. excavatum selseyensis* [forme de l'Estuaire-Hiver, Figure 16]). La morphologie des individus s'acquiert progressivement en fonction du lieu de croissance à l'intérieur de l'estuaire ou dans la baie. De plus, lorsque les conditions hivernales se maintiennent jusqu'en mars, les individus ne se reproduisent pas et la croissance continue avec un stade ontogénétique donnant des formes de grandes tailles à ornementation ombilicale très développée [forme granuleuse Hiver marqué, Figure 16].



**Figure 16. Enregistrement des paramètres environnementaux dans la morphologie des *Elphidium excavatum* au fil de la croissance (Goubert, en prép.).**

L'étude de l'évolution de la morphologie au fil de la croissance permet donc d'associer des paramètres environnementaux à des critères morphologiques fossilisables. Le comptage dans des échantillons de carottes prélevées dans le secteur de la Vilaine des proportions relatives des formes « d'été, d'hiver classique ou d'hiver marqué » devrait permettre de reconstituer les fluctuations saisonnières, climatiques et océanographiques au cours de l'Holocène.

Afin de vérifier si la température était un paramètre important dans l'acquisition de la morphologie et si cette température pouvait conditionner la lignée évolutive, différents échantillons provenant de la Méditerranée à l'Europe du Nord et répartis du Miocène à l'actuel ont été étudiés (Figure 17). La distribution spatio-temporelle des différents écophénotypes est conditionnée par l'entrée en glaciation qui a marquée l'Atlantique Nord à partir d'environ 5 Ma (Figure 18).

Ainsi, la bio-indication à partir des *Elphidium excavatum* permet d'estimer les paramètres à toutes les échelles spatiales et temporelles : de quelques mois à l'année, avec l'observation des individus vivants dans un estuaire, et depuis 5 Ma avec les occurrences des différentes formes dans les archives sédimentaires en fonction de l'évolution paléoclimatique à l'échelle de l'Europe de l'Ouest.

- Echantillons actuels**
- 1 - Rivière de Morlaix
  - 2 - Estuaire de la Vilaine
  - 3- Bassin de Marennes-Oléron
  - 4 - Estuaire de la Gironde
  - 5 - Denia, Espagne
  - 6 - Etang de Leucate et Etang de Thau
  - 7 - Venise, Italie

- Echantillons fossiles**
- 8 - Danemark (de l'Holocène à l'Elsterien)
  - 9 - Danish North Sea (du Menapien au Tortonien)
  - 10 - Belgique (Pliocène supérieur)
  - 11 - Normandie (Pliocène supérieur)
  - 12 - Blésois (Langhien/Serravalien)
  - 13 - Le Clion (Holocène)
  - 14 - Languedoc (Pliocène supérieur)
  - 15 - Côte d'Azur (Pliocène supérieur)
  - 16 - Crossolo (Calabrien), Italie
  - 17 - Valeondona (Astien), Italie

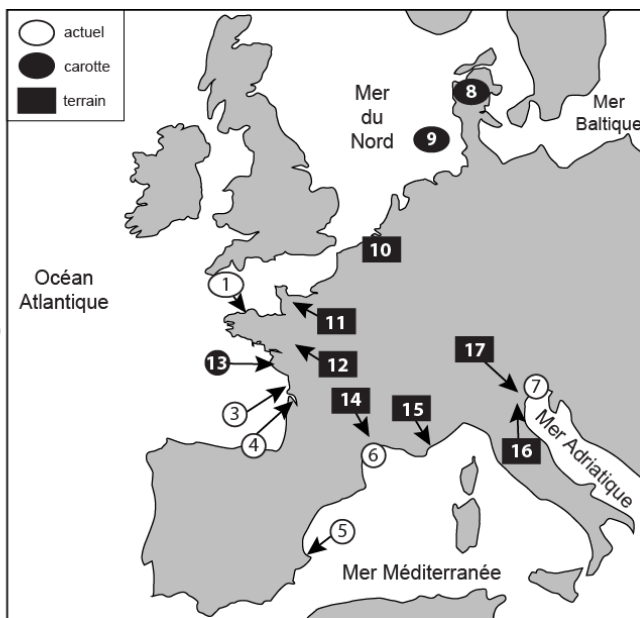


Figure 17. Localisation des échantillons étudiés pour la caractérisation spatio-temporelle de la lignée évolutive des *Elphidium excavatum* (modifiée d'après Goubert, 1997a).

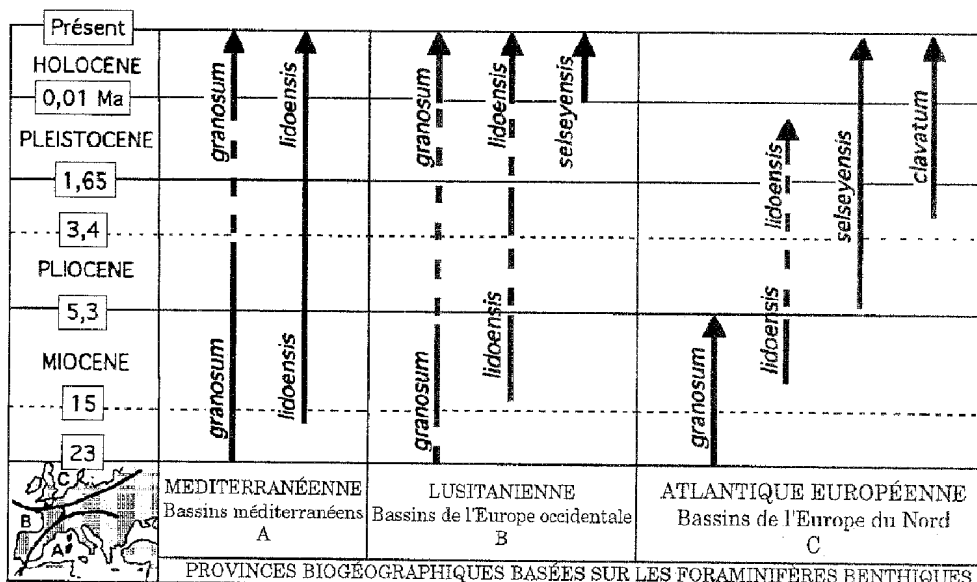


Figure 18. Répartitions stratigraphiques des formes *granosum*, *lidoensis*, *selseyensis* et *clavatum* de l'espèce *Elphidium excavatum* (Goubert, 1997a).

**Travaux réalisés dans le cadre de ma thèse**

**Goubert E.**, Margerel J.P., 1994. Ecophenotypy of a benthonic foraminifera *Elphidium excavatum* living in the Vilaine estuary (southern Brittany, France) : Consequences on the evolutionary lineage. "FORAMS'94", Berkeley, juil. 1994.

**Goubert E.**, 1995a. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes *lidoensis* et *selseyensis* en Baie de Vilaine (Bretagne, France) et lignée évolutive. "Contraintes et instabilités de l'environnement : stratégies adaptatives des organismes récents et fossiles", CNRS, Univ. Lyon I.

**Goubert E.**, 1995b. Apport de l'étude des formes *lidoensis* et *selseyensis* du groupe *Elphidium excavatum* de Baie de Vilaine (France) et rôle du facteur température dans l'établissement d'un schéma évolutif. "Evolution et environnement des organismes microscopiques", GDR 88, MNHN, Paris.

**Goubert E.**, 1995c. Adaptation d'*Elphidium excavatum* forma *lidoensis* à l'environnement estuarien de la Baie de Vilaine : conséquences sur la morphologie du test, la reproduction et l'écophénotypie. 99<sup>e</sup> congrès Société Zoologique de France.

**Goubert E.**, 1997a. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes *lidoensis* et *selseyensis* en Baie de Vilaine (France) et lignée évolutive. *Geobios*, 21, 303-310.

**Goubert E.**, 1997b. Les *Elphidium excavatum* (Terquem), foraminifères benthiques, vivant en Baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement. Réflexions sur l'approche méthodologique, la lignée évolutive et sur l'utilisation en paléocéologie. Thèse Université Nantes, 2 vol., 186 p., 108 illustr.

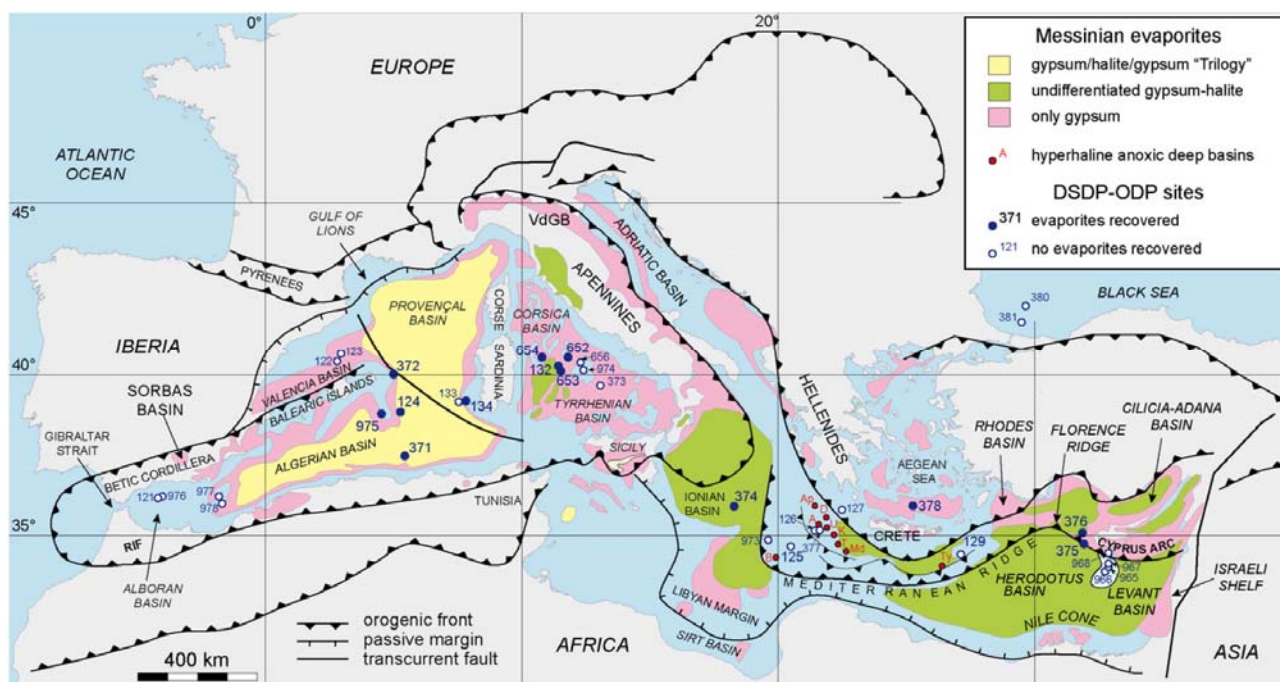
### III. La reconstitution des paléoenvironnements/paléoclimats

#### III.1. Les paléoenvironnements de la crise messinienne

##### III.1.a. La crise messinienne en quelques mots

Il y a environ 6 à 5,33 millions d'années, des dépôts massifs d'évaporites (gypse et halite) se sont mis en place dans le bassin méditerranéen (Figure 19). La grande majorité des évaporites a été reconnue en sismique et par forage sous la mer Méditerranée actuelle mais quelques bassins émergés présentent également des évaporites messiniennes. C'est le cas des bassins sédimentaires (exemple du bassin de Sorbas) des Cordillères Bétiques dans le Sud de l'Espagne (Figure 19).

Ces vastes dépôts évaporitiques sont associés à une crise environnementale majeure correspondant à la chute très importante du niveau de la Méditerranée avec l'arrêt de la communication entre l'Atlantique et la Méditerranée.



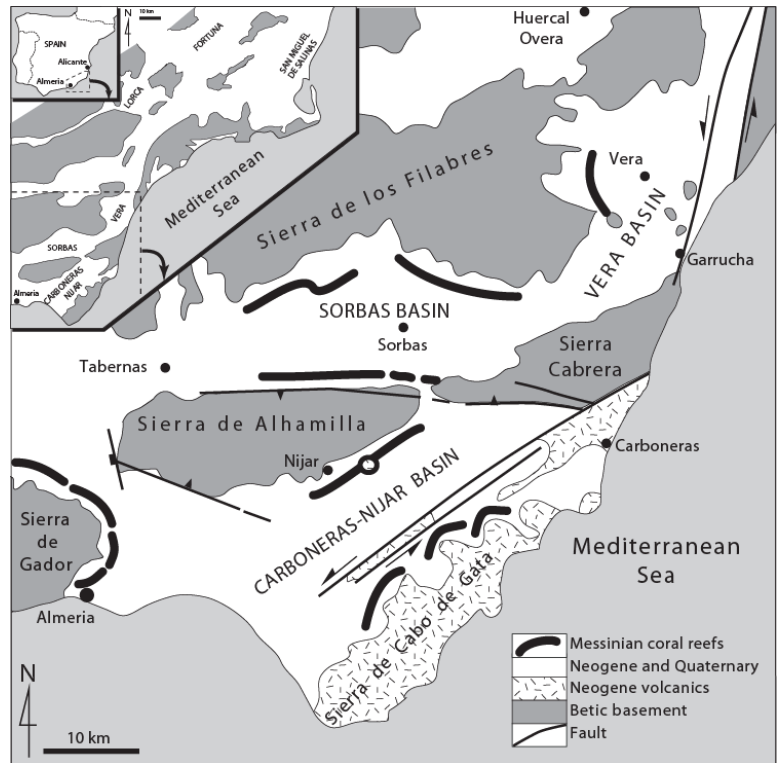
**Figure 19. Distribution des évaporites messiniennes et localisation des Cordillères bétiques et du bassin de Sorbas (Roveri et al., 2014).**

Différents types de modèles ont été proposés pour expliquer le lien entre les évaporites des bassins périphériques comme les bassins des Cordillères Bétiques et celles des zones profondes : soit formation diachrone, d'abord les bassins périphériques puis les bassins profonds (Clauzon et al., 1996), soit synchrone (Krijgsman et al., 1999).

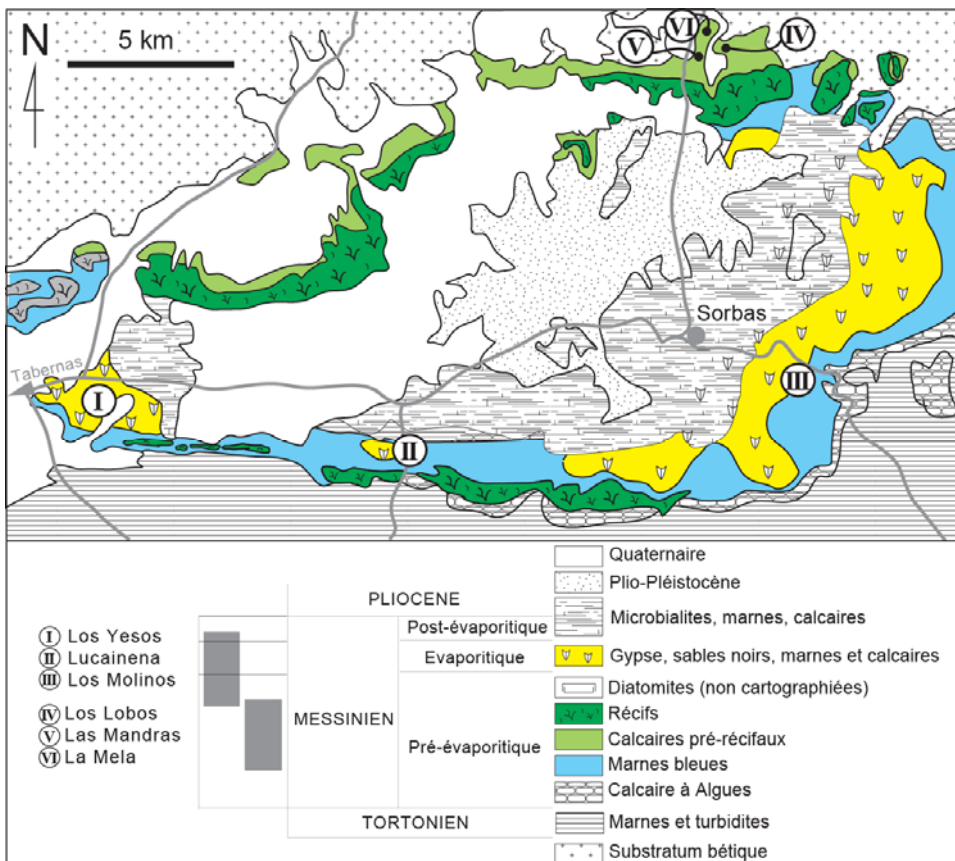
À l'époque de la publication de ces modèles, il était toujours spécifié que les niveaux sédimentaires intercalés dans les gypses des bassins périphériques étaient azoïques en raison des assèchements successifs et des sursalures des masses d'eau. Des relevés de terrain par Didier Néraudeau et Jean-Paul Saint-Martin avaient révélé la présence d'oursins et de bivalves dans les intercalations marneuses et gréseuses au sein des gypses du bassin périphérique de Sorbas (Andalousie). J'ai donc été recrutée à l'université de Rennes 1 comme ATER par Didier Néraudeau pour étudier les foraminifères benthiques potentiellement présents dans ces niveaux et pour reconstituer les environnements de dépôts associés à ces intercalations marneuses et gréseuses au sein des gypses.

### III.1.b. Le bassin de Sorbas

Le bassin de Sorbas, comme les nombreux bassins des Cordillères bétiques, est constitué de terrains néogènes (Figure 20) correspondant à des environnements de dépôts très variés : des marnes et diatomites marines, des dépôts détritiques terrigènes, des plates formes carbonatées, des évaporites, des stromatolithes/tidalites... Le passage d'un environnement de dépôt à l'autre se faisant rapidement dans le temps et/ou dans l'espace en raison de la morphologie complexe du soubassement métamorphique et magmatique des Cordillères bétiques. Les différents bassins sont orientés Ouest/Est à Sud-Ouest/Nord-Est et sont caractérisés par la présence de petites plates-formes carbonatées récifales appuyées sur les reliefs bétiques, les « Sierra » (Figure 20).

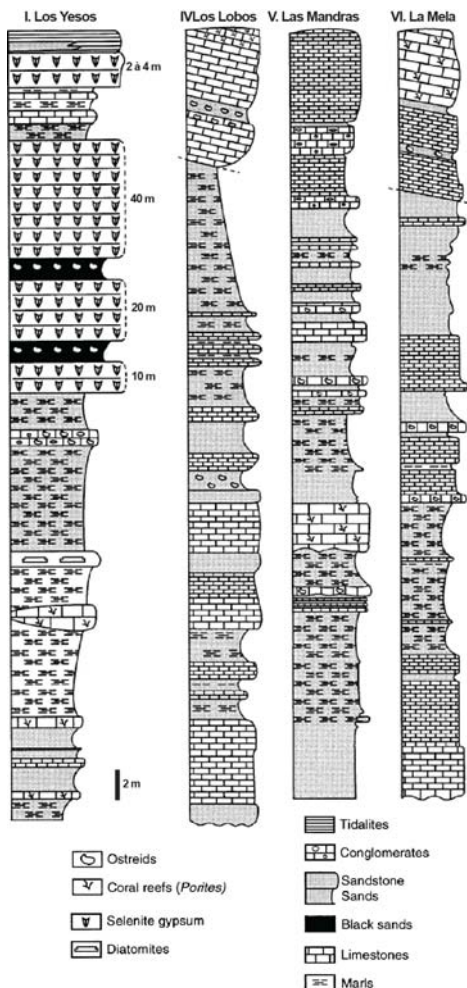


**Figure 20. Carte géologique simplifiée des Cordillères bétiques au niveau du bassin de Sorbas (d'après Goubert et al., 2001).**



Au sein du bassin de Sorbas, deux types de coupes ont été étudiées : des coupes montrant le Messinien pré-évaporitique carbonaté du Nord du bassin et des coupes traversant les niveaux évaporitiques de gypses, du pré-évaporitique marneux à diatomites au post-évaporitique dans la partie Sud du bassin (Figure 22).

**Figure 21. Carte géologique du bassin de Sorbas (modifiée d'après Goubert et al., 2001).**

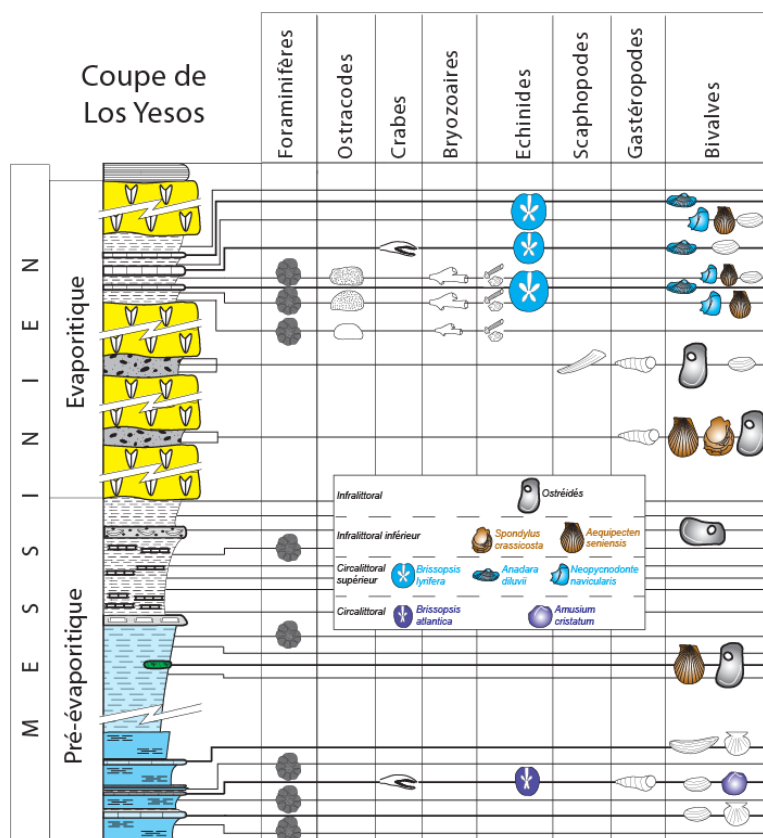


Les coupes ont été échantillonnées pour différents objectifs : (1) identification des assemblages de mollusques, d'échinodermes et de foraminifères planctoniques et benthiques, (2) succession des assemblages en fonction des modifications des environnements de dépôts du carbonaté au détritique terrigène puis à l'évaporitique et (3) enregistrement par les foraminifères benthiques des fluctuations environnementales associées à la crise de salinité messinienne.

Parmi ces quatre coupes, celle de Los Yesos est présentée pour illustrer ces différents objectifs.

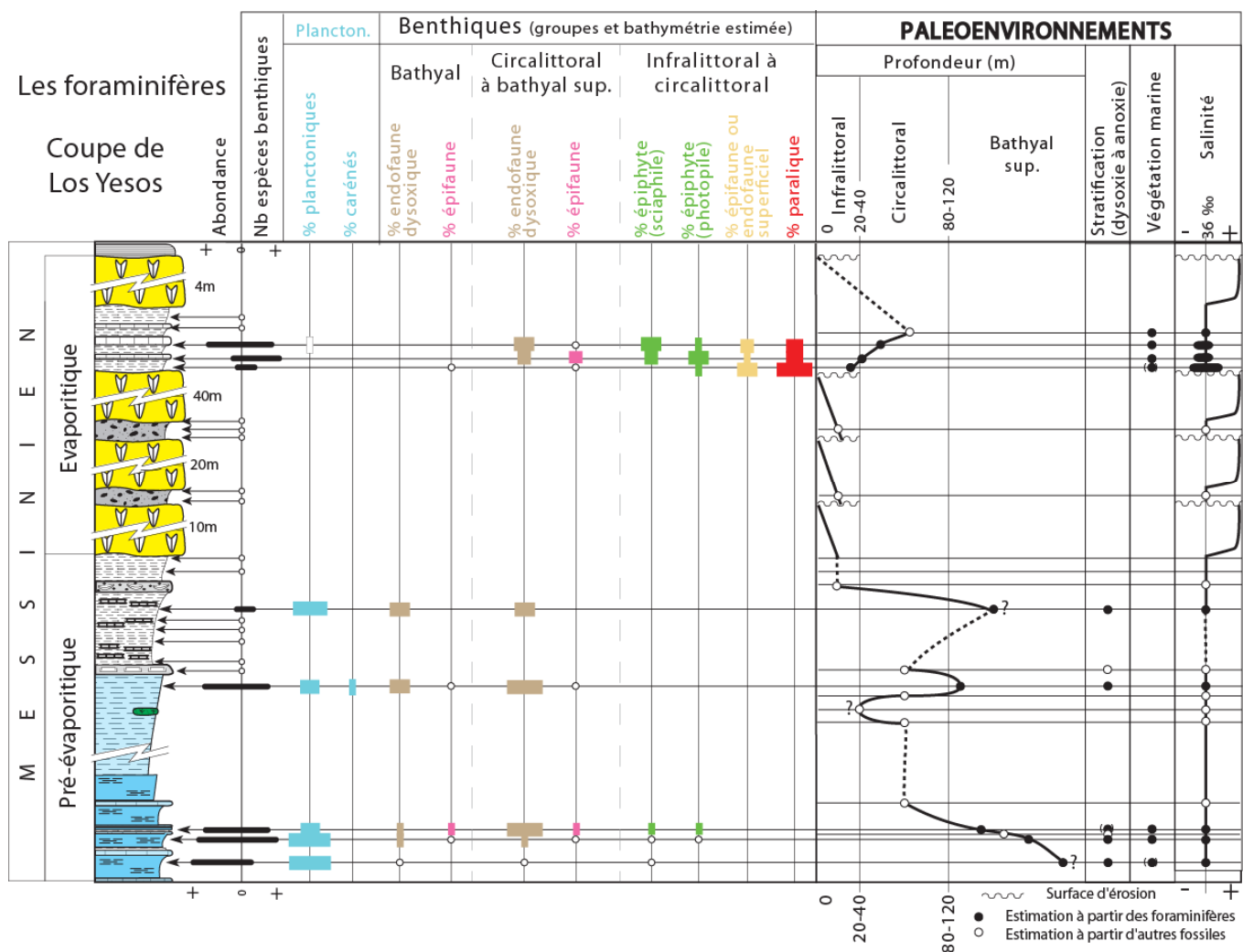
**Figure 22.** Les coupes pré-évaporitiques au niveau des plateformes carbonatées du Nord du bassin (Los Lobos, La Mela, Las Mandras) et la coupe complète du pré-évaporitique au Sud-Ouest du bassin (Los Yesos) (d'après Lacour et al., 2000).

### III.1.c. La coupe de Los Yesos



Dans un premier temps la détermination des macro- et microfaunes a été réalisée (Figure 23), puis une étude plus spécifique sur les foraminifères a été menée (Figure 24).

**Figure 23.** Distribution de la macro- et de la microfaune le long de la coupe de Los Yesos (modifiée d'après Goubert et al., 2001 et Lacour et al., 2000).



**Figure 24. Distribution des foraminifères (espèces et groupes écologiques) le long de la coupe de Los Yesos et interprétation paléoenvironnementale (Goubert et al., 2001).**

L'approche méthodologique sur ces assemblages fossiles de foraminifères planctoniques et benthiques a été l'approche morphofonctionnelle basée sur les modes et les milieux de vie caractérisés par les variations de salinité, la stratification des masses d'eau conduisant sur le fond à des phénomènes d'eutrophisation/hypoxie, la présence de végétation marine et la bathymétrie. Les assemblages de foraminifères indiquent clairement une évolution vers des environnements confinés et sursalés. La présence de bivalves, de gastéropodes et de scaphopodes dans les deux intercalations de sables et graviers noirs sableuses entre les trois premiers niveaux de gypse traduisent des remises en eau avec une salinité proche de la normale. La dernière intercalation de nature marneuse sous le dernier niveau de gypse traduit une remise en eau évoluant vers un milieu franchement marin d'une profondeur d'eau d'environ 40 m avec le développement de végétation marine puis l'installation d'échinodermes et foraminifères circalittoraux.

Ainsi quel que soit le scénario diachrone ou synchrone, les dépôts gypseux du bassin périphérique de Sorbas ont été mis en place lors de confinement important alternant avec des remises en eau marine provenant de l'Atlantique.

### III.1.d. La crise de salinité messinienne une crise biologique pour les foraminifères benthiques ?

Une base donnée constituée avec la synthèse des occurrences des espèces de foraminifères benthiques cités dans les articles a permis d'identifier une vingtaine d'espèces endémiques à la Méditerranée présentes au Tortonien et encore présentes au Pliocène (Goubert et al., 2000 ; Goubert, 2000). D'après les scénarios de l'arrêt de la connexion avec l'Atlantique, la chute du niveau de la Méditerranée, puis la brutale remise en eau par le déversement de l'Atlantique dans la Méditerranée par le détroit de Gibraltar, il n'est guère possible d'envisager un refuge pour les espèces endémiques méditerranéennes dans l'Atlantique au niveau du Golfe de Cadix par exemple. Au passage Mio/Pliocène, les taux de disparition et d'apparition des foraminifères benthiques sont légèrement supérieurs à ceux que l'on observe pour des pas de temps similaires, mais sans atteindre des taux d'extinction correspondant à une crise biologique (Lethiers, 1998). D'après les données disponibles, il semble que le domaine méditerranéen soit caractérisé par un renouvellement des espèces bathyales correspondant au milieu de vie qui a été le plus touché par les changements environnementaux messiniens. En revanche, le domaine littoral ne semble pas être affecté outre-mesure par les renouvellements d'espèces. En effet, si quelques échanges se sont maintenus avec l'Atlantique à travers les bassins des Cordillères bétiques, ces bassins ont donc été alimentés en surface par des eaux marines permettant le maintien des espèces littorales. Les foraminifères benthiques ont dû donc trouver des zones refuges au sein de la Méditerranée, vraisemblablement proches des zones d'arrivées des eaux marines nécessaires pour les apports en sels dissous pour permettre les importants dépôts d'évaporites messiniennes.

**Participations aux programmes de recherche : CrisEvole et Eclipse sur la crise messinienne (U. Rennes 1, D. Néraudeau)**

#### **Travaux réalisés**

**Goubert E.**, Lacour D., Néraudeau D., 1999. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordilleras, SE Spain). "Paleoceanology of Reefs and Carbonate Platforms: Miocene to Modern. PRCP'99", Aix-en-Provence, sept. 1999, Abstract book, Publication ASF, Paris, n°32 (Eds G.F. Camoin & W.-Chr. Dullo), p.87-89.

Lacour D., Néraudeau D., **Goubert E.**, 1999. Evolution of the biodiversity of Mediterranean irregular echinoids between the late Miocene and the present-day. "Paleoceanology of Reefs and Carbonate Platforms: Miocene to Modern. PRCP'99" (sept. 1999, Aix-en-Provence, France). Abstract book, Publication ASF, Paris, n°32 (Eds G.F. Camoin & W.-Chr. Dullo), p.133-135.

Saint-Martin J.-P., Néraudeau D., Lauriat-Rage A., **Goubert E.**, Secrétan S., Babinot J.F., Boukli-Hacene S., Pouyet S., Lacour S., Pestrea S., Conesa G., 2000. La faune interstratifiée dans les gypses messiniens de Los Yesos (Bassin de Sorbas, SE, Espagne): implications. *Geobios*, 33, 5, 637-649.

**Goubert E.**, Néraudeau D., Rouchy J.M., Lacour D., 2001. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordillera, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 61-78.

Néraudeau D., **Goubert E.**, Lacour D., Rouchy J.M., 2001. Evolution of the biodiversity of Mediterranean irregular echinoids from the Messinian to the Present-Day. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 43-60.

Néraudeau D., **Goubert E.**, 2002. L'événement messinien... Trente ans après. in Néraudeau D. & **Goubert E.** (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 505-510.

Néraudeau D., Videt B., Courville P., **Goubert E.**, Rouchy J.M., 2002. Corrélation des niveaux fossilifères marins interstratifiés dans les gypses messiniens, entre la carrière de Los Yesos et la carrière de Molinos de Aguas (bassin de Sorbas, SE Espagne). in Néraudeau D. & **Goubert E.** (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 659-667.

Lacour D., Lauriat-Rage A., Saint-Martin J.P., Videt B., Néraudeau D., **Goubert E.**, Bongrain M., 2002. Les associations de bivalves (Mollusca, Bivalvia) du Messinien du bassin de Sorbas (SE Espagne). in Néraudeau D. & **Goubert E.** (eds), l'Événement messinien: approches paléobiologiques et paléoécologiques. *Géodiversitas*, 24, 3, 641-657.

**+ 8 présentations dans des colloques nationaux**

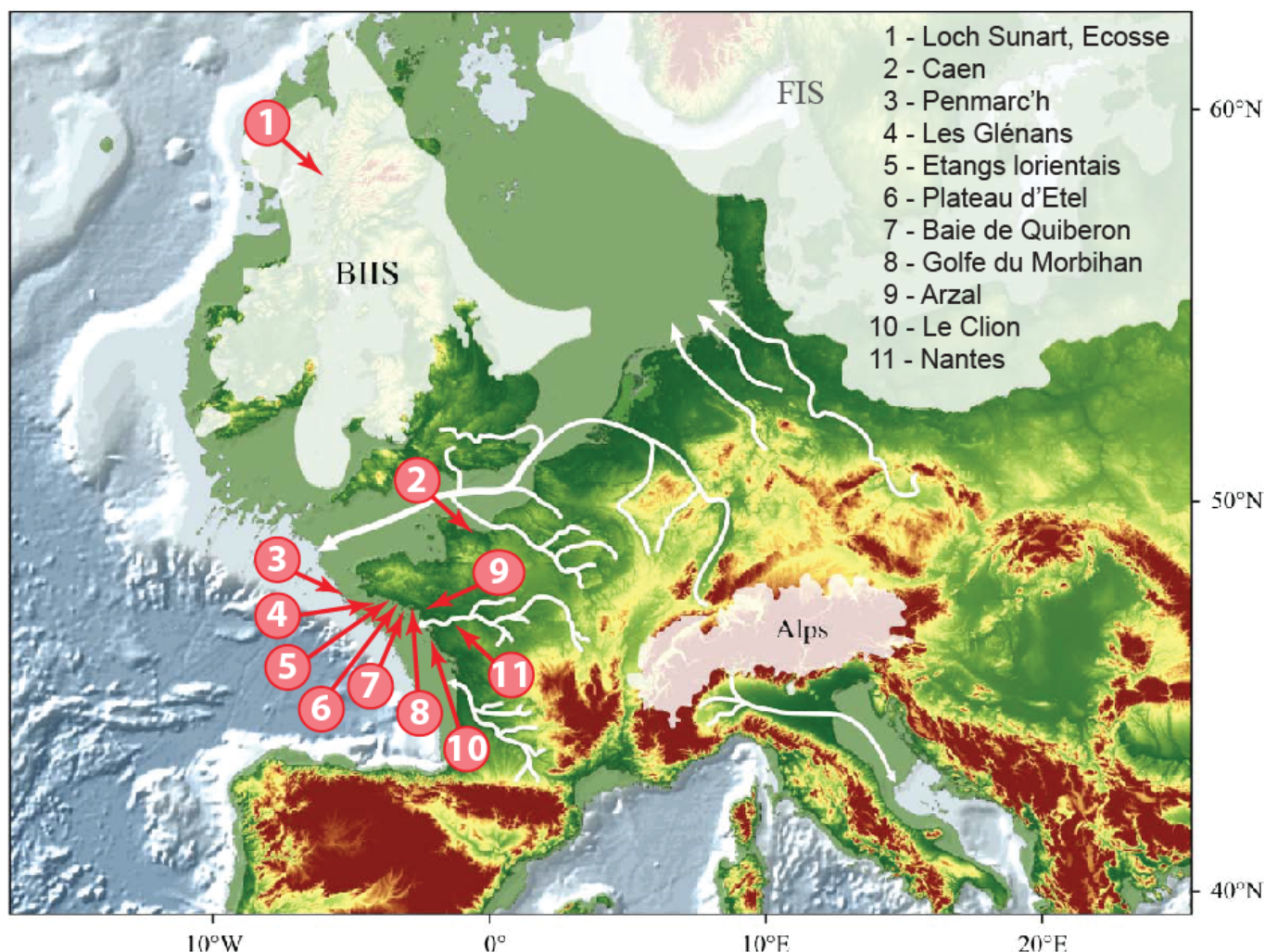
**+ Organisation d'un congrès sur "L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques" (6-7 déc. 2000, Rennes)**

**+ Edition d'un volume spécial : Néraudeau D. & Goubert E. (eds), 2002. L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques. Géodiversitas, 24, 3.**

## III.2. L'Holocène de l'Europe de l'Ouest

### III.2.a. Préambule et localisation des sites étudiés

Lors du Dernier Maximum Glaciaire (25-20 ka), la partie septentrionale de l'Europe de l'Ouest était recouverte par deux calottes glaciaires dont les limites Sud étaient à une latitude d'environ 52°N (Figure 25) et le niveau marin était estimé globalement à - 120 m. Les différentes carottes étudiées sont positionnées sur la Figure 25.



**Figure 25. Localisation des sites étudiés et reconstruction géographique des calottes glaciaires européennes au Dernier Maximum Glaciaire entre 25 et 20 000 ans (modifié par Toucanne, 2008 d'après Ehlers & Gibbard, 2004).**

**BIIS : British-Irish Ice Sheet ; FIS : Fennoscandian Ice Sheet**

Depuis cette période, le niveau marin est remonté jusqu'au niveau actuel avec des pulsations (Figure 26). Différentes estimations de la remontée du niveau marin en Europe de l'Ouest ont été proposées à partir d'indices variés (Figure 27). Quels que soient les auteurs, à partir de 6 000 ans BP, le niveau marin est très proche de l'actuel et les courbes présentent toutes des oscillations à différentes fréquences qui correspondent à des facteurs forçants spécifiques. Ces changements climatiques rapides (RCC) décrits par Bond et al. (1997), Mayewski et al. (2004) et Debret et al. (2007) se traduisent de différentes manières en mer (Bond et al., 1999 ; Moros et al., 2006), mais également sur l'interface terre/mer avec des dépôts vaseux (Li et al., 2015) en lien avec des cycles climatiques où alternent des épisodes plus humides ou plus secs (Wang et al., 2005 ; Benito et al., 2015) ou plus tempétueux (Sorrel et al., 2012).



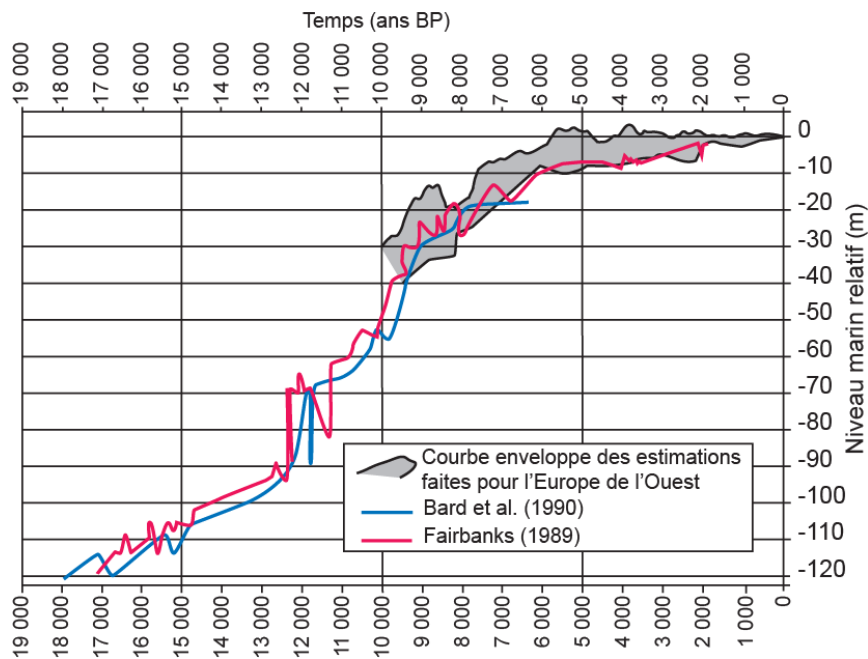


Figure 26. Variations du niveau marin de - 18 000 ans à l'actuel (Goubert, en prép.).

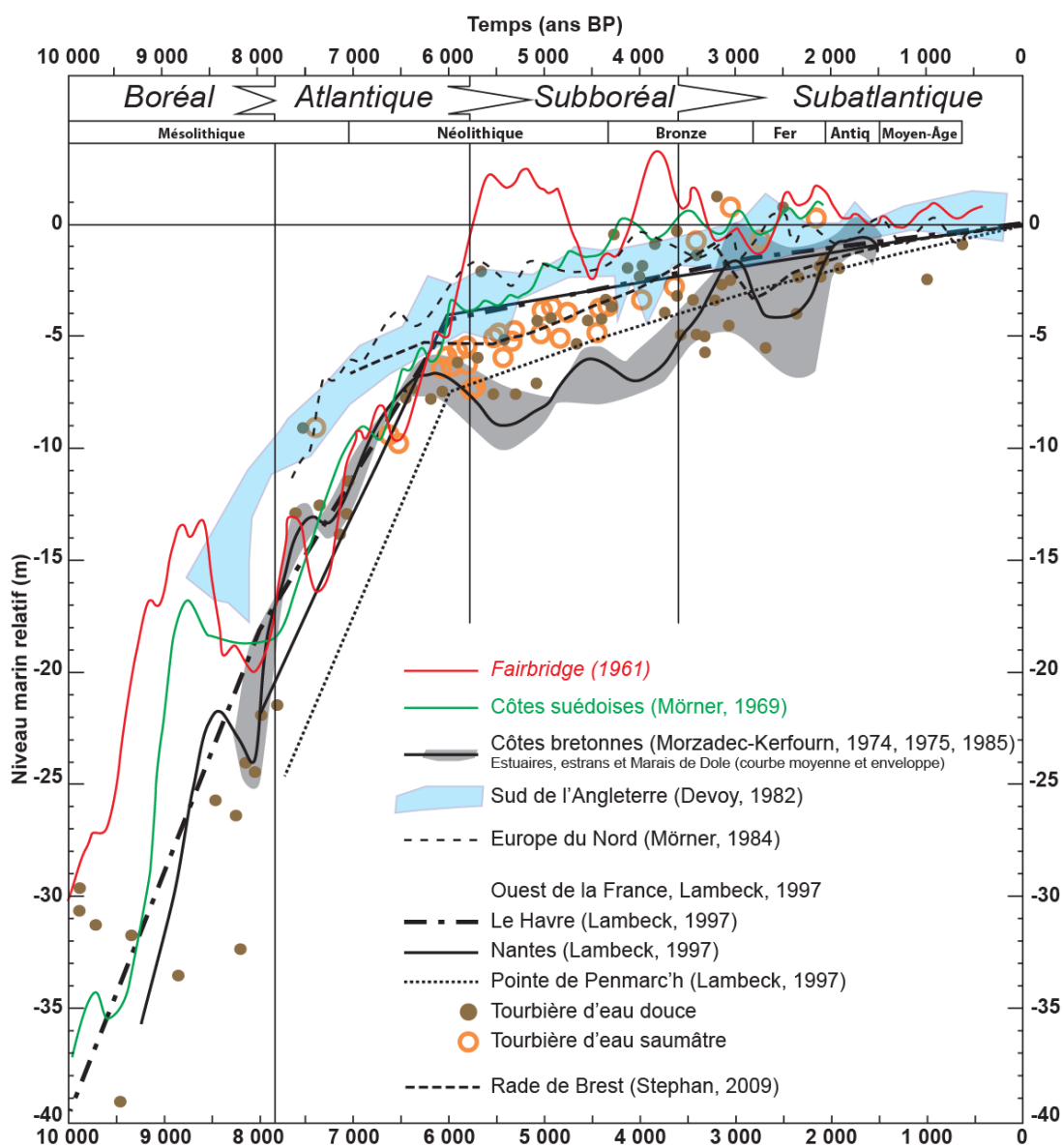


Figure 27. Variations du niveau marin pour l'Holocène de l'Europe de l'Ouest (Goubert, en prép.).

Pour chaque carotte, l'objectif général était de reconstituer les successions paléoenvironnementales à partir des assemblages de foraminifères benthiques mais des objectifs spécifiques avaient été également identifiés (Tableau 2).

**Tableau 2. Objectifs spécifiques associés aux reconstitutions paléoenvironnementales à partir des différentes carottes.**

<p style="text-align: center;"><b>Objectif général</b></p> <p>Variations de la hauteur d'eau ; salinité ; température ; teneurs en oxygène, nutriments, matières organiques ; renouvellement des masses d'eau ; phase de dégradation/restauration ; enregistrement d'événements exceptionnels (tempêtes, crues)</p> <p style="text-align: center;"><b>Objectifs spécifiques</b></p>	1. Loch Sunart, Ecosse	2. Caen	3. Penmarch	4. Les Glénans	5. Etangs Iorientais	6. La paléovallée d'Etel	7. Baie de Quiberon	8. Golfe du Morbihan	9. Arzal	10. Le Clion	11. Nantes
<b>Géométrie des comblements</b> des estuaires à l'Holocène, comparaison avec les <b>modèles stratigraphiques</b>						X		X	X		X
<b>Impact de la géomorphologie locale</b> sur les reconstitutions et l'enregistrement des fluctuations holocènes climatiques et environnementales					X		X	X			X
Identification de <b>phases majeures</b> dans les fluctuations environnementales holocènes (événement à 8 200 ans, niveau à turritelles, changements climatiques rapides (RCC)...) )	X		X	X	X		X				
Mise en œuvre d' <b>approches méthodologiques variées</b> pour les interprétations paléoenvironnementales à partir des assemblages de foraminifères benthiques	X			X	X			X			X
Comparaison des enregistrements des fluctuations environnementales <b>par les pollens et les foraminifères benthiques</b> (amplitudes des variations continentales/marines et chronologie)	X	X	X	X	X		X		X	X	X
Reconstitutions paléoenvironnementales <b>associées à des occupations humaines romaines à néolithiques</b>		X					X	X		X	X
Impact du <b>rebond post-glaciaire glacio-isostatique</b> sur la <b>stratification des masses d'eau littorales</b>	X										

Les numéros correspondent à ceux de la Figure 25.

Les études présentées dans les paragraphes suivants sont :

- ⇒ Le comblement de la vallée de la Loire à Nantes
- ⇒ La mise en évidence des RCC à partir des foraminifères du Loch Sunart (Ecosse)
- ⇒ Les séquences d'ouverture/fermeture des étangs Iorientais de Lannéec et du Loc'h en relation avec les RCC
- ⇒ L'identification de phases majeurs dans les fluctuations environnementales : les niveaux à turritelles de l'Ecosse à la Bretagne Sud

Les figures synthétiques des reconstitutions paléoenvironnementales de certaines autres études sont en Annexes (extraits de publications et de rapports).

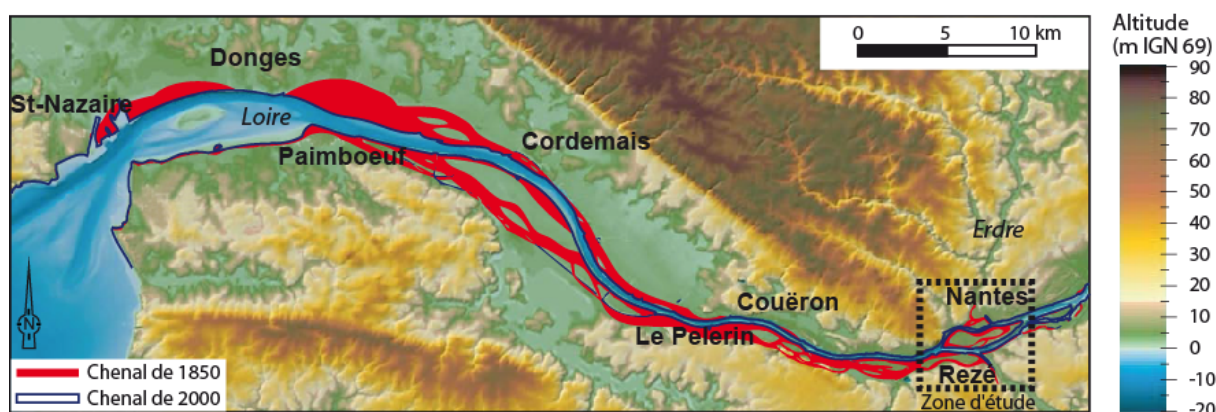
### III.2.b. Le comblement de la vallée de la Loire à Nantes

Depuis plusieurs dizaines d'années, de nombreux travaux portent sur l'étude du remplissage des estuaires des grands fleuves afin de comprendre l'évolution des paléoenvironnements enregistrés dans la sédimentation accumulée depuis 18 000 ans suite à la remonté du niveau marin. Différents travaux sur les parties actuellement immergées de ces vallées incisées ont permis de hiérarchiser les facteurs forçants (Cattaneo & Steel, 2003 ; Dalrymple & Choi, 2007) et de démontrer que le contexte géomorphologique est un facteur dominant en climat actuellement tempéré, dans le cas d'un fleuve incisant un substratum ancien et débouchant sur un large plateau continental (Menier, 2004 ; Chaumillon et al., 2010 ; Proust et al., 2010 ; Tessier B. et al., 2012). C'est dans ce contexte particulier que s'inscrit la Loire. Pour reconstituer la stratigraphie estuarienne et fluviale du remplissage de la vallée de la Loire, différentes approches méthodologiques ont été mises en œuvre (sédimentologie, palynologie, archéologie) principalement sur la zone aval de l'estuaire (Ters et al., 1968 ; Barbaroux et al., 1974, 1980 ; Biteau, 1978 ; Cyprien, 2002) et sur des zones en amont (Garcin et al., 2001 ; Arthuis et al., 2006). Sur la zone intermédiaire, centrée sur Nantes, de rares études palynologiques ont été publiées par Visset et al. (2001) et Ouguerram & Visset (2001). Ainsi, les reconstitutions paléoenvironnementales publiées sont basées sur les données palynologiques (Cyprien et al., 2004).

Récemment, afin de réaliser un inventaire exhaustif des alluvions fossiles conservés dans la vallée de la Loire et pour mieux comprendre l'organisation des corps sédimentaires dans le secteur de Nantes, une synthèse a été réalisée à partir des sondages géotechniques et des données chronologiques issues des travaux palynologiques. L'objectif a été de proposer un scénario de comblement de la vallée de la Loire à Nantes dans le cadre des modèles de comblement d'estuaire soumis aux variations climatiques et eustatiques. Différentes cartes paléogéographiques et des coupes schématiques ont été réalisées. Des sondages carottés ont été alors positionnés afin de préciser les environnements de dépôts. Les études sédimentologiques et micropaléontologiques sont en cours de finalisation.

- **La Loire et le site d'étude**

Après avoir drainé un bassin versant de 115 000 km<sup>2</sup>, les eaux de la Loire se jettent dans l'Atlantique au niveau du secteur le plus large du plateau continental du Golfe de Gascogne. Le substratum métamorphique et plutonique paléozoïque ainsi que le cisaillement sud-armoricain d'âge hercynien, confèrent au lit majeur de l'estuaire de la Loire une morphologie de type plaine côtière à forte structuration tectonique. Le lit majeur est caractérisé par une succession de rétrécissements structuraux et d'élargissements occupés en aval par des marais maritimes et des vasières intertidales. Au niveau de la zone d'étude à Nantes, la Loire présente différents bras et îles soulignés par des failles et par des lithologies plus résistantes (Figure 28).



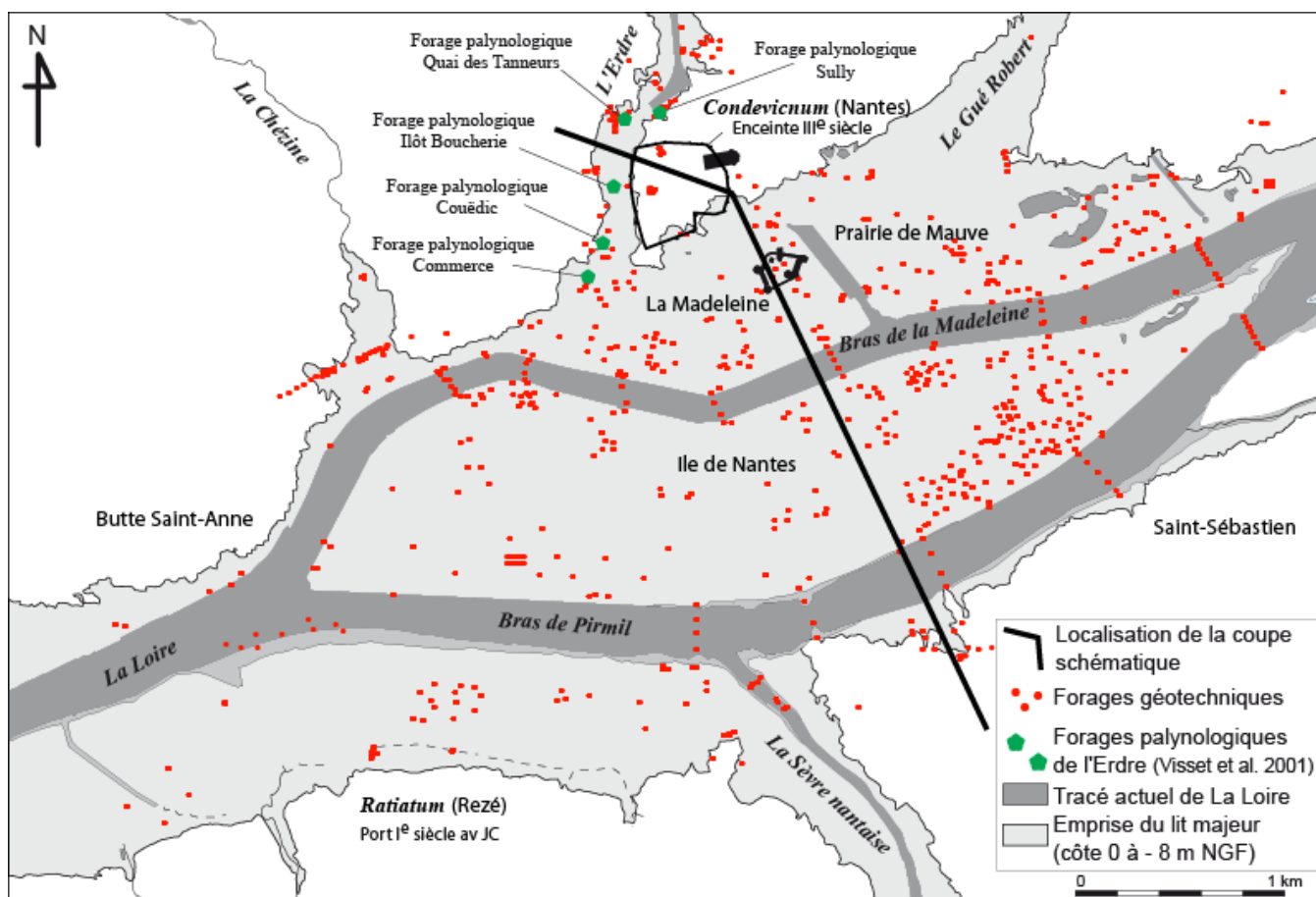
**Figure 28. Morphologie de l'estuaire de la Loire jusqu'à Nantes (Goubert, en prép.).**

L'estuaire de la Loire s'étend actuellement sur 100 km et est caractérisé par un biseau salé et surtout par un bouchon vaseux qui peuvent remonter jusqu'à 65 km (Ciffroy et al., 2003). Ce bouchon vaseux constitue un stock de 1 500 000 tonnes de particules fines dont le taux de résidence est de 4 à 10 mois, avec des taux de décantation qui vont de 4 cm/an dans l'estuaire à 0,5 cm/an juste en amont de l'Île de Nantes (Ciffroy et al., 2003).

L'épaisseur des sédiments accumulés dans la vallée de la Loire est d'environ 40 m à Saint-Nazaire et de 30 m à Nantes (Ottman et al., 1968 ; Ters et al., 1968). Dans ces deux articles, les coupes transversales montrent les dépôts suivants : des graviers, des sables moyens à grossiers, des sables fins bien triés, des niveaux fins argilo-sableux et des niveaux argilo-tourbeux ; le sédiment dominant variant en fonction de la position géographique et altimétrique.

- **Méthodologie**

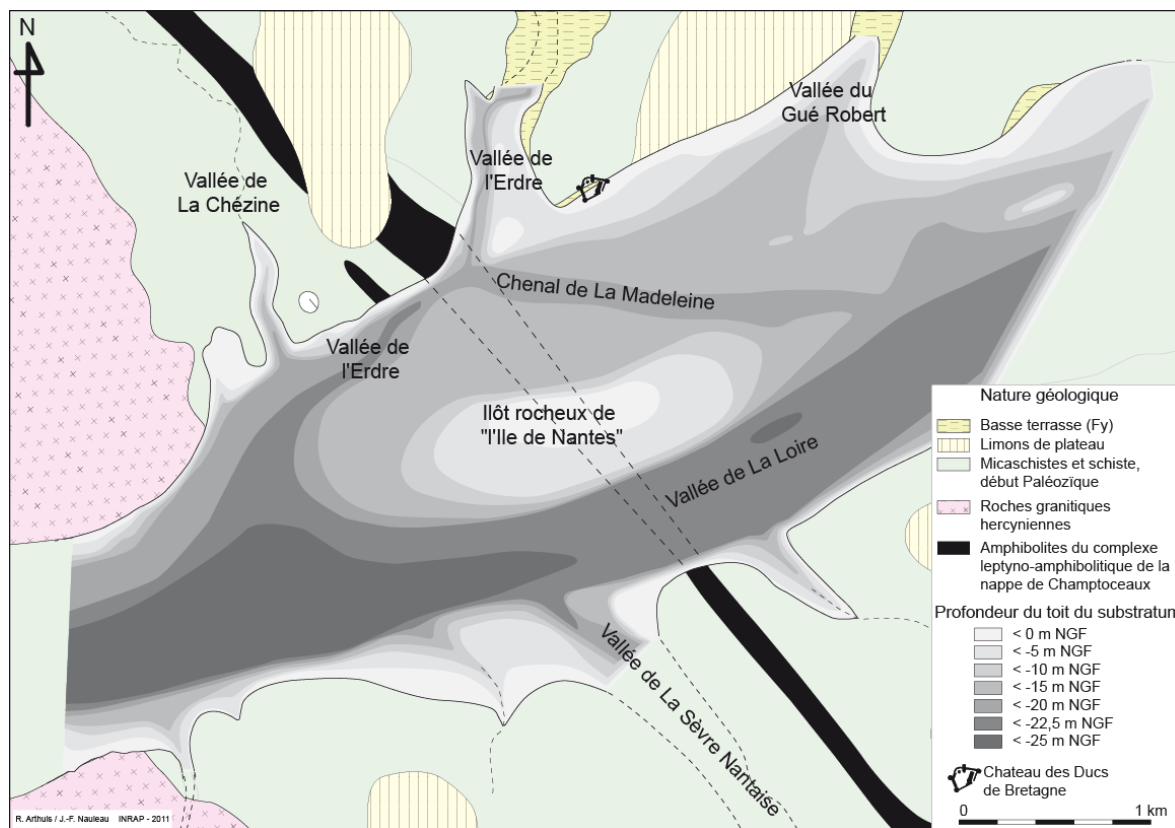
Cette synthèse repose sur la compilation des données précédemment citées et surtout sur l'utilisation des relevés de plus de 1 000 sondages géotechniques sur un secteur centré sur la ville de Nantes (Figure 29). À partir des cartes des entités géomorphologiques et chronologiques (Annexe 1), différentes coupes synthétiques ont été réalisées et comparées à celles proposées pour la Loire dans le cadre de modèles de remplissage des vallées estuariennes (Dalrymple et al., 1992 ; Cattaneo & Steel, 2003 ; Dalrymple & Choi, 2007 ; Menier, 2004 ; Chaumillon et al., 2010 ; Tessier B. et al., 2012 ; Estournes et al., 2012 ; Traini et al., 2013).



**Figure 29. Localisation des sondages utilisés pour la synthèse du comblement de la Loire.**

- **Le remplissage des vallées ligériennes à Nantes**

Les vallées ligériennes s'organisent autour des confluences Erdre / Loire et Sèvre Nantaise / Loire et autour de l'île de Nantes, dont le substratum culmine à -2,5 m NGF. Au Sud de l'île de Nantes, le toit du substratum forme une vallée d'environ 2 km de large, pour une profondeur variant entre -20 et -25 m NGF. Au Nord de l'île de Nantes, la vallée qui correspond à la confluence entre l'Erdre et la Loire, présente un talweg moins profond situé entre -15 et -20 m NGF (Figure 30).



**Figure 30. Morphologie du substratum rocheux au niveau de Nantes et carte géologique simplifiée (Goubert, en prép.).**

Le fond du lit majeur est comblé par des dépôts graveleux würmiens formant une terrasse à une altitude moyenne estimée à -10 m NGF et incisé par des dépôts sableux grossier de chenaux anastomosés situés au niveau de la partie Sud de la vallée de la Loire (bras de Pirmil). Dans le cas de la vallée de l'Erdre, il s'agit de dépôts argilo-tourbeux. Cet ensemble correspond au **cortège de bas niveau (LST, Figure 31)** qui semble se terminer vers 10 300 ans BP.

Le **cortège transgressif** est constitué de paraséquences qui (**TST.1, Figure 31**) semblent débiter par des dépôts estimés de 10 000 à 8 000 ans BP constitués d'environ 4 m de sables moyens fluviatiles, dont la réduction du diamètre moyen indique clairement une élévation du niveau de base. Ces sables moyens se déposent dans des chenaux en tresse au niveau du bras de Pirmil. Cette phase transgressive se traduit par le dépôt d'environ 7 m d'argile organique tourbeuse au niveau de la plaine alluviale de l'Erdre. Les terrasses würmiennes ne sont pas encore ennoyées. Une deuxième unité du cortège transgressif (TST.2) est constituée par des dépôts sablo-vaseux localisés dans les chenaux principaux de la Loire et de sable fin et d'argile parfois organique à tourbeuse dans l'Erdre. L'épaisseur de ces dépôts est d'environ 2 m et le sommet est estimé à 7 500 ans BP. Cet épisode traduit l'influence plus nette de la dynamique tidale. Ce cortège transgressif se poursuit (TST.3) par le dépôt d'argile silteuse organique à tourbeuse sur une épaisseur estimée à 10 m pour atteindre une

---

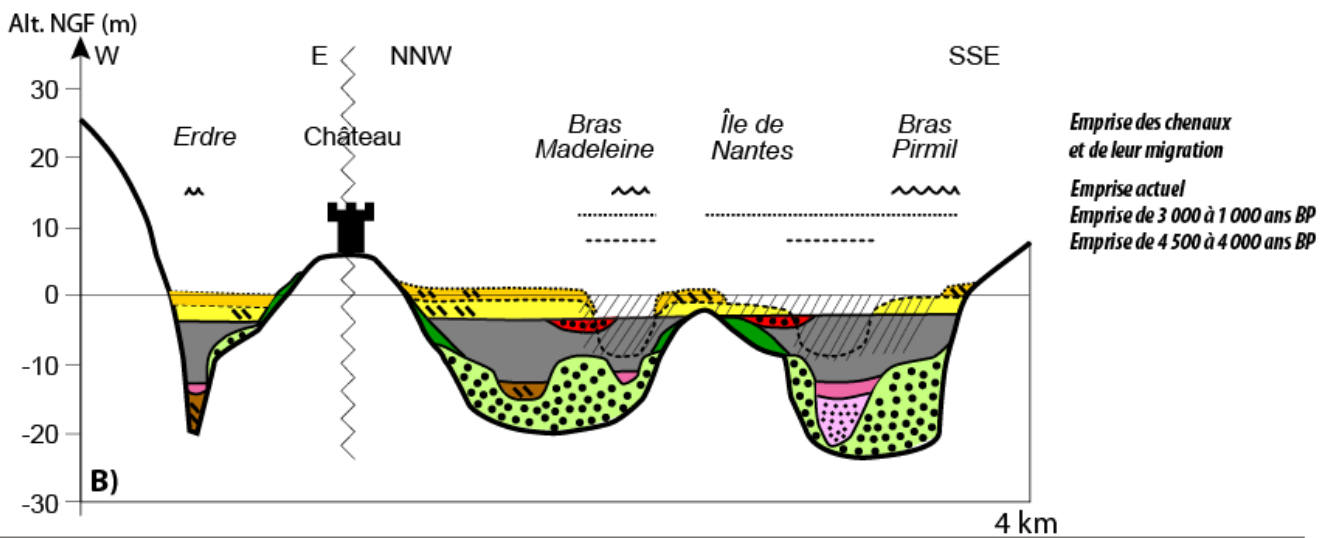
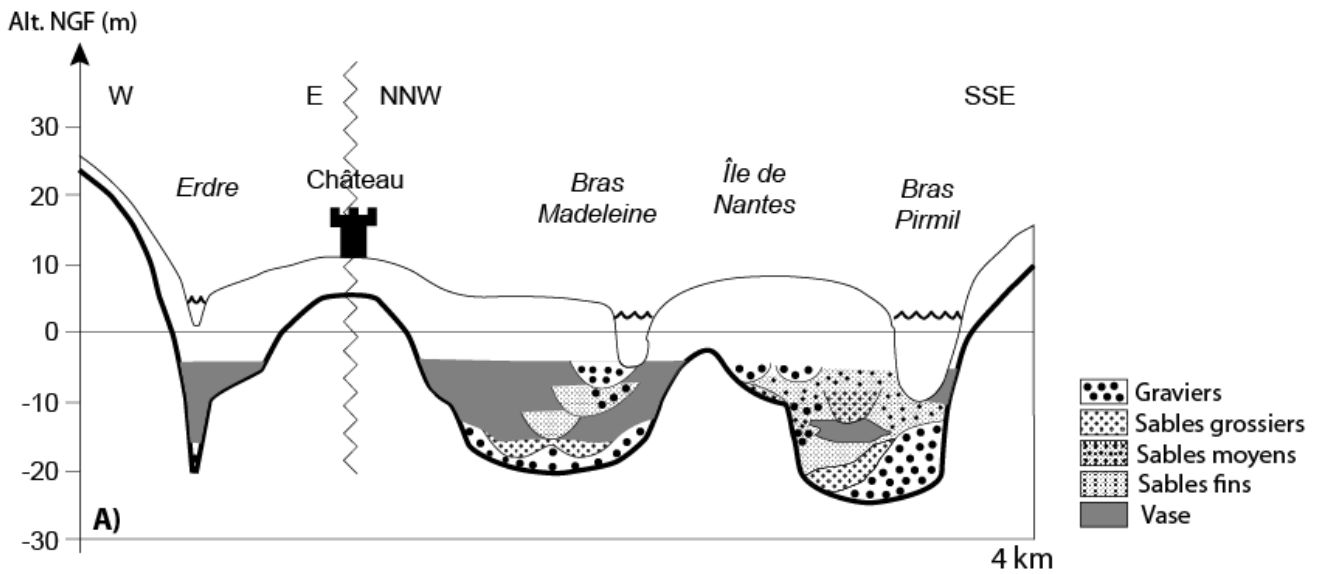
altitude de -4 m NFG au niveau des plaines alluviales ; les terrasses würmiennes sont submergées. Ces dépôts argileux sont incisés par les chenaux tidaux à sédiments sableux. Les dépôts sont franchement estuariens à Nantes et les sables fluviaux se déposent largement en amont de Nantes. L'âge de la dernière phase de cet épisode fortement transgressif est estimé entre 7 500 et 5 700 ans BP. La fin de la phase transgressive (TST.4) se marque par la reprise des dépôts plus sableux qui matérialisent les chenaux tidaux-fluviaux encadrés par des vasières moins agréables que pendant la phase précédente. Ce ralentissement de la transgression se poursuit jusqu'à 4 500 ans BP.

La dernière partie du comblement correspond au **prisme de haut niveau (HST, Figure 31)**. Il est caractérisé par des dépôts sableux érosifs d'origine continentale (HST.1) qui incisent de 6 m le cortège transgressif. La durée de cette première période est estimée à environ 500 ans, entre 4 500 et 4 000 ans BP correspond à une phase plus humide (Morzadec, 1974). La seconde période qui caractérise le prisme de haut niveau (HST.2) est une phase d'accrétion importante de sable fluvial avec des chenaux fluviaux en tresse qui vont migrer en provoquant l'érosion du cortège transgressif (TST). Le niveau marin évoluant peu, la dynamique fluviale redevient dominante. Lors de cette période, il semble que cela soit la première fois que les deux bras de la Loire présentent un schéma de comblement différent : une migration réduite du chenal de la Madeleine, alors que les chenaux de Pirmil semblent migrer sur l'ensemble de la largeur du lit majeur. Entre 3 000 ans et environ 1 000 ans, les dépôts sableux sur les berges se stabilisent à une altitude d'environ 0 m NFG, avec des dépressions tourbeuses le long des flancs rocheux du lit majeur et sur l'île de Nantes, entraînant la réduction du nombre de chenaux au niveau du bras de Pirmil. La réduction progressive du nombre de chenaux qui a contraint les eaux du fleuve à s'écouler dans deux chenaux situés le long des flancs Sud du lit majeur (de chaque côté de l'île de Nantes) pourrait être attribuée à l'influence des aménagements humains, soit locaux (sans preuve actuellement sur le site de Nantes) ou soit sur le bassin versant de la Loire, entraînant des modifications du flux sédimentaire.

- **Synthèse du comblement**

Le comblement des vallées ligériennes à Nantes enregistre les différentes phases classiquement observées dans le comblement des vallées estuariennes dont une synthèse est proposée par Dalrymple & Choi (2007), Chaumillon et al. (2010), Proust et al. (2010), Tessier B. et al. (2012), Traini et al. (2013). Dans le cas de notre site d'étude, le comblement permet de mieux comprendre les mécanismes observés dans les zones amonts des vallées estuariennes, à la limite fleuve / estuaire. Ainsi, lorsque la vitesse de remontée du niveau marin est maximale (TST.3), la Loire est clairement un estuaire dominé par la marée, mais très rapidement, lorsque la vitesse de remontée du niveau marin diminue, l'énergie fluviale augmente et marque la sédimentation par la présence de chenaux fluviaux-tidaux à dépôt de sables fins et moyens (TST.4). Dans les deux cas, le contrôle morphologique structural est fort, conduisant à la formation d'une ria lors du TST.3 et à la différenciation de comportement des chenaux Sud et Nord entourant l'Île de Nantes (TST.4). Le passage au cortège de haut niveau semble brutal et il est surtout marqué par l'action de la charge sédimentaire importante de la Loire. Ce prisme de haut niveau est très fortement érosif en fonction de l'ampleur des mécanismes d'altération et d'érosion du bassin versant de la Loire.

La position de la zone d'étude, en amont de rétrécissements structuraux, à la confluence avec l'Erdre et en amont de la zone actuellement estuarienne, confère à la vallée de la Loire à Nantes une situation idéale pour l'étude des caractéristiques des remplissages de ce type de vallée. L'analyse des sondages géotechniques a permis de proposer un scénario de comblement, depuis 10 000 ans environ et surtout de localiser les secteurs qui pourront être carottés afin de dater et de reconstituer précisément les paléoenvironnements.

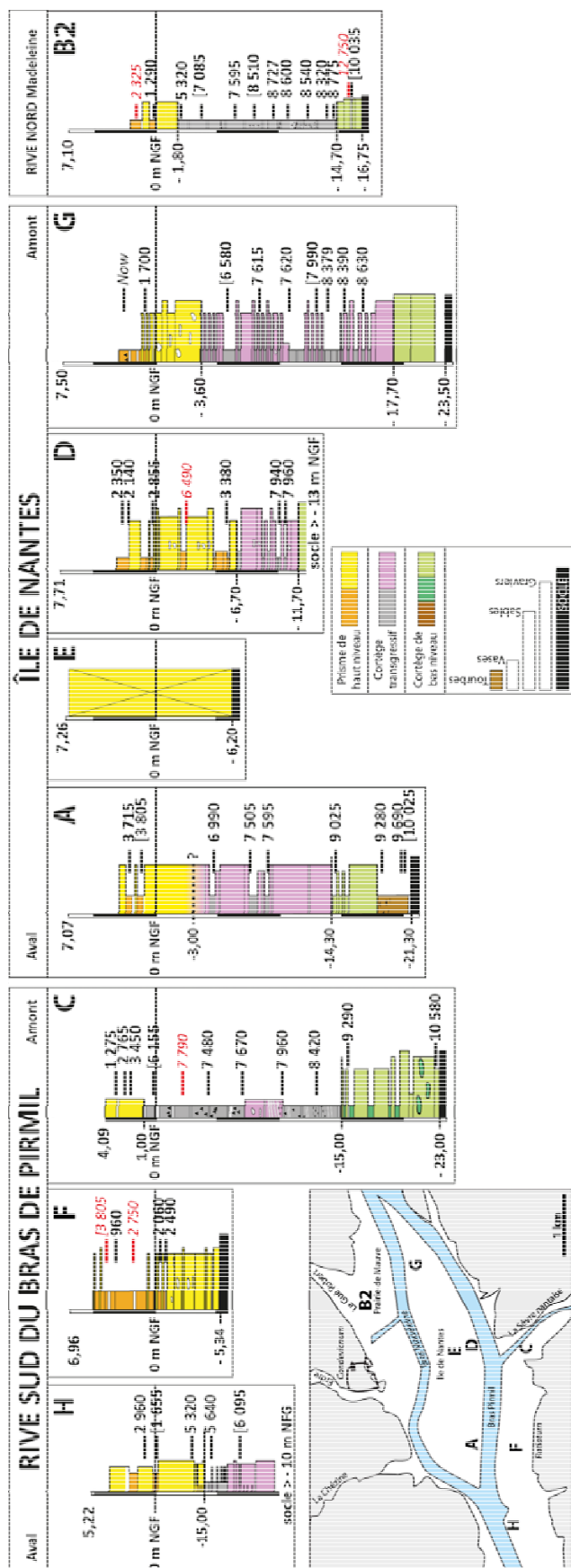


Prisme de haut niveau (Highstand Systems Tract)		HST.2 - Dépôts sablo-vaseux intertidaux et sableux continentaux dans les chenaux de 3 000 ans BP. Incision, emprise des chenaux et dépôts latéraux
		HST.1 - Dépôts sablo-vaseux intertidaux et sableux continentaux dans les chenaux de 4 500 à 4 000 ans BP. Incision, emprise des chenaux et dépôts latéraux
Cortège transgressif (Transgressive Systems Tract)		TST.4 - Stabilisation des chenaux tidiaux sablo-vaseux de 5 700 à 4 500 ans BP
		TST.3 - Dépôts argileux transgressifs de 7 500 à 5 700 ans BP
		TST.2 - Dépôts sablo-vaseux transgressifs de 8 000 à 7 500 ans BP
Cortège de bas niveau (Lowstand Systems Tract)		TST.1 - Dépôts de sables fluviaux de 10 000 à 8 000 ans BP
		LST - Dépôts vaseux, marécageux à tourbeux de 10 300 ans BP
		LST - Terrasse würmienne sablo-graveleuse
		LST - Formations indéterminées sablo-graveleuses (dépôts de terrasses antérieures)
		Marécageux à tourbeux
		Toit du substratum hercynien

**Figure 31. Proposition de reconstitution du remplissage des vallées ligériennes à Nantes. A) Reconstitution de la coupe actuelle à partir des sondages géotechniques. B) Coupe chronologique du remplissage.**

- **Les carottes réalisées à Nantes**

À partir des différentes cartes (Annexe 1), huit sondages ont été positionnés sur le secteur d'étude. L'ensemble des résultats des datations et des données sédimentaires confirme les propositions de reconstructions paléogéographiques et le schéma du comblement.



Les carottes ont permis de préciser les faciès sédimentaires associés aux phases du comblement (Figure 32) en tenant compte de la position des carottes par rapport à la morphologie du substratum.

Le **cortège de bas niveau** correspond à des graviers et à des sables, excepté pour la carotte A située à l'extrémité Ouest de l'île de Nantes dans une zone protégée de l'influence fluvial où une tourbière a pu se développer.

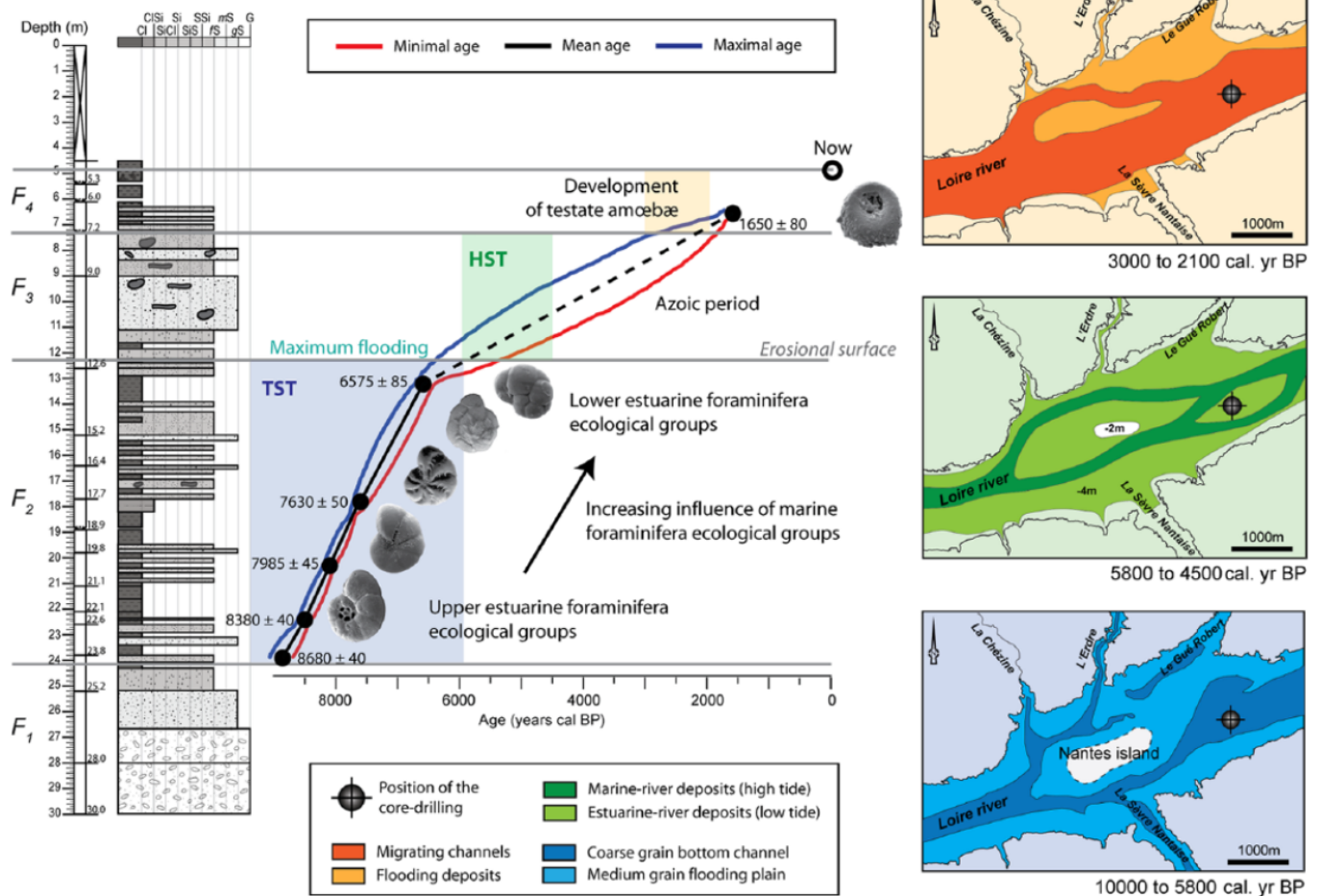
Le **cortège transgressif** peut être sablo-graveleux dans les zones à forte énergie marine (marée montante), par exemple la carotte A (11 m d'épaisseur préservée-EP) et les carottes D (5 m EP) et H en bordure de chenal. La carotte G située en amont de l'île de Nantes enregistre des alternances sur 14 m EP de sables et de vase. Cette position est peu exposée à l'énergie marine, mais plus aux apports fluviaux. La carotte C, le long d'un affluent de la Loire, est très abritée et le cortège transgressif vaseux très aggradant avec actuellement 15 m de dépôts préservés. La carotte B2 située dans une dépression latérale montre également une aggradation rapide avec 13 m EP.

Les derniers mètres des carottes représentent le **prime de haut niveau**, il s'agit principalement de sable ayant incisés le cortège transgressif, excepté pour la carotte A, où le passage s'effectue au sein d'un dépôt sableux.

Les données micropaléontologiques (pollens, foraminifères et thécamoebiens) ont été acquises et sont en cours de publication. Seuls les résultats acquis sur la carotte G, en amont de l'île de Nantes ont été publiés (Delaine et al., 2015, Figure 33).

**Figure 32. Logs des carottes recalés en NGF, granulométrie, datation (cal BP) et cadre stratigraphique (Goubert, en prép.). [datations en rouge = remaniement]**





**Figure 33. Enregistrement des modalités du comblement de la vallée de la Loire à Nantes par les foraminifères (Delaine et al., 2015).**

Les analyses détaillées des résultats micropaléontologiques (pollens, foraminifères et thécamoebiens) vont permettre de préciser les différentes influences au cours des phases successives du comblement : notamment de préciser la balance entre influence fluviale, estuarienne, marine. De plus, la comparaison entre les pollens et les foraminifères peuvent permettre de mieux comprendre les décalages temporels d'enregistrement des fluctuations environnementales par les organismes marins/estuariens et par la végétation continentale.

**Participation au programme de recherche :**

> PCR Loire : Comblement de la vallée de la Loire à Nantes (INRAP, R. Arthuis et U. Nantes M. Monteil)

**Travaux réalisés**

Arthuis R., Nauleau J.F., **Goubert E.**, Barbier-Pain D., Baudouin V., 2015. Reconstitution paléogéographique de la vallée de la Loire à Nantes depuis 8 000 ans. PUR, 22 pages.

Delaine M., Armynot du Châtelet E., Bout-Roumazeilles V., **Goubert E.**, Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A., Arthuis R., 2015. Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyses: The infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *The Holocene*, 25, 407-420.

Arthuis R., Barbier-Pain D., Baudouin V., **Goubert E.**, Nauleau J.F., 2015. Paléogéographie holocène de la Loire à Nantes réalisée à partir de l'étude des sondages géotechniques et palynologiques. Conséquences géomorphologiques et archéologiques. In « L'environnement en mémoire : marqueurs, outils et perspectives », Actes de la journée d'étude de l'Université de la Rochelle, décembre 2012. Numéro thématique de la revue *Natures Sciences et Sociétés*. 30 p.

**Goubert** et al., publication en cours.

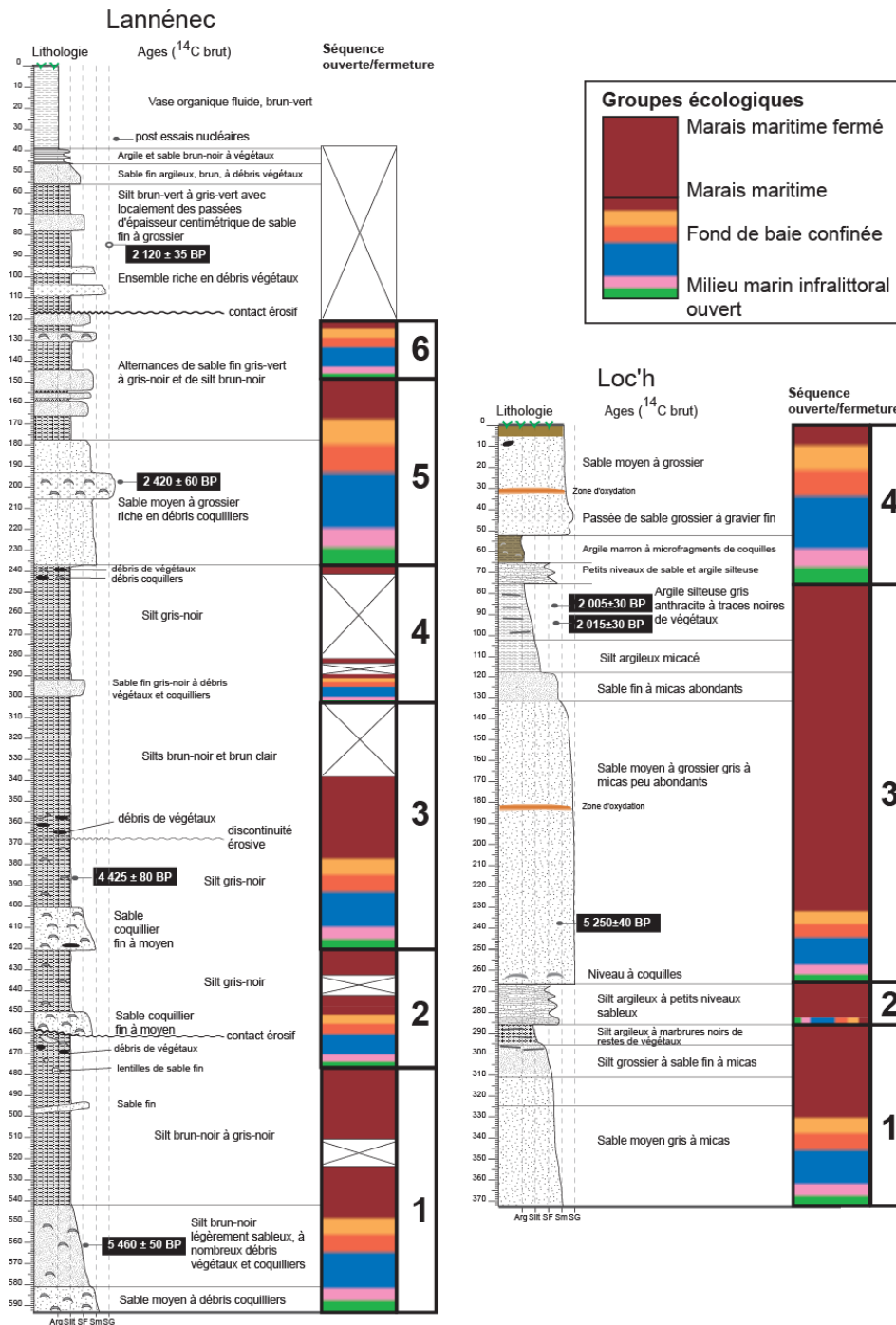
### III.2.c. Les étangs orientaux de Lannédec et du Loc'h : ouverture/fermeture des étangs et changements climatiques rapides ?

Les étangs de Lannédec et du Loc'h, distant de 2,5 km sont situés sur la côte orientale caractérisée par la présence de cordons sableux (Figure 34). Ces cordons sableux relient des pointes rocheuses délimitant ainsi de petites cellules sédimentaires à sables ocres ou blancs en fonction du fond géologique. Entre chaque pointe rocheuse, des dépressions arrières littorales (marais, étangs) sont séparées de la plage par ces cordons sableux. L'orientation de la côte, par rapport aux houles dominantes, varie du Sud au le Nord.



**Figure 34. Localisation des étangs lorientais de Lannédec et du Loc'h, des carottes et caractérisation morphosédimentologique du littoral (Goubert, en prép.).**

Le principal objectif a été d'identifier les phases d'ouverture et de fermeture des étangs (ou de rupture et reconstruction du cordon dunaire) en relation avec les fluctuations climatiques et eustatiques holocènes à partir des foraminifères benthiques des carottes prélevées dans les deux étangs. Les deux carottes couvrent la même période de temps de 5 500 BP (6 200 cal BP) à 2 000 BP (1960 cal BP). Dans les deux cas les foraminifères ont été comptés et les données ont été traitées avec une approche morphofonctionnelle conduisant à la détermination de groupes écologiques (Figure 35). La succession des groupes écologiques a permis d'identifier des phases de ruptures du cordon dunaire, donc de communication avec la mer, et des phases de fermetures progressives des lagunes (Annexe 2). Ainsi, pour la même période de temps, 6 séquences d'ouverture/fermeture ont été identifiées pour l'étang de Lannédec et seulement 4 pour l'étang du Loc'h.

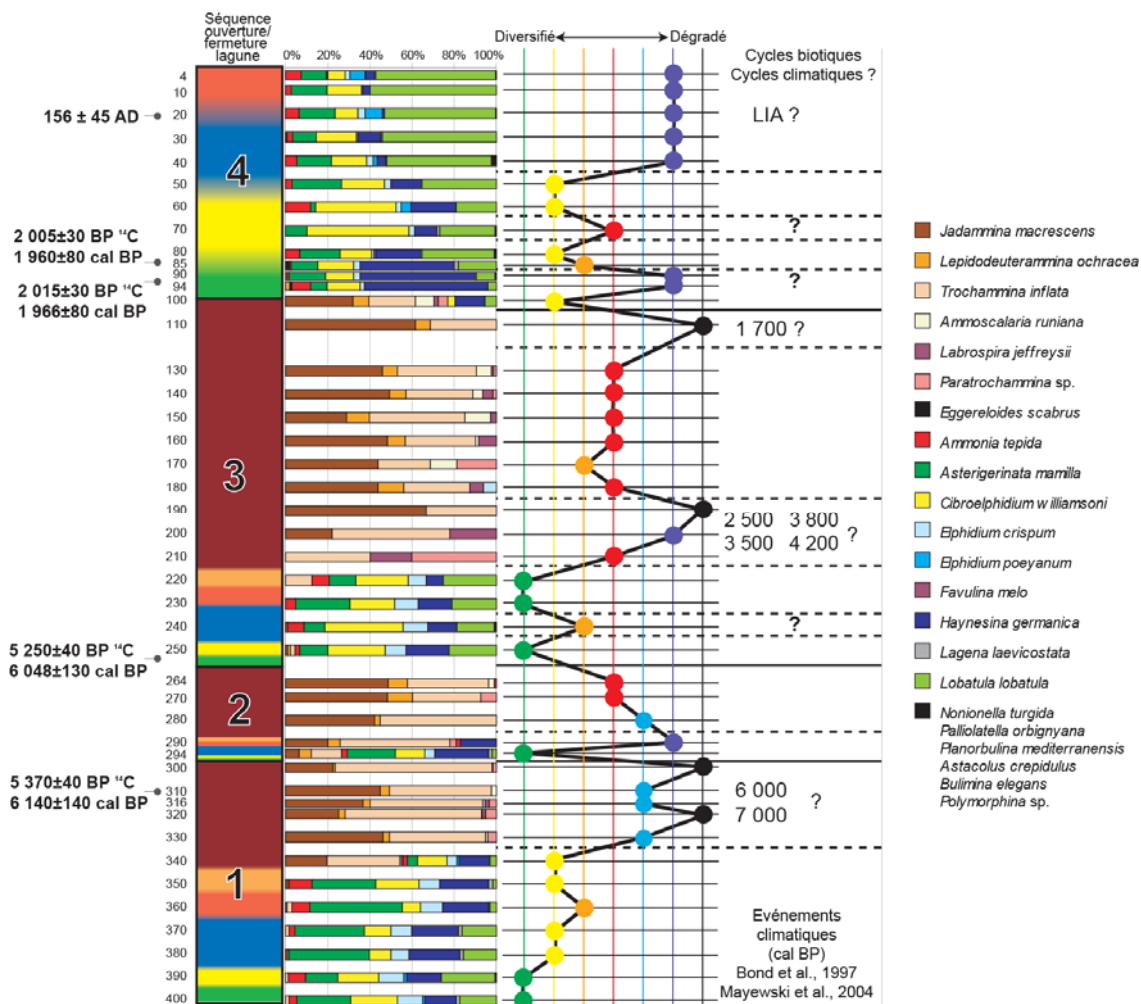


**Figure 35. Log des carottes de Lannéec et du Loc'h : succession des séquences ouverture/fermeture (Goubert, en prép.).**

La différence d'enregistrement provient vraisemblablement de la morphologie des pointes rocheuses et des platiers rocheux subtidaux qui conditionnent la dynamique sédimentaire de la plage et des cordons dunaires. Ainsi, lorsqu'à partir d'une carotte, on tente de mettre en parallèle des phénomènes morphosédimentologiques (rupture ou construction d'un cordon dunaire) avec des cycles climatiques, il faut être très prudent et bien analyser le contexte géomorphologique et sédimentologique, ou bien réaliser plusieurs carottages.

Les données de comptage des foraminifères de la carotte du Loc'h ont été traitées par la méthode rang/fréquence afin de voir si des oscillations environnementales en plus des phases d'ouverture/fermeture ne pouvaient pas être mises en évidence. Le diagramme rang-fréquence de la Figure 36 permet d'établir une succession d'états biotiques allant de diversifié à dégradé.

Certaines variations des cycles biotiques (Figure 36) ne correspondent pas aux grandes coupures dues aux séquences ouverture/fermeture de la lagune. Ces cycles biotiques peuvent être dus à des variations des caractéristiques des masses d'eaux de surface : température, salinité, teneurs en nutriments d'origine continentale ou marine... Les corrélations avec les cycles de Bond et al. (1997) et de Mayewski et al. (2004) pourraient permettre de mieux comprendre les relations entre la dynamique des eaux de fond et celle des eaux de surface qui baignent les lagunes.



**Figure 36. Synthèse des données des assemblages de foraminifères de la carotte du Loc'h (Goubert, en prép.).**

Séquences ouverture/fermeture de la lagune à partir des histogrammes de répartition des espèces dans les assemblages ; Interprétation de l'état biotique à partir des diagrammes rang-fréquences et essais de corrélations chronologiques avec les événements climatiques décrits par Bond et al. (1997) et Mayewski et al. (2004).

**Participation au programme de recherche : Les étangs orientais (UBO, J.J. Tiercelin)**

**Travaux réalisés**

Thoraval M., Tiercelin J.-J., **Goubert E.**, Menier D., 2004. Paleogeographical evolution of coastal ponds on the littoral of Morbihan (France) during Holocene : relations with eustatism and climatic changes. RST 2004, 20° (20-25 sept. 2004, Strasbourg).

Tiercelin J.J., **Goubert E.**, Menier D., Thoraval M., Tessier B., Carbonel P., Barbier D., 2004. Les lagunes en amont de la marge proximale sud-armoricaine : exemple de l'étang de Lannec (Morbihan, France). Les incisions et dépôts de la marge atlantique française depuis le Néogène, Séance spécialisée SGF-ASF, Paris, 25-26 novembre 2004.

Tiercelin J.J., **Goubert E.**, Marrec S., Vidal M., Schuster M., Hautot S., Tarits P., 2007. Littoral lakes along the Atlantic shorelines of Southern Brittany, France: Archives of sea level variations and storm events during Holocene times. ILIC 2007, 4th international Limnogeology Congress, 11-14 July 2007, Barcelona, Spain.

Tiercelin J.J., Proust J.N., **Goubert E.**, Vidal M., Regnaud H., 2011. Responses of coastal sedimentary ecosystems of Southern Brittany to extreme meteorological events at different time and space scales. The international symposium "Coastal ecosystems vulnerability to global change and extreme events", Biarritz, France, October 18 to 21, 2011.

**Goubert** et al., publication en cours.

### III.2.d. Le Loch Sunart : mise en évidence des changements climatiques rapides ?



Figure 37. Localisation de la carotte du Loch Sunart (Ecosse).

Comme pour la carotte de l'étang du Loc'h (Lorient), les données des comptages de foraminifères ont été traitées afin d'identifier les fluctuations environnementales depuis 18 000 ans. La carotte d'une longueur de 12 m traverse des silts argilo-sableux très monotones interrompus par des niveaux coquilliers dont un niveau remarquable à turritelles (Figure 38). Le diagramme rang-fréquence permet d'identifier des cycles de restauration/dégradation de l'environnement pouvant être mis en relation avec les changements climatiques rapides de Bond et al. (1997) et Mayewski et al. (2004). Comme pour la coupe précédente et pour de nombreuses coupes, le calage chronologique est parfois insuffisant ou le modèle d'âge mal adapté aux contextes sédimentologiques pour pouvoir estimer précisément les cycles.

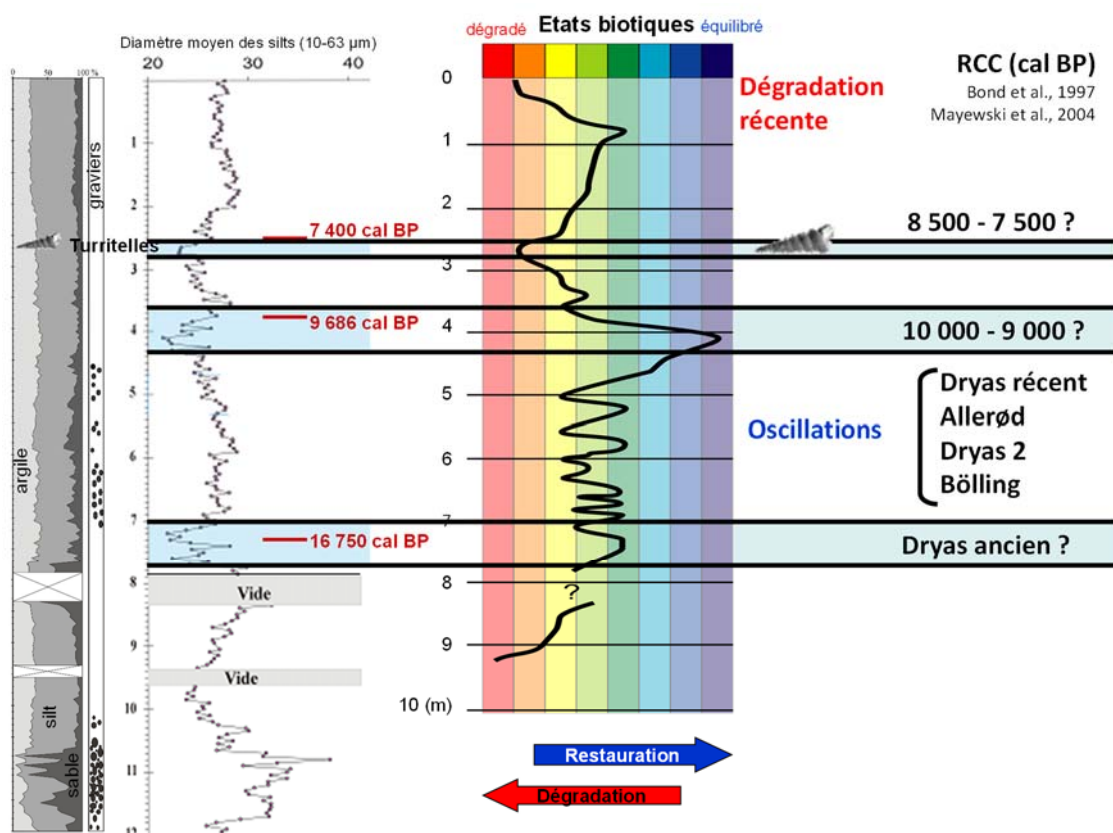
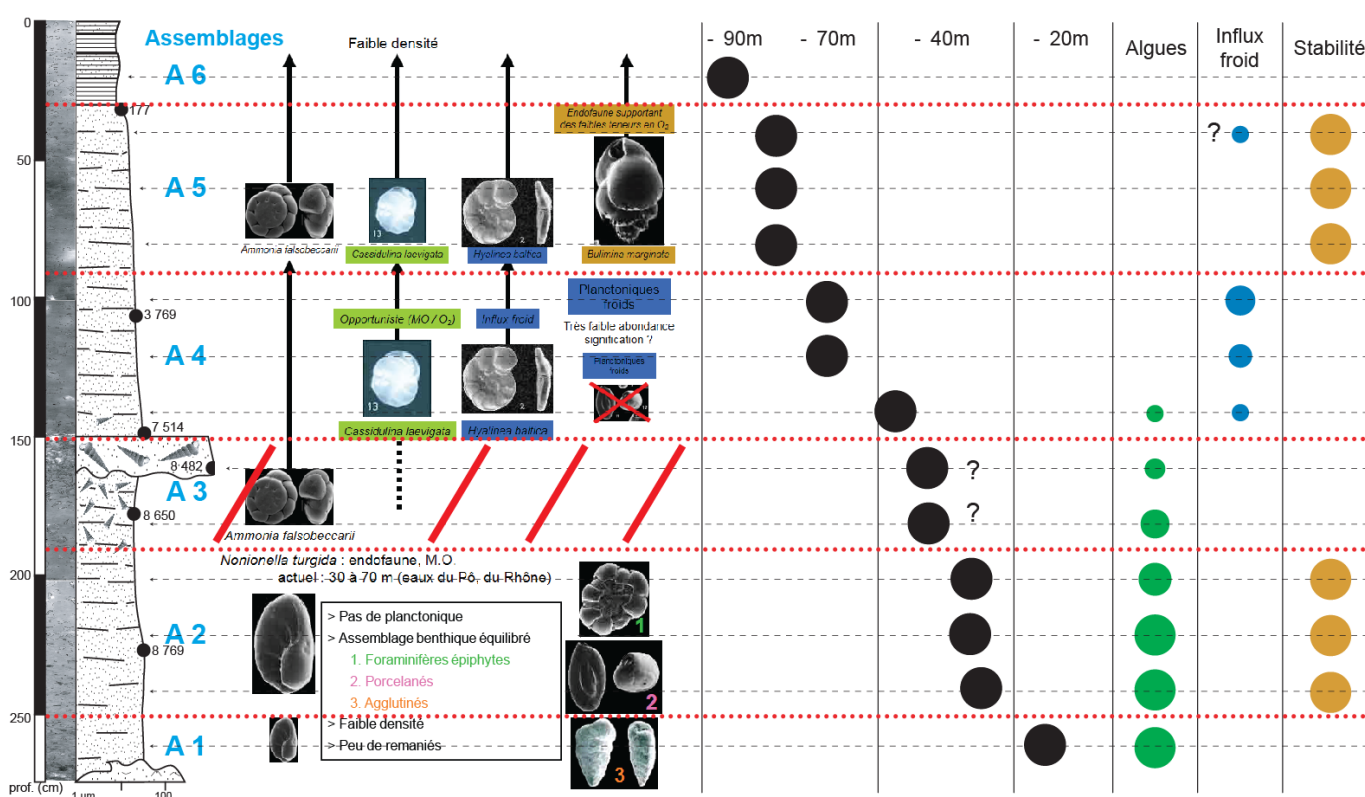


Figure 38. Log synthétique de la carotte MD04-2833 du Loch Sunart, diagramme rang-fréquences basé sur les assemblages de foraminifères et correspondances avec les changements climatiques rapides (Goubert et al., 2007).

### III.2.e. L'identification de phases majeures dans les fluctuations environnementales : les niveaux à turritelles d'Ecosse et de Bretagne Sud

Une étude comparative du niveau à turritelles a été menée par JF. Bourrillet et A. Baltzer à partir des données des carottes de Bretagne Sud (Baie de Quiberon et Glénans) et d'Ecosse (Loch Sunart et Loch Creran) (Figure 25 et Figure 37). Ce niveau à turritelles (*Turritella communis*), présent dans différentes carottes et sur des relevés sismiques, est daté de 8 764 à 7 500 cal BP aussi bien en Ecosse qu'en Baie de Quiberon. De plus, la principale caractéristique de ce niveau est d'être constitué de coquilles de turritelles entières et de tailles très variées impliquant des conditions favorables au développement de populations abondantes, puis des conditions entraînant des mortalités massives. L'analyse des assemblages de foraminifères a permis d'estimer les conditions environnementales, avant, pendant et après le niveau à turritelles ; un exemple est donné pour la carotte des Glénans, VK 03-58b (Figure 39).



**Figure 39. La carotte des Glénans (VK03-58b) : log, assemblages de foraminifères et interprétations paléoenvironnementales. (Hachures rouges : niveau à turritelles)**

Le niveau à turritelles est caractérisé par la présence d'une espèce opportuniste qui indique, lorsqu'elle est seule comme c'est le cas ici, un environnement confiné à forte turbidité, de type vasière à très faible courant et très faible renouvellement d'eau. Il s'agit ici de la mise en place d'une vasière subtidale avec une stratification de la masse d'eau qui fait suite vraisemblablement à une accélération de la remontée du niveau marin. Il s'agit d'un environnement propice au développement des turritelles. Les mortalités massives de turritelles identifiées sur toutes les carottes indiquent des conditions globales conduisant à des dépôts importants de sédiments fins. Cet épisode s'étendant d'environ 8 700 à 8 000 ans BP pourrait être mis en relation avec l'événement 8 200 ans (Alley et al., 1997 ; Kobashi et al., 2007 ; Seppa et al., 2007 ; Lawrence et al., 2016).

---

**Participations aux programmes de recherche :**

> **Thèse : Z. Mokeddem (U. Caen, B. Tessier et A. Baltzer)**

> **Défi Golfe de Gascogne TROPHAL et SEDICAR (Ifremer Brest, J.F. Bourrillet)**

**Travaux réalisés**

Bourrillet J.F., Folliot B., Lesueur P., **Goubert E.**, 2004. Architecture des sédiments holocènes de la plate-forme armoricaine et lien avec l'eustatisme. Les incisions et dépôts de la marge atlantique française depuis le Néogène, Séance spécialisée SGF-ASF, Paris, 25-26 novembre 2004.

Bourrillet J.F., **Goubert E.**, Cortijo E., Dubrulle C., Jouanneau J.M., Lesueur P., Vicaire O., 2005. Architecture, mise en place et évolution des sédiments holocènes de la plate-forme armoricaine. Colloque Ifremer « Défi Golfe de Gascogne » 2005.

Bourrillet J.F., Dubrulle C., **Goubert E.**, Jouanneau J.M., Cortijo E., Weber O., Lesueur P., 2005. La Grande Vasière : architecture, mise en place et estimation des facteurs de son évolution. Colloque Golfe de Gascogne 2005.

**Goubert E.**, Mokeddem Z., Baltzer A., 2007. Une nouvelle utilisation des foraminifères pour les reconstitutions paléoenvironnementales : la méthode rang/fréquence appliquée à l'étude du remplissage sédimentaire du Loch Sunart (NW, Ecosse) depuis 20 000 ans. 11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen, 21-27 Octobre 2007.

Baltzer A., Bates R., **Goubert E.**, Mokeddem Z., Bourrillet J.-F. and Bonnot Courtois C., 2007. Corrélation d'un réflecteur sismique mystérieux à un niveau riche en Turritelles? 11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen., 21-27 Octobre 2007.

Mokeddem, Z., Baltzer, A., Clet-Pellerin, M., **Goubert, E.**, Walter-Simonnet, A.V., 2008. Multi-data study to reconstitute climate changes since 20,000 yr in a coastal environment : the Loch Sunart (NW Scotland). EGU, 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-06567.

Baltzer A., Mokeddem Z., **Goubert E.**, Clet-Pellerin M., Walter-Simonnet A.V., Bonnot-Courtois C., 2008. First pollen analyses combined to foraminifera assemblages, a key to follow the climatic changes in a fjordic environment : the loch Sunart (NW Scotland). EPICA 2008, Venice, Italia, 10-13 novembre 2008.

Baltzer A., **Goubert E.**, Mokeddem Z., Lartaud F., Fournier J., Bourrillet J.F., 2009. Correlation of a characteristic reflecto to a Turritella layer in two lochs of Scotland and in a Bay in south Brittany. 2nd International Workshop on Fjord environments : Past, Present and Future, 7-8 May 2009, Bergen, Norvège.

Mokeddem Z., Baltzer A., **Goubert E.**, Clet-Pellerin M., 2010. Multiproxy reconstruction of palaeoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in a fjord environment : Loch Sunart (NW Scotland). From: Howe, J. A., Austin, W. E. N., Forwick, M. & Paetzel, M. (eds) Fjord Systems and Archives. Geological Society, London, Special Publications, 344, 341-355.

Baltzer A., Mokeddem Z., **Goubert E.**, Lartaud F., Labourdette N., Fournier J., Bourrillet J.F., 2015. The "Turritella Layer": A Potential Proxy of a Drastic Holocene Environmental Change on the North-East Atlantic Coast. Sediment Fluxes in Coastal Areas, Coastal Research Livrary, 10, 3-21.

---

## **IV. Études intégrées : dynamique hydromorphosédimentaire, foraminifères actuels, reconstitutions paléoenvironnementales et activités humaines**

Trois sites ont été l'objet d'approches couplées : le Golfe du Morbihan, le système baie/estuaire de la Vilaine et la Baie de Quiberon. Ces études intégrées ont été abordées à différentes échelles temporelles et spatiales aussi bien pour les approches actuelles et paléoenvironnementales que pour les études croisant les activités humaines et les fonctionnements des environnements littoraux. Parmi les études, celles des teneurs en éléments traces métalliques des sédiments de surface constituent une sous-partie spécifique de cette partie IV.

### ***IV.1. Les relations entre les activités humaines et les environnements littoraux***

#### ***IV.1.a. Des systèmes naturels vers des anthroposystèmes***

Le développement des activités humaines, qu'elles soient en domaine continental ou littoral, a très rapidement un impact sur le fonctionnement des environnements littoraux. Dès la sédentarisation de l'Homme, l'aménagement du territoire modifie la quantité et la qualité des flux d'eau et des flux sédimentaires : déforestation et lessivage des sols, barrage sur les rivières et les fleuves, développement de l'agriculture, de l'élevage, de la pisciculture, des industries, de l'urbanisation, de l'usage des eaux courantes pour le refroidissement dans les processus industriels, des rejets urbains, agricoles, industriels... Depuis la sédentarisation de l'Homme les transferts continent-océan ont évolué d'un forçage naturel vers un forçage complexe naturel/anthropique, de l'Holocène vers un Anthropocène (Crutzen & Stoermer, 2000 ; Meybeck & Vörösmarty, 2005). Les systèmes littoraux ont donc évolué progressivement vers des anthroposystèmes.

En terme de quantité, globalement les flux d'eau et les flux sédimentaire ont baissé à l'échelle des grands bassins versants (Vörösmarty et al., 2003 ; Walling & Fang, 2003 ; Walling, 2006). En terme de qualité des masses d'eau, il est évident qu'actuellement, de nombreux contaminants sont drainés vers les littoraux : éléments traces métalliques, matières organiques et nutriments, biocides, bactéries... (Grobois et al., 2012). Pour les sédiments, les fractions grossières sont principalement piégées dans les différentes retenues et arrivent peu ou pas au niveau des estuaires. Pour les fractions fines, les apports dépendent de l'intensité des lessivages des sols et des débits. La principale conséquence sur les littoraux a été l'apport de fractions fines qui constituent des drapages vaseux dont les âges s'étendent à l'échelle du globe de 8 000 ans BP à 1 000 ap. JC en fonction des différentes phases de sédentarisation et de déforestation (Menier et al., 2010 ; Poirier, 2010 ; Poirier et al., 2011).

#### ***IV.1.b. Les différentes études menées sur le littoral morbihannais***

Les systèmes littoraux morbihannais sont donc sous l'influence de différents forçages « naturels » et anthropiques en fonction des activités humaines développées sur ce territoire et des enjeux socio-économiques. Parmi les différents enjeux, certains ont été abordés dans différentes études que j'ai pu mener depuis 2001 (rappel Figure 4).

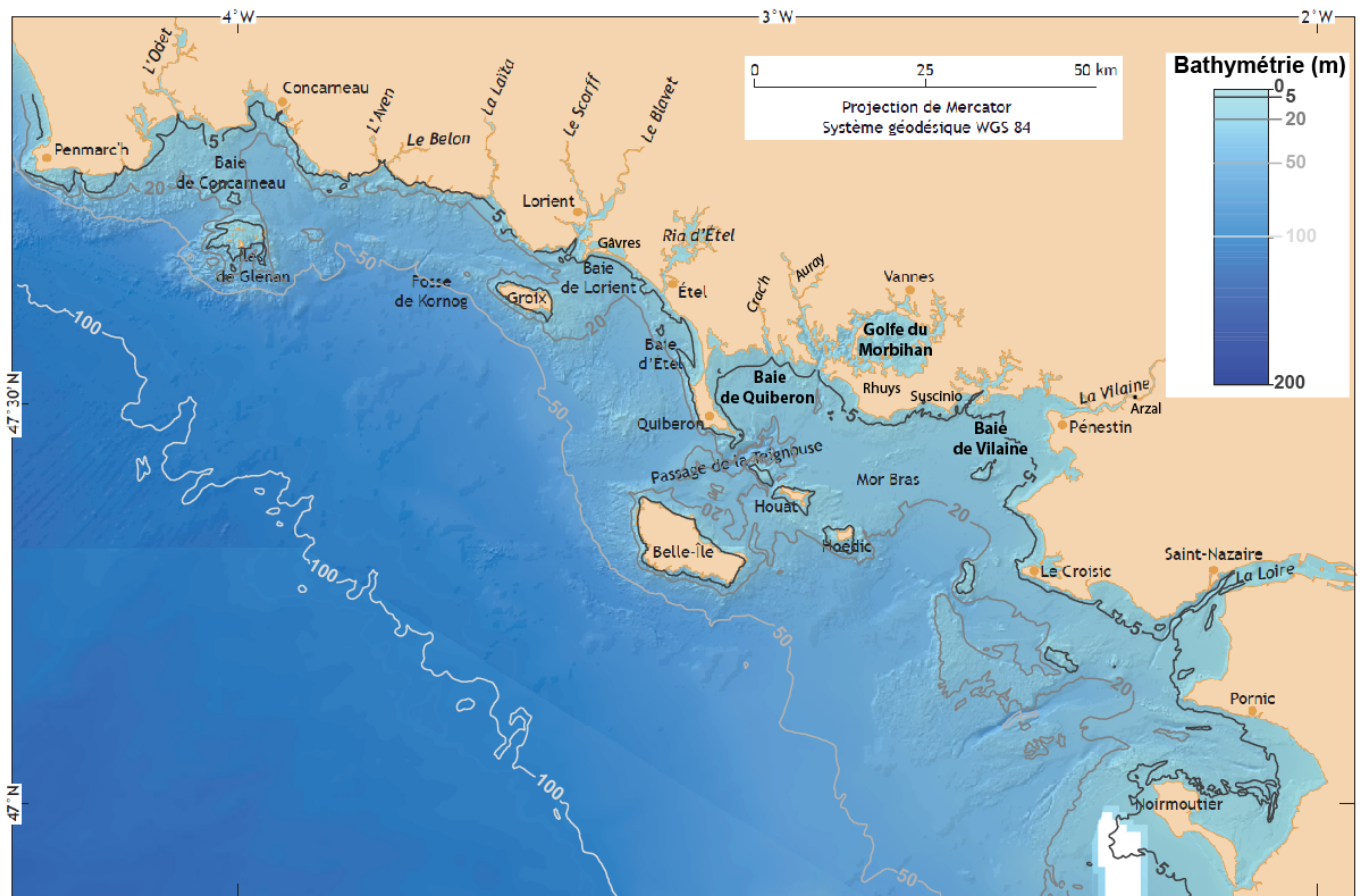
- ✓ L'envasement de l'estuaire de la Vilaine (barrage d'Arzal).
- ✓ La conchyliculture : impact des activités ostréicoles sur la biodiversité des foraminifères benthiques, mortalités des huîtres, impact de la culture des moules sur la dynamique sédimentaire, disparition des gisements de palourdes.
- ✓ Les teneurs en éléments traces métalliques des sédiments des ports et des environnements littoraux morbihannais (rivières, Golfe du Morbihan et Baie de Quiberon).
- ✓ La qualité bactériologique des zones conchylicoles : cas d'un gisement de palourdes.

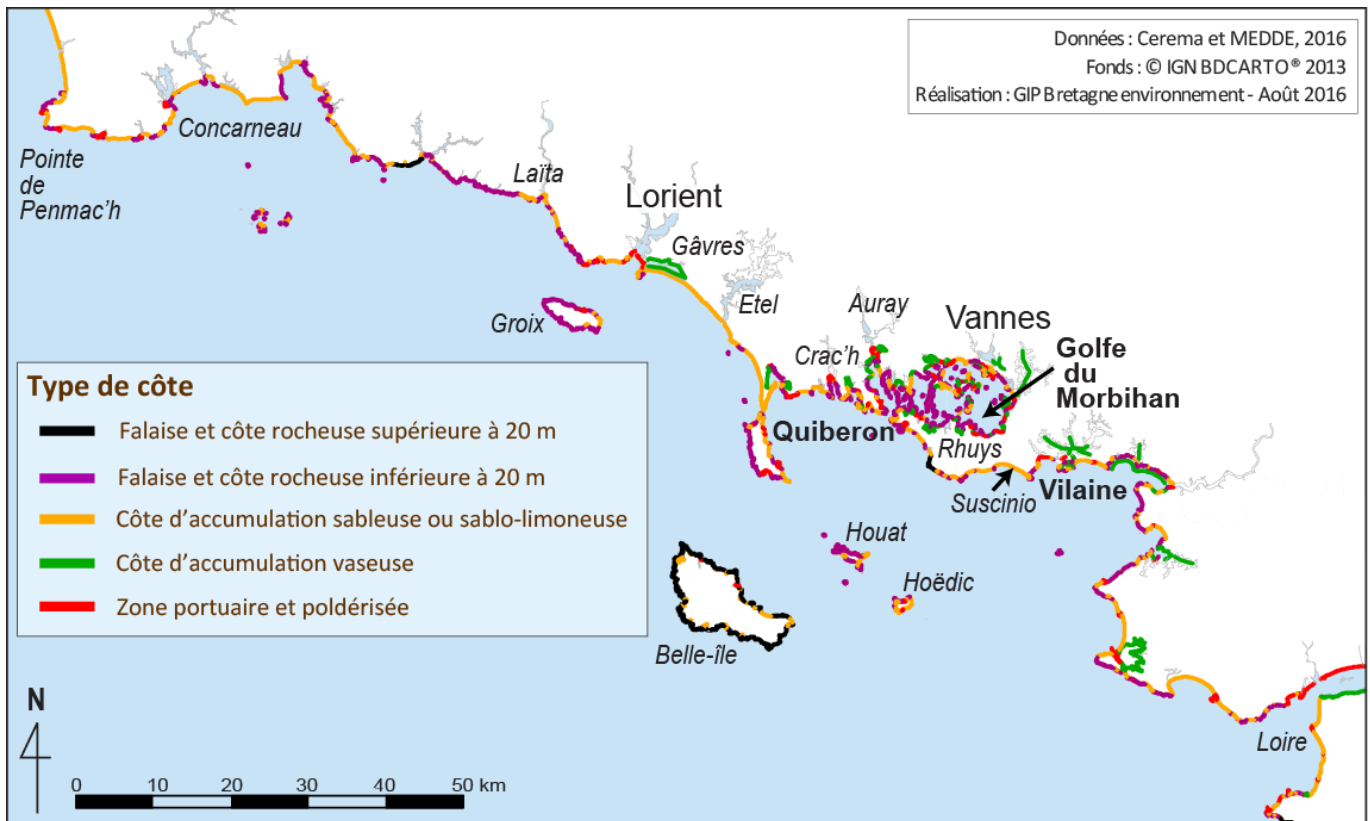


## IV.2. Présentation générale de la Bretagne Sud

### IV.2.a. Les caractéristiques géographiques, géologiques et morphostructurales

Le littoral sud-breton, de la pointe de Penmac'h à l'estuaire de la Loire, est caractérisé par une grande variété de morphologies littorales (Figure 40 et Figure 41). L'orientation de la côte varie progressivement d'Ouest/Est à la Pointe de Penmac'h à Nord/Sud en s'approchant de l'estuaire de la Loire. Entre ces deux extrêmes, l'orientation varie localement en fonction des différentes spécificités : des baies (Concarneau, Quiberon et Vilaine), des îles (Groix, Belle-Île, Houat, Hoëdic), la presqu'île de Quiberon et son isthme, des rias (La Laita, Etel, Crac'h, Auray...), des côtes à falaises et à plages de poche (Presqu'île de Rhuys), des côtes basses à longues plages et cordons dunaires (système de Gâvres-Quiberon, Suscinio), des estrans vaseux (Petite Mer de Gâvres), l'estuaire de la Vilaine et enfin le système estuarien complexe du Golfe du Morbihan (Figure 40 et Figure 41).





**Figure 41. La Bretagne Sud et les différents types de côtes (modifiée d'après, <http://www.bretagne-environnement.org/>, synthèse de 2016).**

Cette diversité morphologique provient principalement d'un héritage géologique et structural couplé avec le niveau marin caractéristique de l'interglaciaire holocène. Le soubassement appartient au domaine du Massif-Armoricain qui correspond à une entité géologique marquée par l'orogénèse varisque caractérisée par la formation de la chaîne hercynienne (Annexe 3). Le sous-sol est ainsi constitué de roches variées (sédimentaires, métamorphiques et magmatiques) avec une structuration donnée par des failles d'orientations diverses, dont celle du cisaillement sud-armoricain d'Ouest/Est à Nord-Ouest/Sud-Est (de la pointe du Raz à Nantes) et les orientations conjuguées (NNO/SSE et NNE/SSO).

#### IV.2.b. Les facteurs forçants hydrométéorologiques

L'ensemble du littoral est soumis à un climat tempéré océanique avec des normales de températures de 12°C (moyenne 1971-2000), des normales de précipitations de 800 mm (moyennes 1971-2000) et des vents dominants du secteur Ouest au large (Groix et Belle-Île, Figure 42) et s'orientant localement vers le secteur Ouest-Sud-Ouest à proximité des côtes (Baie de Quiberon et estuaire de la Vilaine, Figure 42).

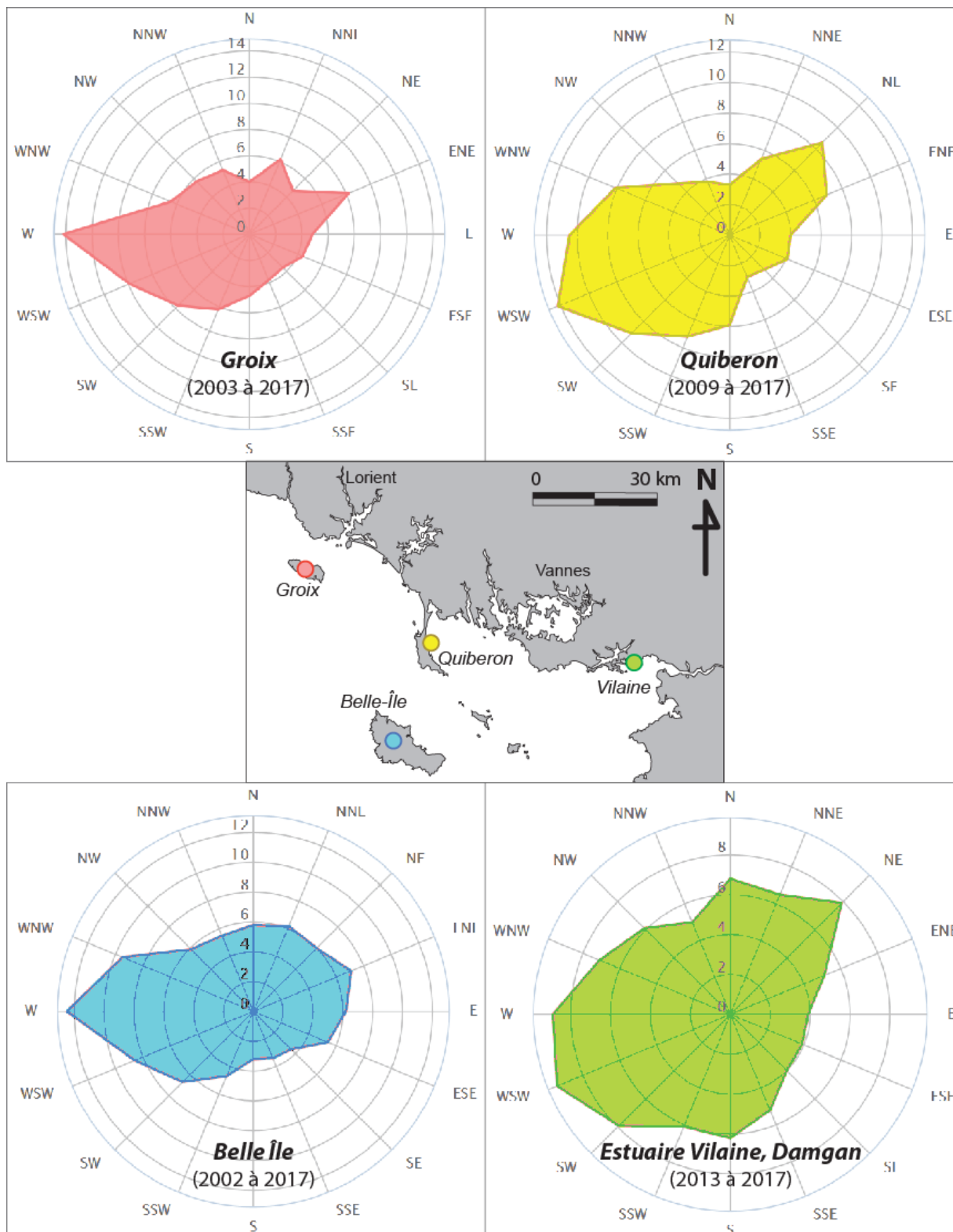


Figure 42. Roses des vents (%) pour Groix, Belle-Île, Quiberon et Estuaire de la Vilaine (d'après les données de Météo France et modifiées d'après les illustrations de Windfinder.com).

Globalement, tout le littoral est en régime mésotidal avec des houles au large d'Ouest à Sud-Ouest en fonction des vents dominants. Les côtes, de la Pointe de Penmarc'h à l'Ouest de la presqu'île de Quiberon, sont directement soumises aux houles du large, sauf la zone protégée par l'île de Groix. En revanche pour la côte située à l'Est de Quiberon, les houles du large sont amorties et/ou les orientations sont modifiées par la présence des îles et des hauts fonds de l'arc passant par la presqu'île de Quiberon, les îles de Houat et Hoëdic et le haut-fond du plateau du Four. Dans ce contexte le Golfe du Morbihan n'est pas soumis à la houle, mais directement sous l'influence du vent avec la formation de clapot et de mer de vent.

#### IV.2.c. Les grandes caractéristiques morphobathymétriques et sédimentologiques du plateau continental sud-breton

Le plateau continental sud-armoricain, à moins de 50 km de la côte, présente une morphobathymétrie caractérisée par la présence de hauts-fonds rocheux et d'îles entourées de dépôts graveleux (Figure 43).

Au large des hauts-fonds des îles de Glénan et de Groix et à une profondeur entre 100 et 60 m, la couverture sédimentaire est principalement vaseuse : cette vaseuse appartient aux « Grandes vaseuses » présentes sur la partie externe du plateau continental du Golfe de Gascogne (Jouanneau et al., 1999). Ces dépôts sont vraisemblablement des reliques des dépôts vaseux subtidaux/intertidaux lorsque le niveau marin était à environ - 70 m il y a environ 14 000 ans. Depuis la fin de la remontée du niveau marin, il y a environ 4 000 ans, ces dépôts vaseux ont été préservés (Menier et al., 2014 ; Annexe 4 et Annexe 5).

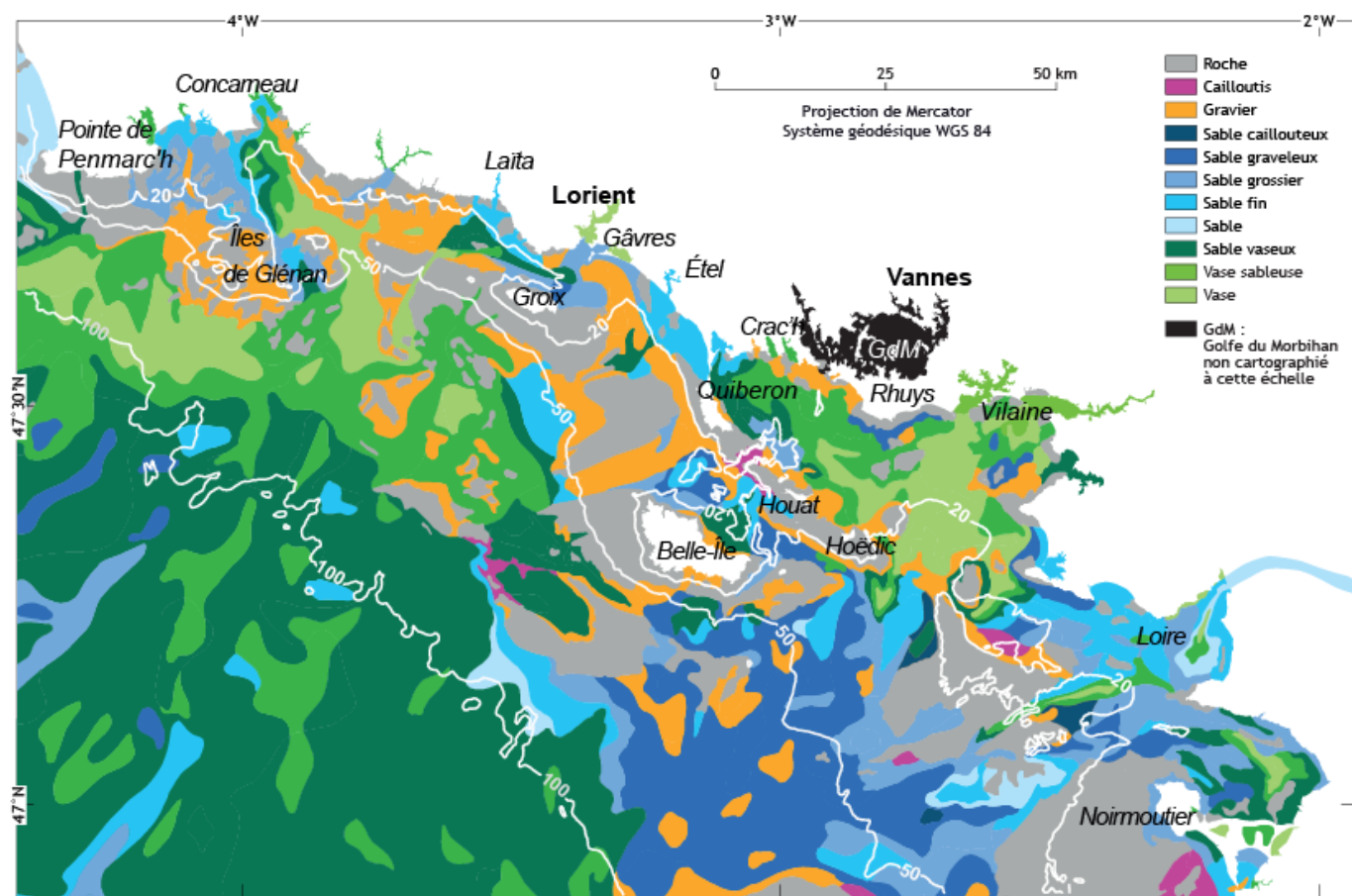


Figure 43. Répartition des sédiments superficiels sur le plateau continental sud-armoricain (Lesueur & Klingebiel, 1986) modifiée d'après (Menier et al., 2014).

---

Au large des hauts-fonds allant de Belle-Île à Noirmoutier, c'est-à-dire au large du système Quiberon/Vilaine/Loire, la couverture sédimentaire est principalement sablo-graveleuse entre 100 et 30 m de profondeur. Les dépôts actuels de ce secteur traduisent un niveau élevé d'énergie ne permettant pas le dépôt de sédiments fins. L'installation de ce régime doit remonter à la période entre 14 000 ans, encore en domaine continental et 9 000 ans, domaine subtidal proche sous l'influence vraisemblable des débits liquides et solides importants de la Loire à cette époque (Arthuis et al., 2015 ; Annexe 4 et Annexe 5).

Sur l'ensemble du littoral sud-armoricain, entre 9 000 ans (niveau marin à - 30 m) et aujourd'hui, les hauts-fonds ont été progressivement submergés, permettant l'installation de systèmes protégés de l'agitation. Ainsi actuellement, entre la bande des îles/hauts-fonds rocheux et la côte, les fonds peu profonds de 30 m maximum, sont caractérisés par la présence de sédiments allant du sable grossier à de la vase et par l'individualisation de quatre secteurs particuliers (Figure 41, Figure 43) :

(1) Les côtes allant de Penmar'ch à Quiberon sont plutôt caractérisées par des falaises, par deux grands cordons dunaires et des dépôts sédimentaires graveleux. Au large, les sédiments sont soit absents, soit sablo-graveleux, à l'exception de la partie centrale de la Baie de Concarneau et le Nord de l'île de Groix où des placages vaseux sont observés. Les fleuves de ce secteur sont des fleuves côtiers à bassins versants réduits. Les grands cordons dunaires isolent des environnements protégés (les étangs rétrolittoraux de Lorient et la Petite Mer de Gâvres) et constituent l'isthme de Penthièvre qui relie l'Île de Quiberon au continent (Pian, 2010).

(2) Les côtes de Quiberon au Croisic (système Quiberon/Vilaine) sont caractérisées par des morphologies basses à cordons sableux et dunes littorales encadrant l'estuaire de la Vilaine et s'ouvrant sur des fonds principalement sablo-vaseux. Ce système Quiberon/Vilaine est caractérisé par une sédimentation beaucoup plus fine que pour le reste du domaine, par des hauts-fonds qui brisent en partie l'énergie de la houle et par les apports principalement liquides et dissous de la Vilaine (Crave, 2009).

(3) Du Croisic à Pornic, la sédimentation est plutôt sableuse sous le contrôle de la dynamique estuarienne de la Loire.

(4) Le Golfe du Morbihan est un système estuarien complexe à sédimentation variée (Menier et al., 2011 ; Augier et al., 2011).

#### IV.2.d. Les activités humaines

L'ensemble de ces domaines littoraux héberge différentes activités humaines dont les implantations dépendent des environnements. Ces activités peuvent en retour entraîner des modifications qualitatives et quantitatives du fonctionnement bio/hydromorphosédimentaire de ces milieux.

- **L'urbanisation et le tourisme**

Les principales conséquences de l'urbanisation et du développement du tourisme s'observent au niveau de la qualité bactériologique des eaux littorales, avec des contaminations fréquentes par *Escherichia coli* provenant des réseaux d'assainissement collectifs (station d'épuration, pompes de relevage) ou individuels.

- **L'agriculture littorale**

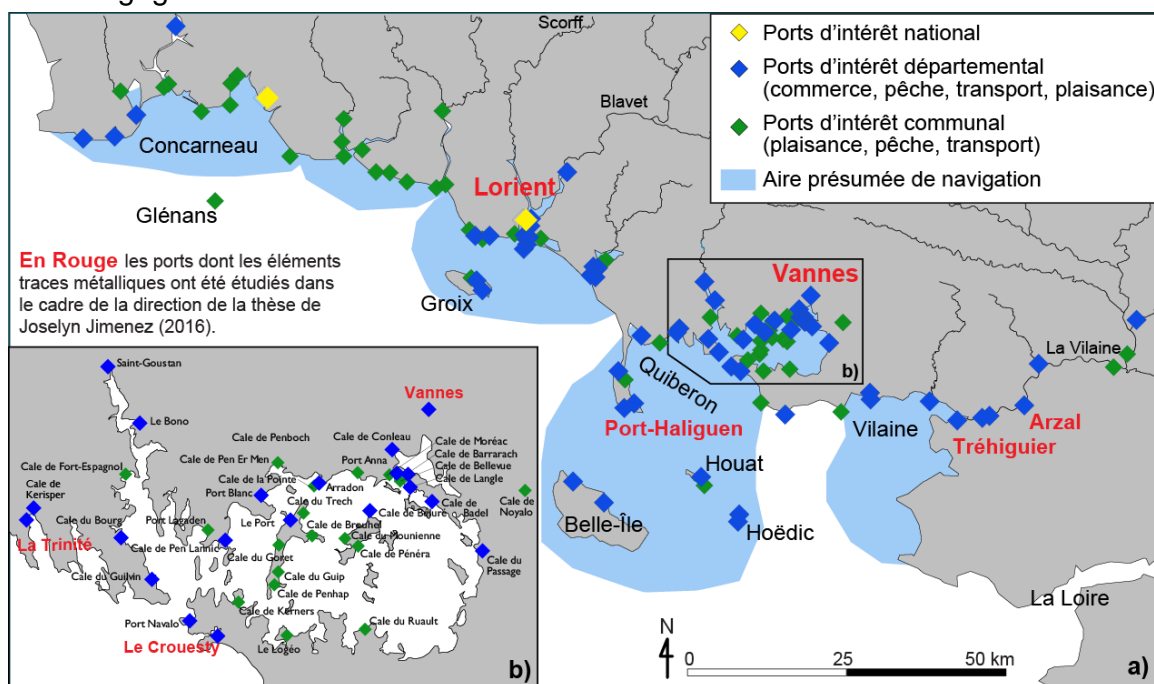
Les activités agricoles sur le littoral de Bretagne Sud sont principalement du polyélevage (herbivores, bovins pour le lait et la viande, porcs et aviculture) et des cultures de céréales, d'oléoprotéagineux, de légumes et de fruits. Depuis 30 ans, les sols agricoles morbihannais sont de moins en moins riches en matières organiques en raison des différentes modifications des pratiques agricoles. Cette baisse des teneurs en matières organiques modifie leurs capacités à stocker les nutriments et à dégrader les polluants. Ainsi en Bretagne, il existe des accumulations d'azote ainsi que de cuivre et de zinc dans les sols agricoles qui seront facilement remobilisées par l'érosion (Atlas de l'Environnement du Morbihan, 2010). De plus, les élevages peuvent provoquer des contaminations bactériologiques des eaux littorales.

- **Les carrières et les mines**

Dans le Morbihan, il existe 66 carrières autorisées qui peuvent apporter des polluants dans les eaux, provoquer des concentrations élevées en matières en suspension, en sulfures et en éléments traces métalliques (ETMs). Concernant les mines, il n'y a pas d'exploitation minière actuellement en activité dans le Morbihan. Mais, les 27 anciennes exploitations sont malgré tout encore actuellement sources de pollution, d'autant plus que certaines sont très proches du littoral. Les principaux éléments métalliques identifiés au niveau des exploitations minières sont l'uranium, le plomb, le zinc, le cuivre, le fer, l'aluminium, l'étain et le tungstène (Atlas de l'environnement du Morbihan, 2010).

- **Les zones portuaires**

En Bretagne Sud, les infrastructures portuaires maritimes sont très nombreuses et elles couvrent différentes activités (Figure 44) : le commerce, la pêche, le transport de passagers et la plaisance. Tous ces zones portuaires peuvent constituer des sources ponctuelles de perturbation par le rejet dans le système côtier d'hydrocarbures et d'éléments traces métalliques (ETMs). De plus, ces ports étant des zones abritées, les taux de sédimentation parfois importants conduisent à la nécessité de réaliser des dragages.



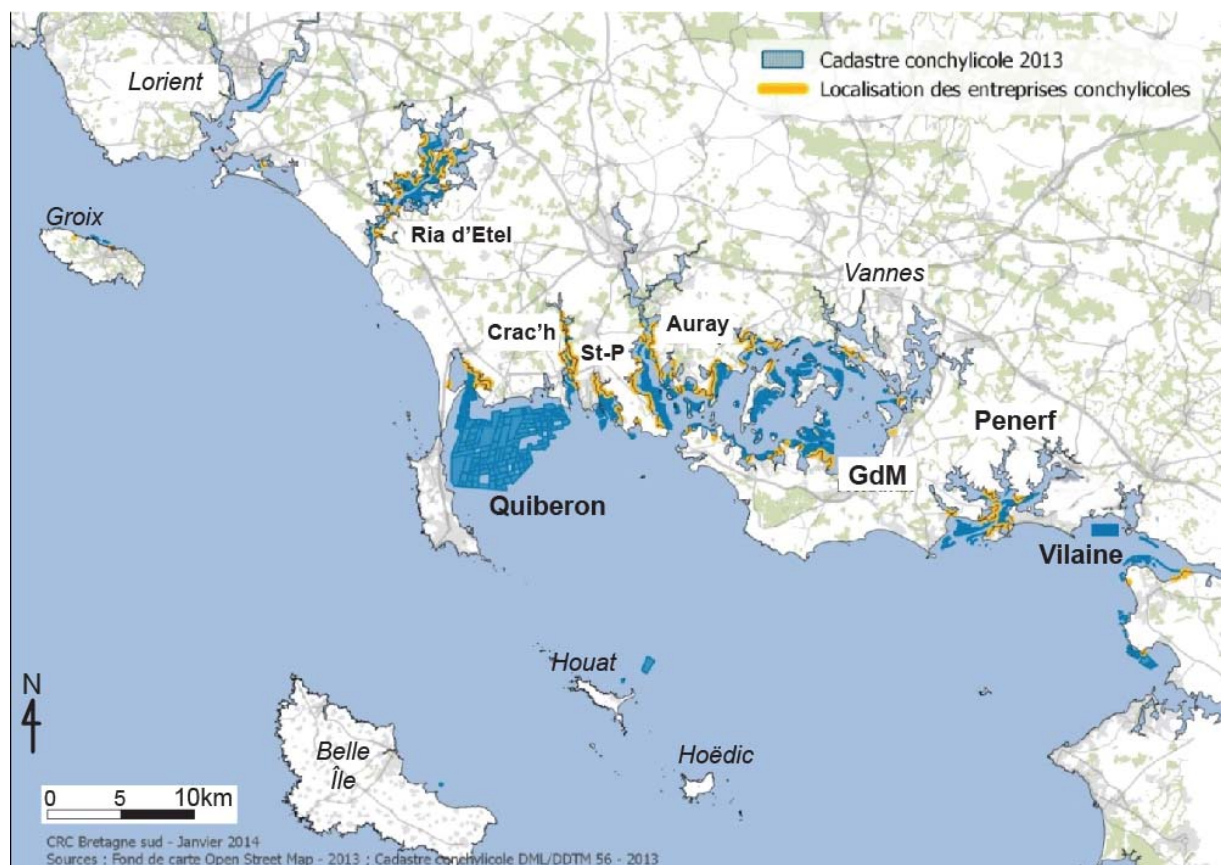
**Figure 44. Les ports de Bretagne Sud (modifié d'après GIP Bretagne Environnement, Sonnic, 2015). a) De Concarneau à la Vilaine, b) Le Golfe du Morbihan.**

- **Les zones conchyloles**

En Bretagne Sud, la conchyliculture est principalement présente dans le département du Morbihan. Différentes pratiques conchyloles se répartissent sur ce littoral morbihannais (Tableau 3 et Figure 45). Le maintien de ces activités nécessite une bonne qualité environnementale, notamment dans les secteurs proches des zones urbanisées, agricoles et portuaires.

**Tableau 3. La conchyliculture dans le Morbihan : espèces et pratiques.**

Espèce	Secteur  Pratique	Ria d'Étel	Baie de Quiberon	Estuaire de Crac'h (port de la Trinité)	Estuaire de Saint-Philibert (St-P)	La rivière d'Auray	Le Golfe du Morbihan (GdM)	Estuaire de Pénerf	Estuaire de la Vilaine
		<i>Crassostrea gigas</i> (huîtres creuses)	Captage	X		X	X	X	X
	En poches ou à plat sur l'estran	X		X	X	X	X	X	
	À plat en eau profonde		X			X	X		
<i>Ostrea edulis</i> (huître plate)	Gisement naturel à plat en eau profonde		X				X	X	
<i>Mytilus edulis</i> (moule)	Captage et culture sur bouchots								X
<i>Cerastoderma edulis</i> (coque)	Gisement de naissain								X
	Culture à plat						X		
<i>Ruditapes</i> sp. (palourdes)	Gisement naturel						X		
	Culture à plat sur l'estran						X		X



**Figure 45. Cadastre conchylicole de 2013 (modifié d'après le Comité Régional de la Conchyliculture de Bretagne Sud, <http://www.huîtres-de-bretagne.com/>).**

---

### **IV.3. La baie et l'estuaire de la Vilaine de 8 000 ans à nos jours : synthèse, relevés et modélisations**

Les méthodes citées précédemment ont été appliquées au site de la baie et de l'estuaire de la Vilaine (rappel Figure 2, Figure 3 et Figure 4). Ce travail a débuté dans le cadre de ma thèse dans les années 1990, avec des prélèvements mensuels de sédiments superficiels pour l'étude des foraminifères benthiques vivants et pour l'étude des paramètres environnementaux (colonne d'eau, sédiments).

Puis à partir de 1998, des campagnes de relevés sismiques et de carottages ont été menées par le laboratoire afin de caractériser l'architecture et la chronologie du remplissage sédimentaire de la baie de Vilaine (Menier, 2004 ; Menier et al., 2010 ; Sorrel et al., 2010 ; Traini et al., 2013 ; Menier et al., 2014 ; Traini et al., 2015).

En parallèle, une étude sur la dynamique hydromorphosédimentaire récente a été menée à partir de l'exploitation des données bathymétriques de 1960 à 2013, de suivis altimétriques des vasières intertidales par Altus©NKE et des suivis hydrologiques pour aboutir à la modélisation hydrosédimentaire sous Mike©DHI.

Depuis 2012, trois études spécifiques ont été engagées sur la baie et l'estuaire de la Vilaine : (1) estimation de l'impact sur la sédimentation de l'implantation de bouchots pour la culture de moules, (2) influence des mélanges vase/sable sur la dynamique des plages et des zones intertidales de la baie de Vilaine et (3) caractérisation de l'eutrophisation en baie de Vilaine en relation avec la dynamique sédimentaire. Ces trois études ne sont pas présentées ici pour des raisons de confidentialité pour celles des bouchots et de travaux en cours pour la thèse d'Olivier Morio pour la deuxième étude (programme VASSAB du laboratoire, direction E. Goubert et co-direction M. Sedrati) et de Widya Ratmaya pour la troisième (programme DIETE d'Ifremer, direction P. Souchu).

#### IV.3.a. Les principales caractéristiques de l'estuaire de la Vilaine

La Vilaine présente un bassin versant de 10 000 km<sup>2</sup> qui draine les 2/3 de la Bretagne dont les bassins de Rennes et de Redon (Figure 46). La principale caractéristique du système baie-estuaire de la Vilaine est l'implantation de 1965 à 1970 du barrage d'Arzal à 8 km de l'embouchure, réduisant le volume oscillant et l'espace horizontal disponible pour la sédimentation estuarienne. En raison du régime méso à macrotidal, les 2/3 de la surface de l'estuaire correspondent à des vasières intertidales qui ont été occupées dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle par des bouchots pour la culture des moules (Figure 47).



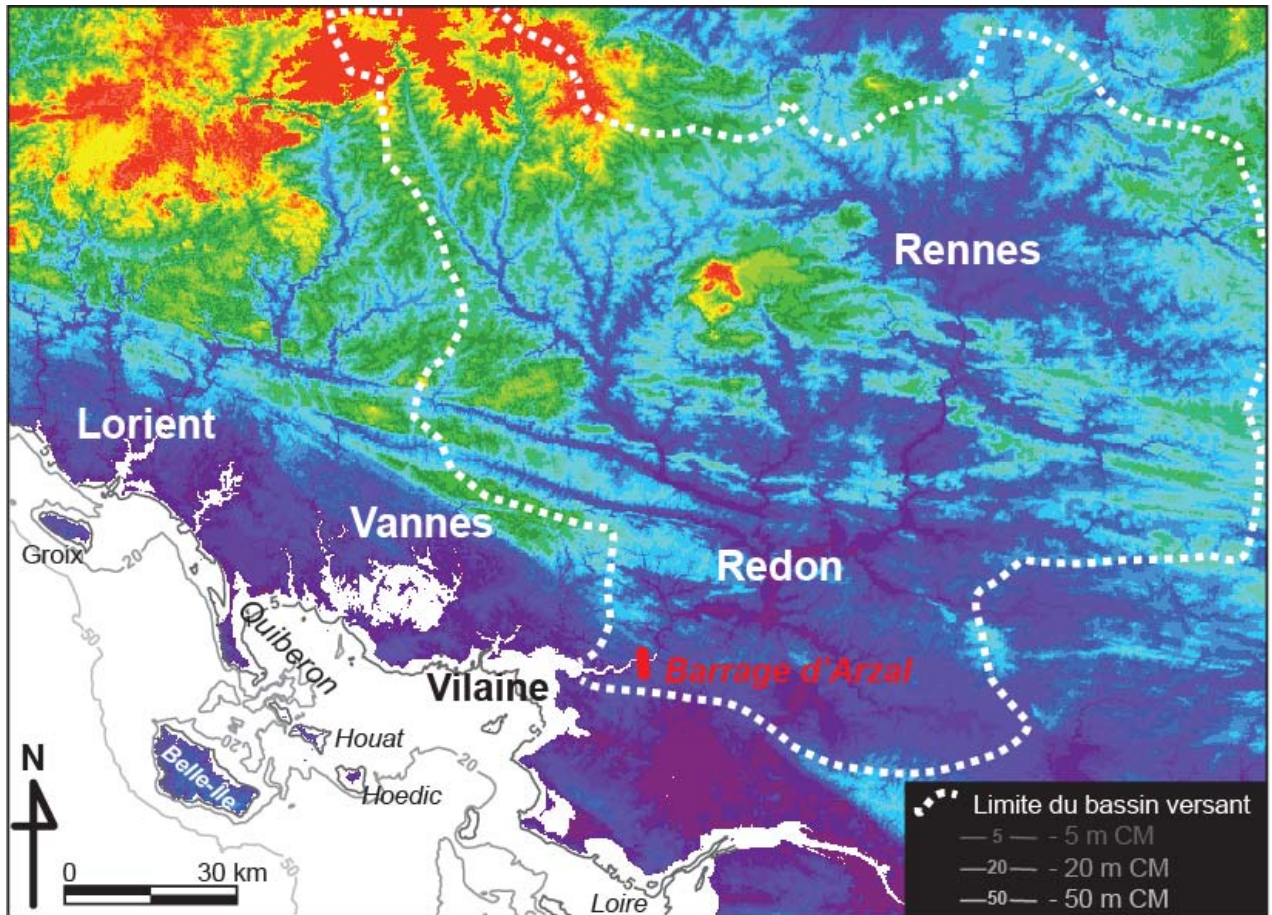


Figure 46. Le système baie / estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).

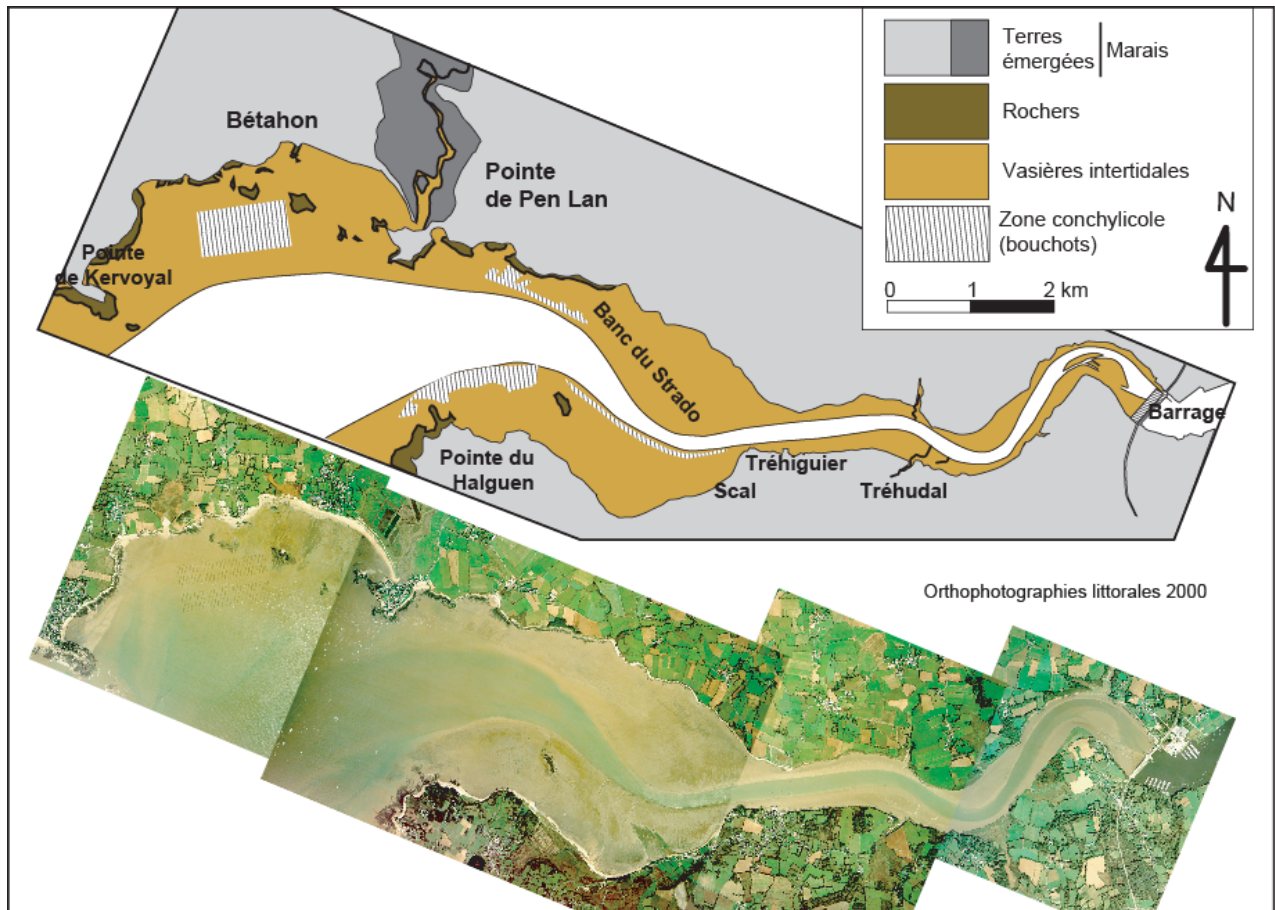


Figure 47. Caractéristiques physiographiques de l'estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).

L'estuaire de la Vilaine, d'une orientation globale Est-Ouest, est soumis aux actions de la houle, de l'agitation par les vents, de la marée et des débits sortant du barrage. Il s'agit d'un estuaire méso à macrotidal avec des marées semi-diurnes (cycle de 12h 25mn) avec une amplitude de 2,5 m en morte-eau à plus de 5 m en vive-eau.

La morphologie actuelle de cet estuaire est caractérisée d'Est en Ouest par (Figure 48) :

1. Le secteur amont, situé entre 8 km et 4 km de l'embouchure, comprenant un chenal méandrique, étroit et d'une profondeur de plus de -5 m CM, jusqu'au niveau de Tréhiguiier,
2. L'estuaire interne de l'amont du Banc du Strado aux pointes du Halguen et de Pen Lan. Cette zone est caractérisée par le Banc du Strado à +3 m CM et par un chenal dont la profondeur va en diminuant de -6 m à -1 m CM et dont la largeur augmente,
3. L'estuaire externe correspondant à un delta sous-marin très plat, de -1 m à -0,5 m CM dont la partie distale allant à -7 m CM est remaniée par la houle.

La morphologie générale de cet estuaire indique qu'il s'agit d'un domaine intermédiaire entre un « estuaire dominé par les vagues partiellement ouvert » et « estuaire dominé par la marée » (Dalrymple et al., 1992 ; Reison, 1992 ; Dalrymple & Choi, 2007).

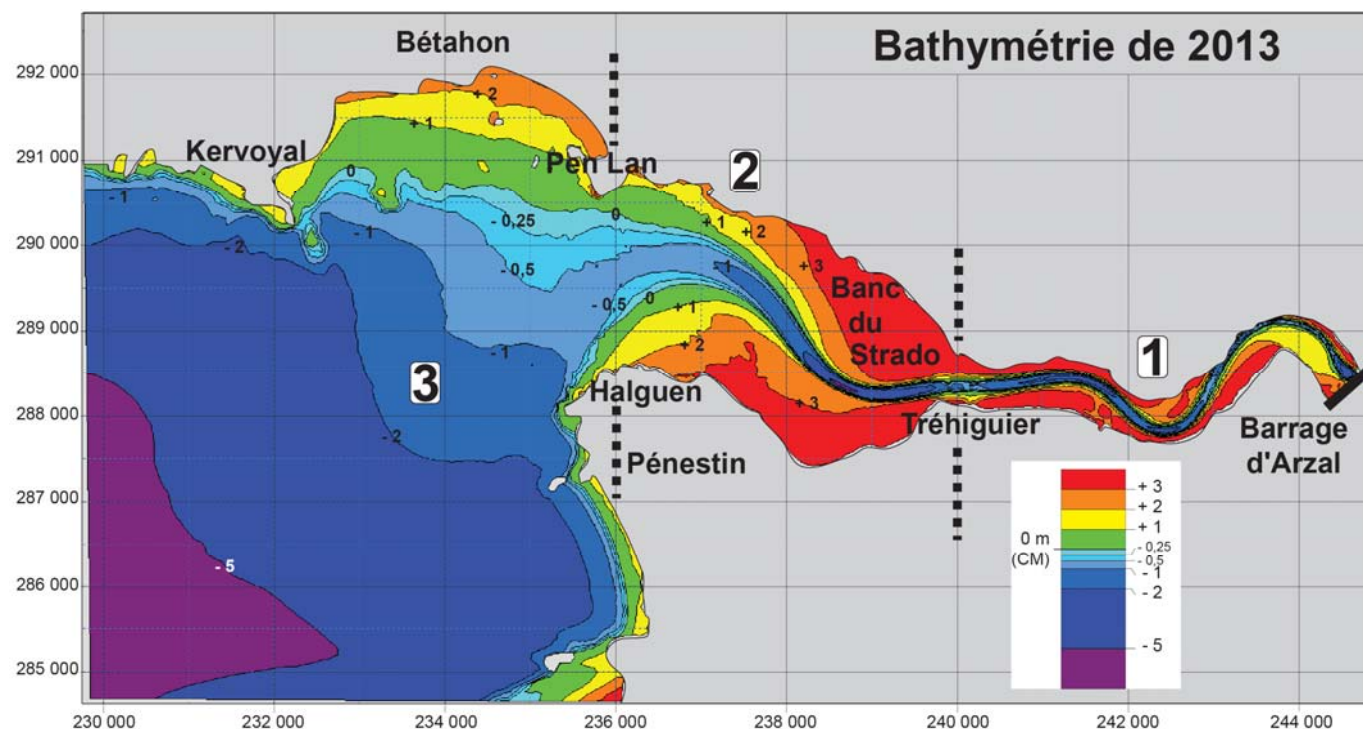


Figure 48. Bathymétrie de l'estuaire de la Vilaine en 2013 (Goubert, en prép.).

#### IV.3.b. La dynamique hydromorphosédimentaire depuis 1960 : des suivis aux modèles numériques

Différentes approches méthodologiques ont été utilisées afin de recueillir des données pour concevoir des modèles conceptuels du fonctionnement de l'estuaire de la Vilaine et pour calibrer et valider le modèle numérique hydrosédimentaire réalisé sous Mike© par DHI.

L'exploitation de 13 relevés bathymétriques de 1960 à 2013 a permis de caractériser la dynamique sédimentaire suite à l'implantation du barrage d'Arzal (construction de 1965 à 1970). Une hiérarchisation des facteurs forçants (vents, débits et marée) a pu être réalisée en fonction de l'état du comblement de l'estuaire.

De plus, les données de terrain, acquises de 1992 à 1996 dans le cadre de ma thèse, puis de 2007 à 2013 dans le cadre de contrats de recherche pour l'Institution d'Aménagement de la Vilaine (IAV) ont permis de caractériser certains phénomènes difficilement maîtrisables en modélisation numérique : les conséquences de certains événements extrêmes (crues, tempêtes), les phases de calme en été et la dynamique spécifique des vasières intertidales.

- **Évolution morphobathymétrique de l'estuaire de la Vilaine depuis 1960 à partir de l'analyse des relevés bathymétriques**

La comparaison entre le relevé bathymétrique de 1960 (Figure 49) et celui de 2013 (Figure 48) permet de quantifier et de qualifier le bilan sédimentaire (Figure 50) en terme d'épaisseurs et de volumes préservés dans différents secteurs de l'estuaire.

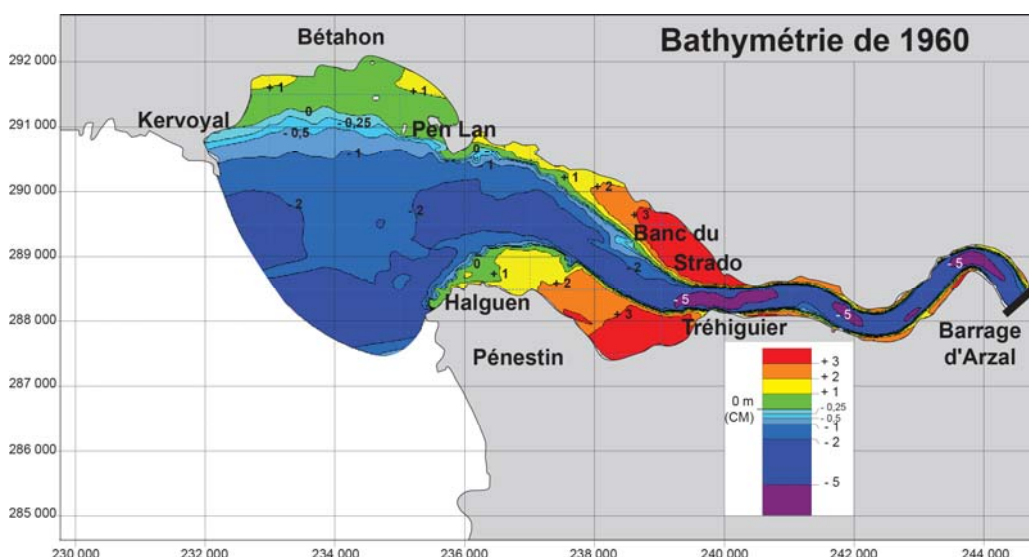


Figure 49. Bathymétrie de la Vilaine en 1960 (Goubert, en prép.).

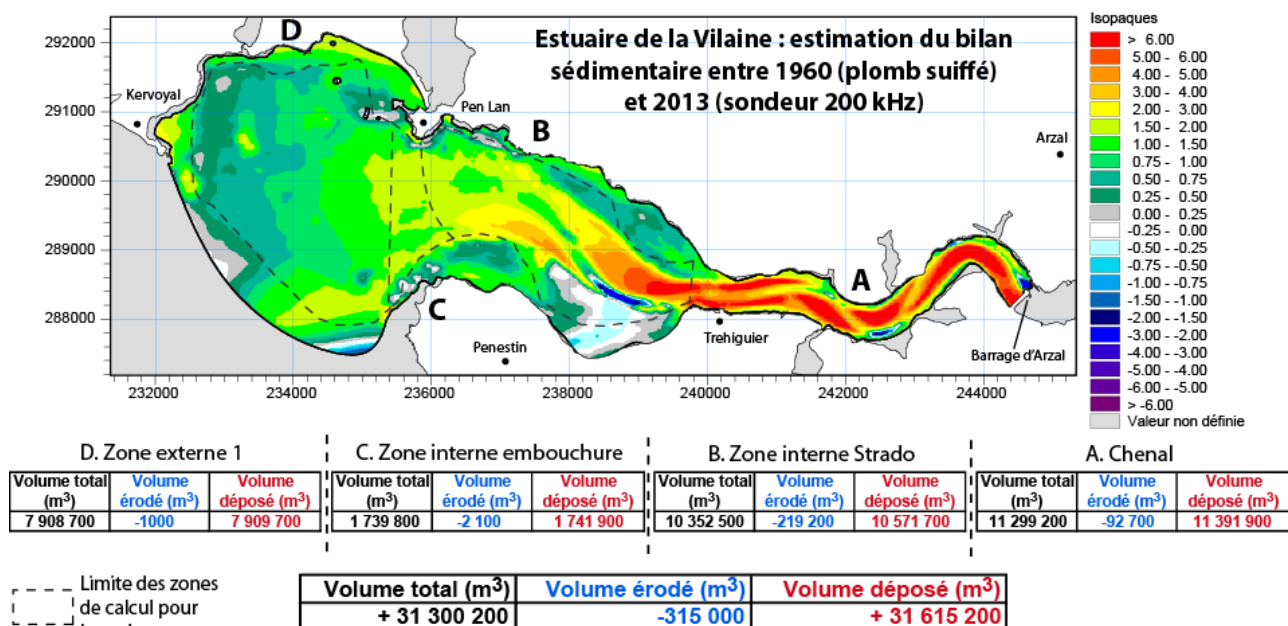
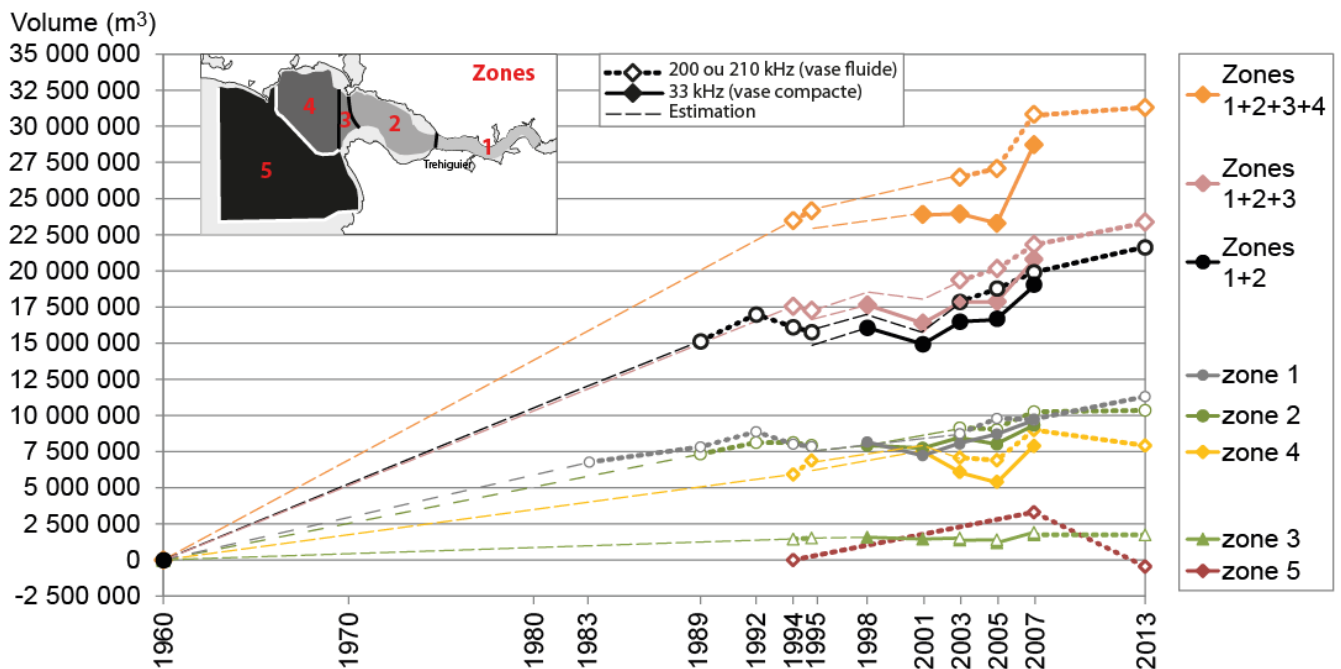


Figure 50. Bilan sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2013 (Goubert, en prép.).

Depuis 1960 environ 30 millions de m<sup>3</sup> (Gm<sup>3</sup>) de sédiments se sont déposés sur l'ensemble des 4 zones du barrage à la pointe de Kervoyal (Figure 51). Après un fort comblement jusqu'en 1992, l'estuaire de la Vilaine semblait avoir enregistré une période de stabilité jusqu'en 2003 avec des fluctuations qui avaient été interprétées par Goubert & Menier (2005) comme étant dues aux pouvoirs érosifs des différentes cures (1995) et tempêtes (1999, 2000). Entre 2003 et 2005, cette stabilité s'est maintenue, mais entre 2005 et 2007, un dépôt généralisé a été observé sur l'ensemble des 4 zones avec 3,7 Gm<sup>3</sup> estimés avec le sondeur 210 kHz et 5,4 Gm<sup>3</sup> au sondeur 33 kHz. Entre 2007 et 2013, le solde à 6 ans est globalement stable, avec un solde positif (1,4 Gm<sup>3</sup>) sur les trois zones internes de 1 à 3, mais un solde très fortement négatif pour les deux zones externes avec un bilan érosif de 4,8 Gm<sup>3</sup>.



**Figure 51. Évolution des soldes sédimentaires par zone depuis 1960 (Goubert & Le Gall, 2016).**  
*En pointillés fins : incertitude par l'absence de données bathymétriques entre 1960 et 1983, puis par les changements de fréquences d'acquisition (200 / 33 kHz). En petits pointillés gras : données obtenues en 200 kHz (sommets vase fluide). En trait plein gras : données obtenues en 33 kHz (sommets vase compactée).*

- **Synthèse de l'évolution morphobathymétrique de l'estuaire de la Vilaine en fonction des forçages météorologiques et hydrodynamiques**

Le croisement avec les forçages météorologiques (le vent, les tempêtes, les débits, les crues, l'indice NAO DJFM de décembre à mars) et hydrodynamiques (fréquence des coefficients de marée, houle au large) et les soldes sédimentaires par secteur permet d'identifier les grandes phases de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine (Figure 52, avec G = millions de m<sup>3</sup>).

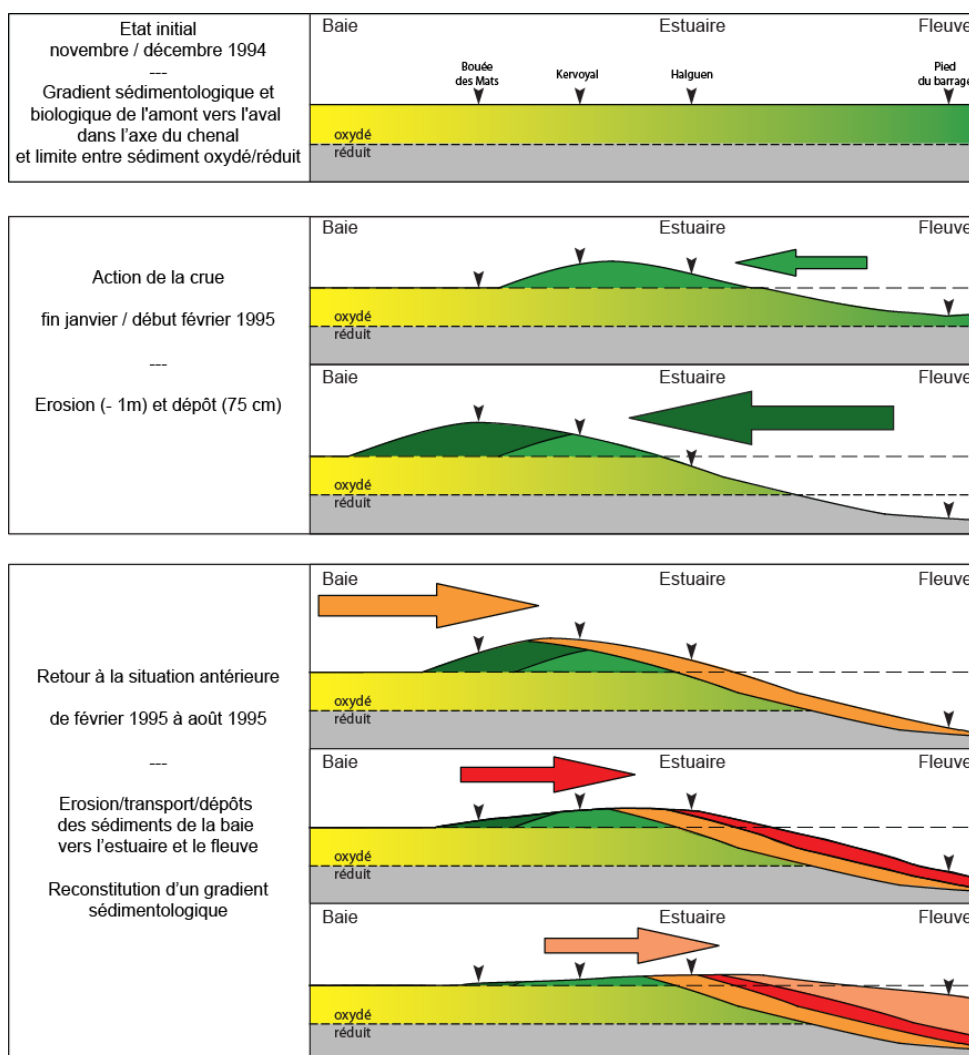
- ✓ De 1960 à 1992 : Phase de comblement
- ✓ De 1992 à 2005 : Phase d'alternances érosion/dépôt sous l'influence de différents paramètres énergétiques : forts débits/crue (hiver 1994 et hiver 1995 avec la crue centennale) ; nombreuses grandes marées et conjonction forte houle/marée ; tempêtes de fin 1999 (Lothar et Martin) et de fin 2000/début 2001 accompagnées par des crues
- ✓ Entre 2005 et 2007 : Comblement associé à des conditions de calme
- ✓ Entre 2007 et 2013 : « Stabilité long terme » équilibre entre érosion/dépôt



- **Modèle conceptuel des conséquences de la crue centennale de janvier 1995**

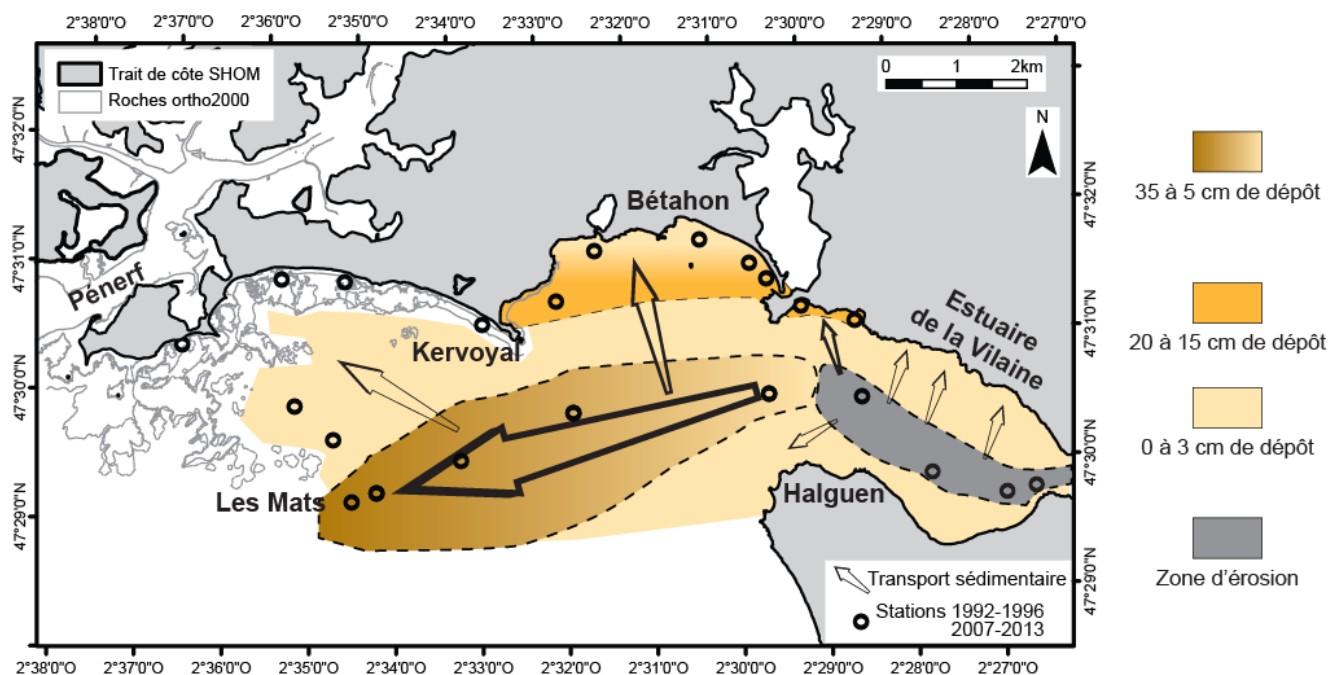
Au cours des suivis mensuels dans le cadre de mes travaux de thèse, l'occurrence de la crue centennale de janvier 1995 a permis de suivre l'impact direct sur l'équilibre morphosédimentaire de l'estuaire puis le retour à une situation morphosédimentaire d'équilibre (Figure 53). Ce modèle a été réalisé à partir de carottages sédimentaires de 75 cm de long, les analyses des teneurs en carbone organique et carbonates des fractions fines inférieures à 45  $\mu\text{m}$  et le suivi des populations de foraminifères benthiques.

À partir des relevés mensuels de population de foraminifères benthiques vivants dans les sédiments de l'estuaire de la Vilaine réalisés d'octobre 1992 à février 1996 (Goubert, 1997b), il a été possible de proposer un modèle de distribution en fonction des paramètres environnementaux et de leur fluctuation dans le temps. Les foraminifères benthiques, comme notamment les *Elphidium excavatum*, se développant dans les 5 à 15 premiers centimètres de sédiments, sont donc dans une niche écologique sensible à la dynamique hydrosédimentaire en termes d'érosion et de dépôt. Lors de la crue de janvier 1995, la niche écologique des foraminifères a donc été fortement affectée : soit disparition totale par érosion, soit enfouie sous 75 cm de vase fluide (Figure 53). À l'issue de la crue les sédiments superficiels étudiés étaient dépourvus de foraminifères vivants. Au cours des mois suivants, les embryons de foraminifères ont été progressivement réintroduits au fil des apports par les courants de marée montante qui ont également contribué au retour progressif du sédiment (Figure 53). Le scénario illustré de la recolonisation par les foraminifères est disponible en Annexe 6.



- **Modèle conceptuel des conséquences des tempêtes de mars 2007 et janvier 2013**

L'érosion de l'ensemble de la partie interne de l'estuaire s'observe dans le cas de crues extrêmes, comme en janvier 1995, ou en contexte de tempête, le plus souvent accompagnée de fort débits. Les dépôts associés à ces événements s'observent dans le prolongement du chenal estuarien ainsi que sur les plages de la côte Nord (Figure 54). Le reste de la zone peut présenter de faibles dépôts de vase fluide ne dépassant pas 3 cm d'épaisseur. Lors d'une tempête, les fractions fines sont remises en suspension sur l'ensemble de la baie et de l'estuaire. L'érosion à l'intérieur de l'estuaire peut être accentuée dans le cas de débits importants et de marées de vives eaux. Lors de la première période de calme après la tempête, en mortes eaux et à l'étalement de marée haute, les sédiments se déposent au niveau de la zone des Mats et sur les plages de la côte Nord.



**Figure 54. Dynamique sédimentaire une tempête de type mars 2007 ou janvier 2013.**

- **Modèle conceptuel de dynamique sédimentaire pendant un été**

En dehors des épisodes énergétiques de l'automne au printemps, il a été possible d'estimer la dynamique estivale à partir des données des années 1990 (Goubert, 1997b) et des données de pieux installés sur différentes plages de la côte Nord depuis 2003.

Si un été calme fait suite à un hiver avec des débits importants, la décantation progressive des matières en suspension va se traduire par des dépôts aussi bien au niveau des zones profondes qu'au niveau des estrans (Figure 55).

Si l'été est caractérisé par des coups de vent de secteur Sud à Sud-Ouest, les matières en suspension, déjà présentes suite à l'hiver ou bien les sédiments remis en suspension par ces coups de vent viendront se décanter au niveau des plages de la côte Nord de la baie et conduire à des dépôts de 30 cm de vase fluide (Figure 55).

Si l'été est calme et que les masses d'eau sont pauvres en matières en suspension, il sera possible d'observer des phénomènes de compaction des vases subtidales par diagenèse précoce et des vases intertidales par bioturbation et par dessiccation (Goubert, en prép.).

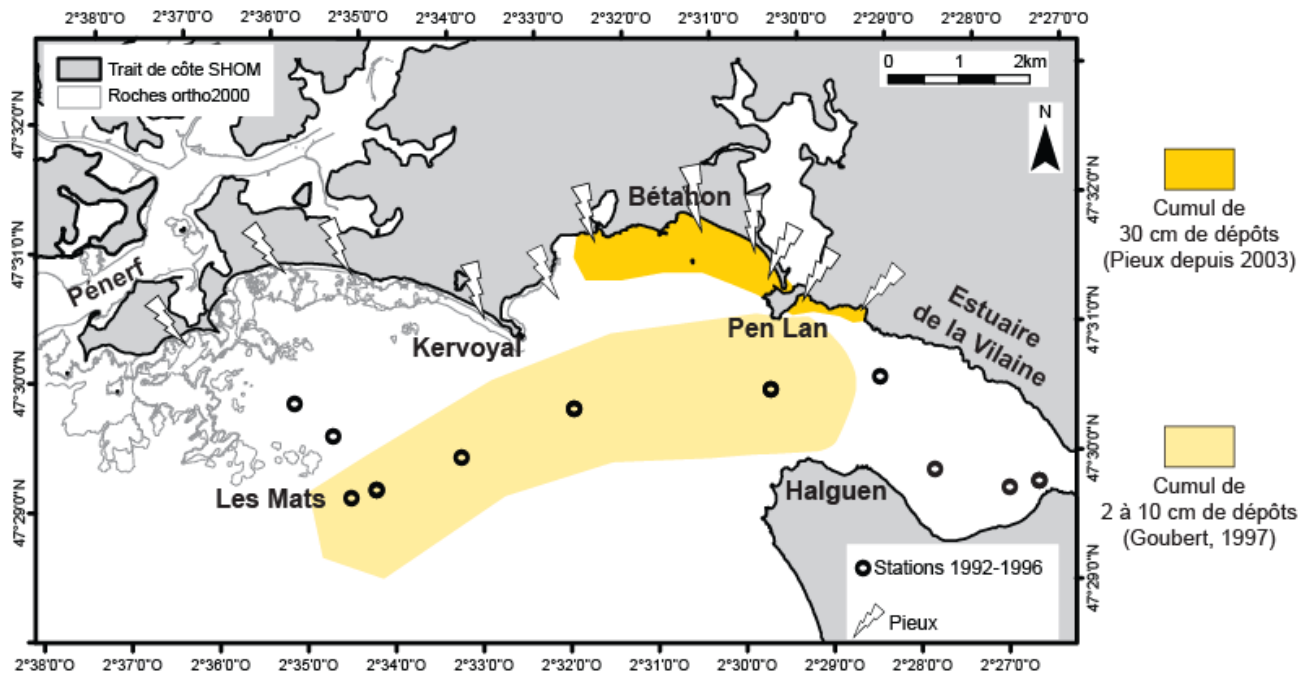


Figure 55. Bilan de la dynamique sédimentaire estivale de l'estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).

- **Le fonctionnement des vasières intertidales par altimétrie Altus©NKE**

Le croisement des variations altimétriques (Altus©NKE) de la vasière intertidale Nord (Banc du Strado, Figure 56) avec le suivi de paramètres hydrométéorologiques (Figure 57) a mis en évidence le rôle prépondérant du vent sur la dynamique des bancs de vases intertidaux. Un modèle conceptuel de dynamique des vasières intertidales de l'estuaire de la Vilaine est proposé en fonction des vitesses et de l'orientation du vent, des hauteurs significatives des vagues au-dessus de ces vasières, des débits de la Vilaine et des coefficients de marée (Figure 58).

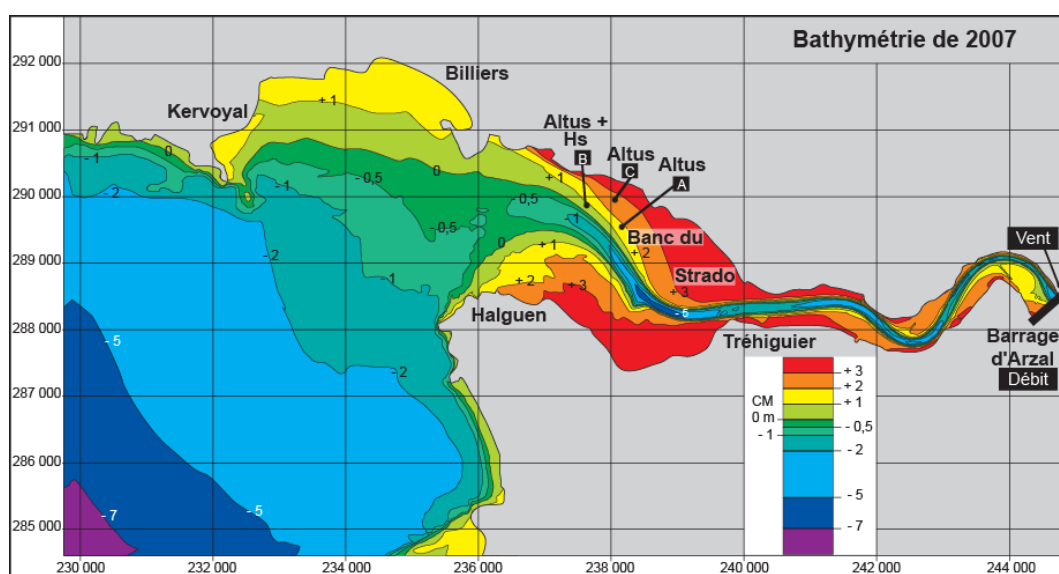
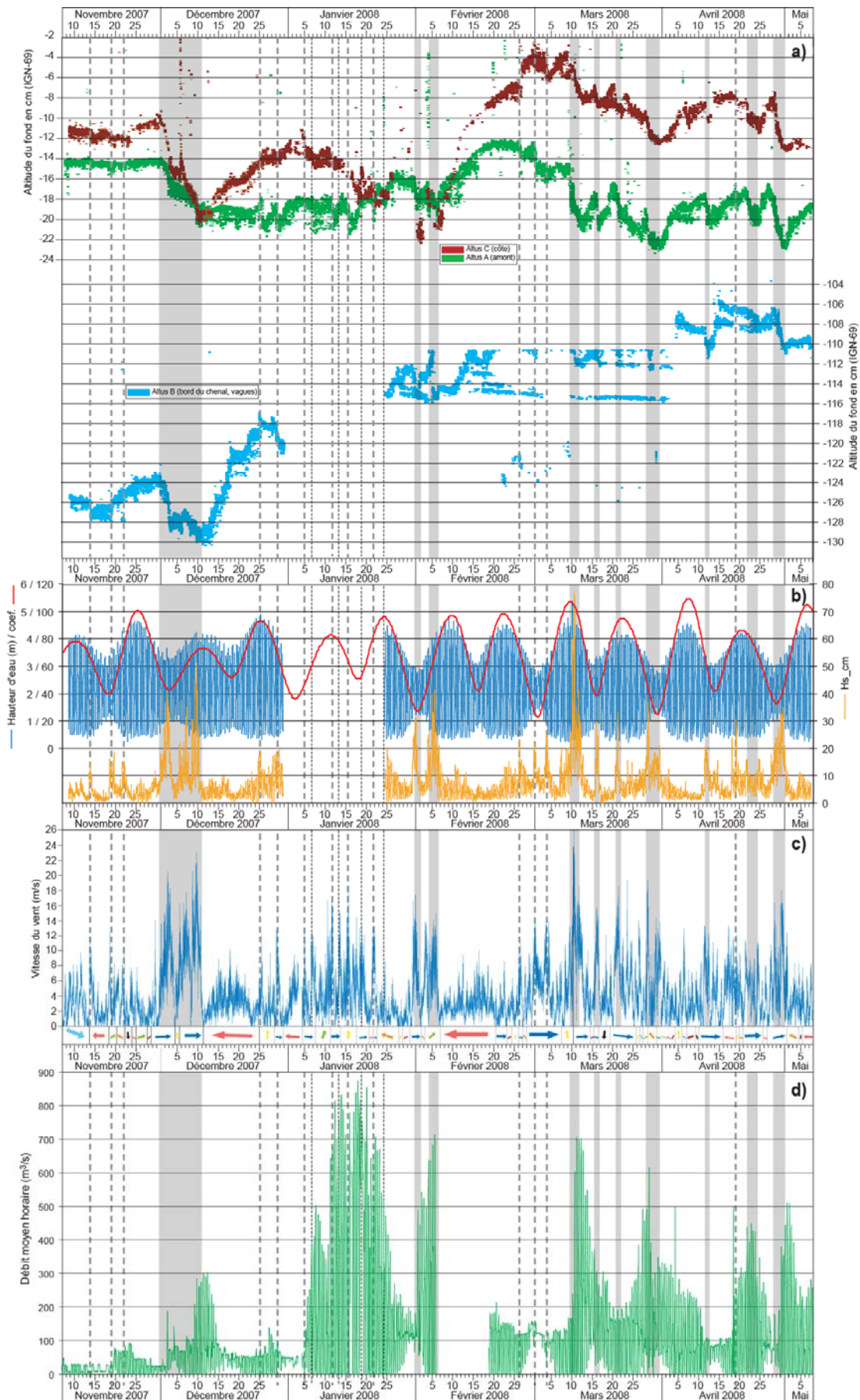


Figure 56. Localisation des Altus©NKE sur la vasière intertidale de l'estuaire de la Vilaine (d'après Goubert et al., 2010).





**Figure 57. Suivis hydrosédimentaires de l'estuaire de la Vilaine du 7 novembre 2007 au 4 avril 2008 (Goubert et al., 2010). a) altimétrie (Altus©NKE) ; b) coefficients de marée, hauteurs d'eau et hauteurs significatives des vagues (Hs) au niveau des Altus ; c) vitesses et sens du vent ; d) débits de la Vilaine (fond gris : phase d'érosion).**

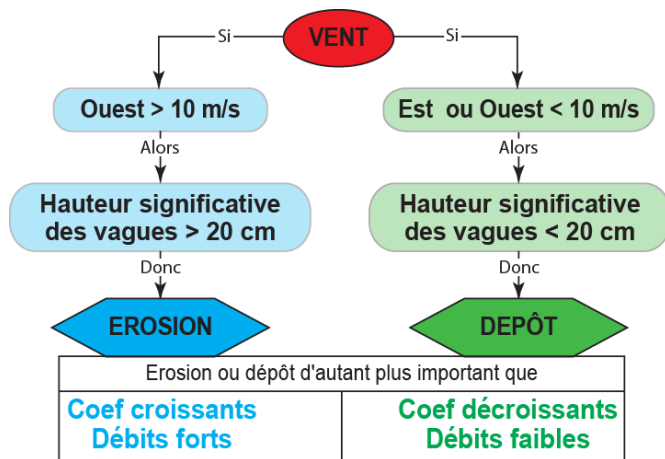


Figure 58. Modèle conceptuel des phases d'érosion et de dépôts au niveau de la vasière intertidale Nord de l'estuaire de la Vilaine (d'après Goubert et al., 2010).

- **Modélisation numérique hydrosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine**

Le modèle numérique a été réalisé sous Mike© par Caroline Tessier et Hans Jakob Vested de DHI. Les données précédentes ont été utilisées pour calibrer et valider le modèle.

Dans le cas de l'évolution altimétrique des vasières intertidales sur 5 mois, le modèle retranscrit la majorité des phases d'érosion et de dépôts mais en sous-estimant les épaisseurs (Figure 59). Il est fort probable que l'effet « état initial » avant un événement (bathymétrie précise, Figure 60), la résilience du système, les apports de matières en suspension aux frontières du modèle provenant de la baie externe difficilement modélisables conduisent à sous-estimer l'ampleur des érosions et des dépôts.

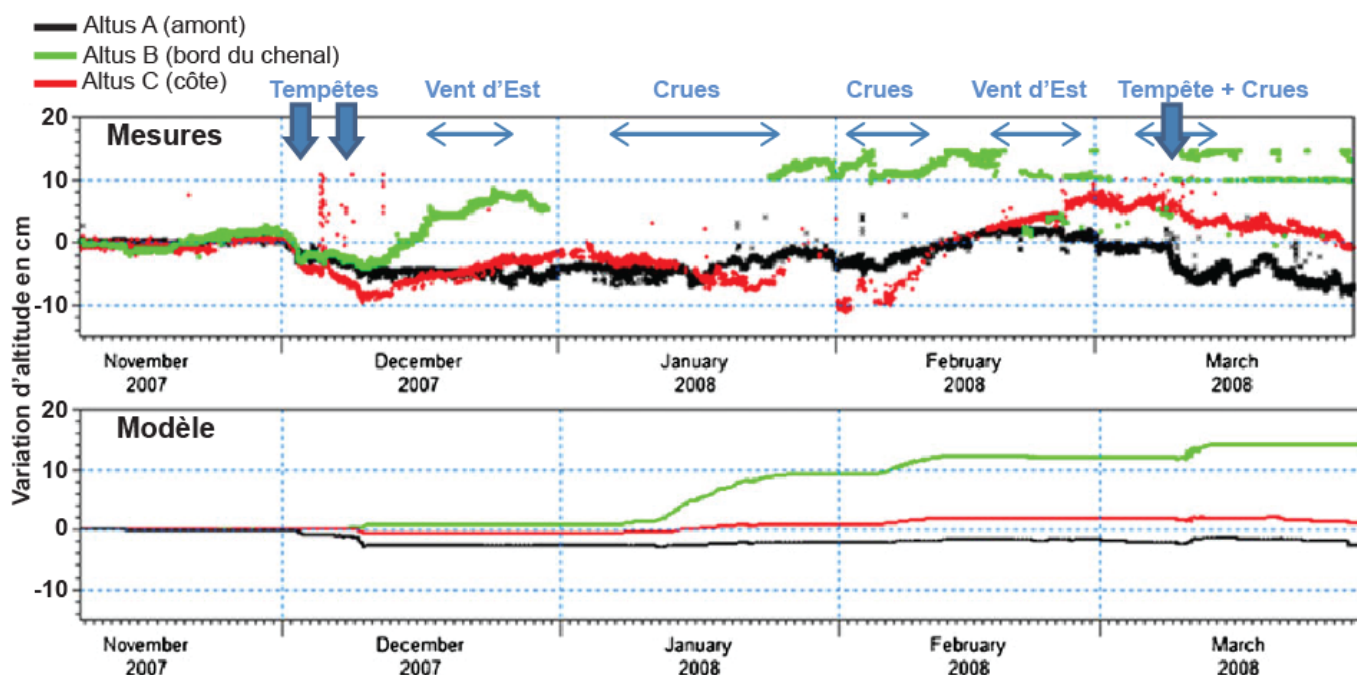
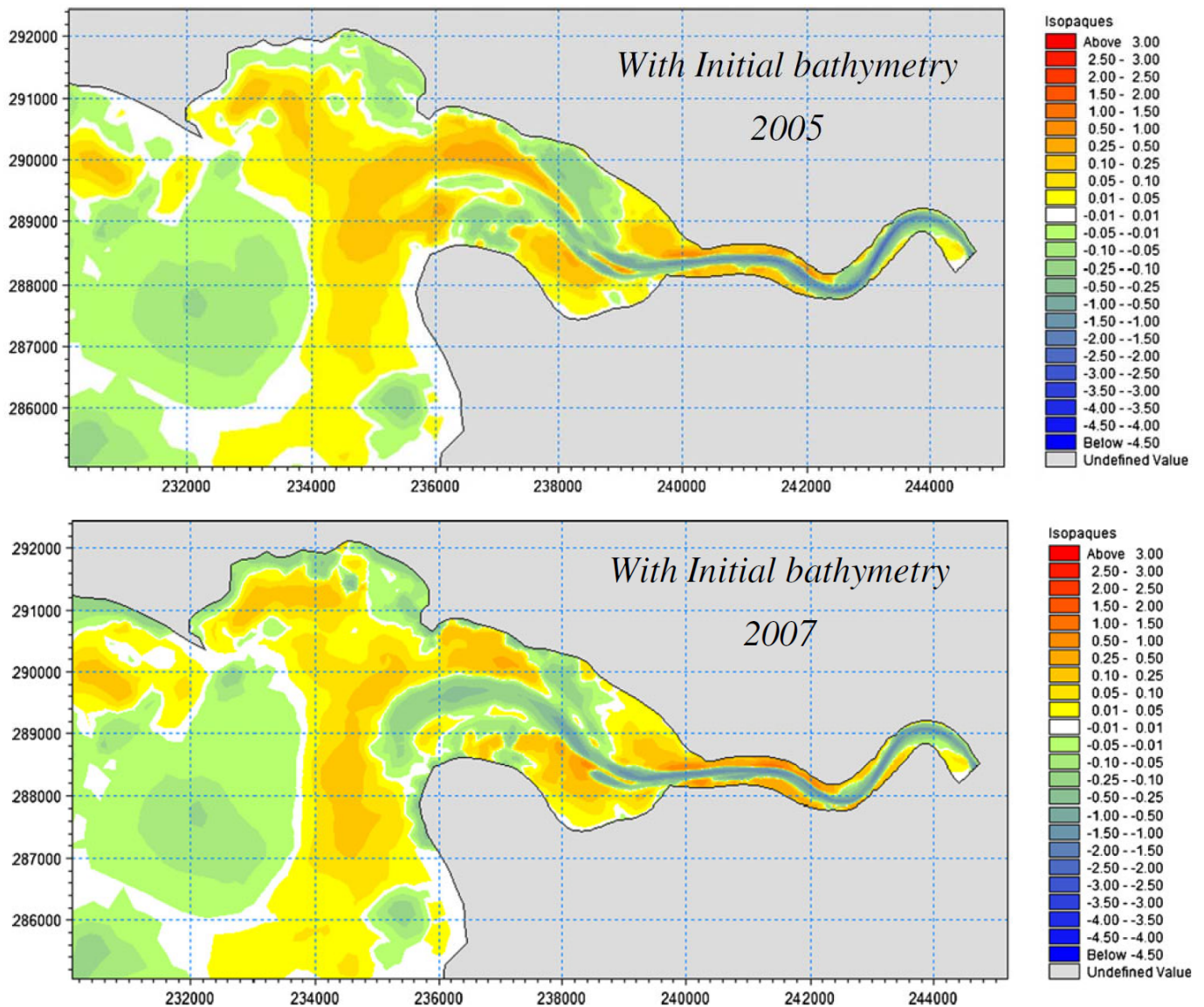


Figure 59. Évolution des fonds sédimentaires observée par altimétrie (Goubert et al., 2010) et modélisée au niveau du Banc du Strado de novembre 2007 à mars 2008 (Tessier C. et al., 2012).

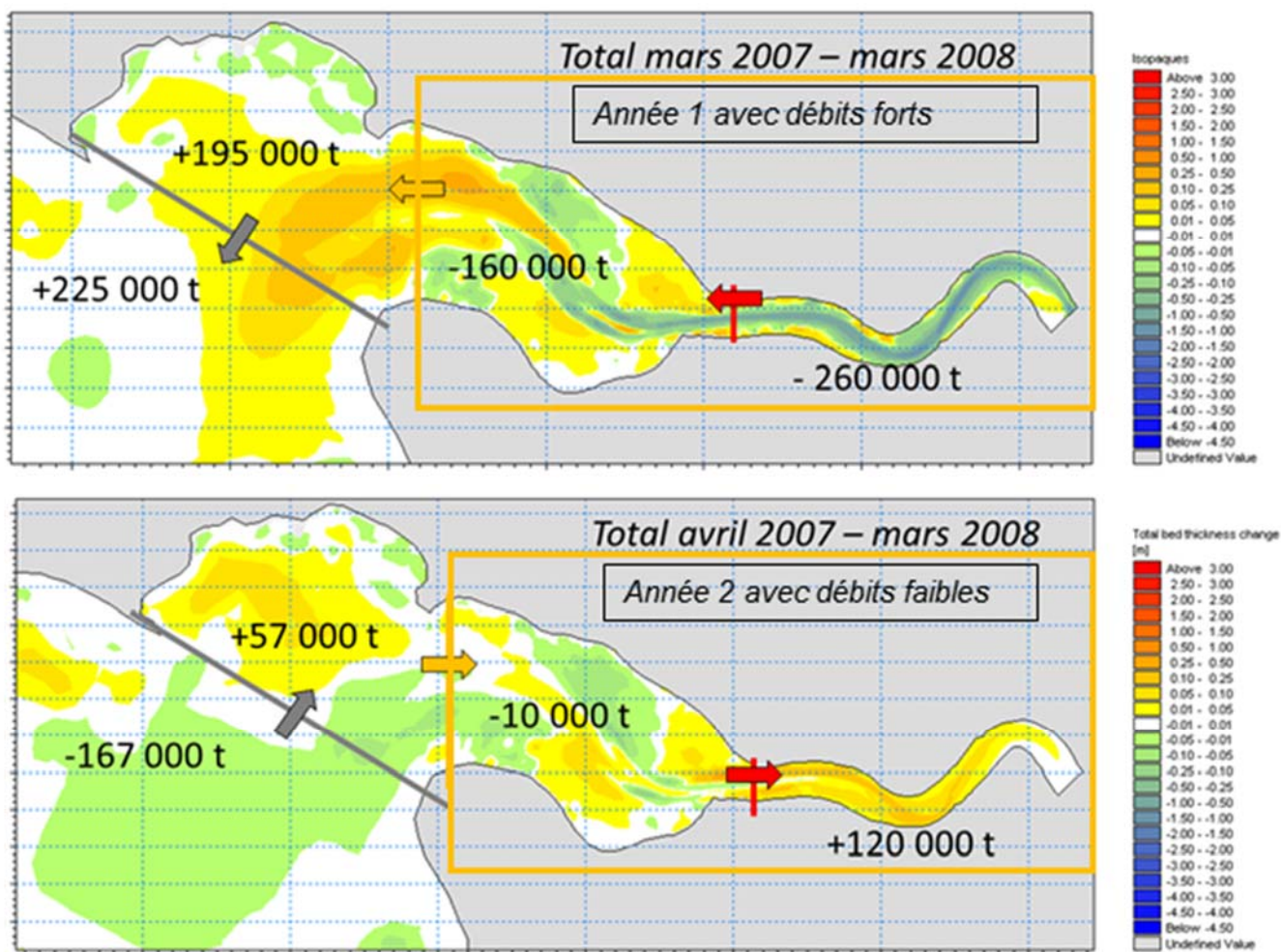


**Figure 60. Effet de la bathymétrie initiale sur le bilan sédimentaire après une modélisation sur 5 ans sans événement extrême (Vested et al., 2013).**

En revanche, sur une durée plus longue d'un ou deux ans et en faisant le bilan sur l'ensemble de l'estuaire, le modèle retranscrit les évolutions enregistrées par les relevés bathymétriques successifs (Tableau 4 et Figure 61).

**Tableau 4. Bilans sédimentaires modélisés (Tessier C. et al., 2012) et calculés par différentiels bathymétriques (Goubert & Menier, 2005).**

	Année 1 à débits forts	Année 2 à débits faibles
Modèle Avec une concentration de 300 à 500 kg / m <sup>3</sup>	Exports - 420 000 t/an - 840 000 à - 1 400 000 m <sup>3</sup> /an	Apports + 110 000 t/an + 220 000 à 370 000 m <sup>3</sup> /an
Observations (bathymétrie)	Exports crue (ex 1994, 2001) - 650 000 à - 1 140 000 m <sup>3</sup> /an	Apports de la baie (ex années 2000) + 250 000 à 650 000 m <sup>3</sup> /an



**Figure 61. Évolutions des fonds sédimentaires (érosions-dépôts en m) sur une année et bilans massiques des flux de matières pour 4 secteurs (Tessier C. et al., 2012).**

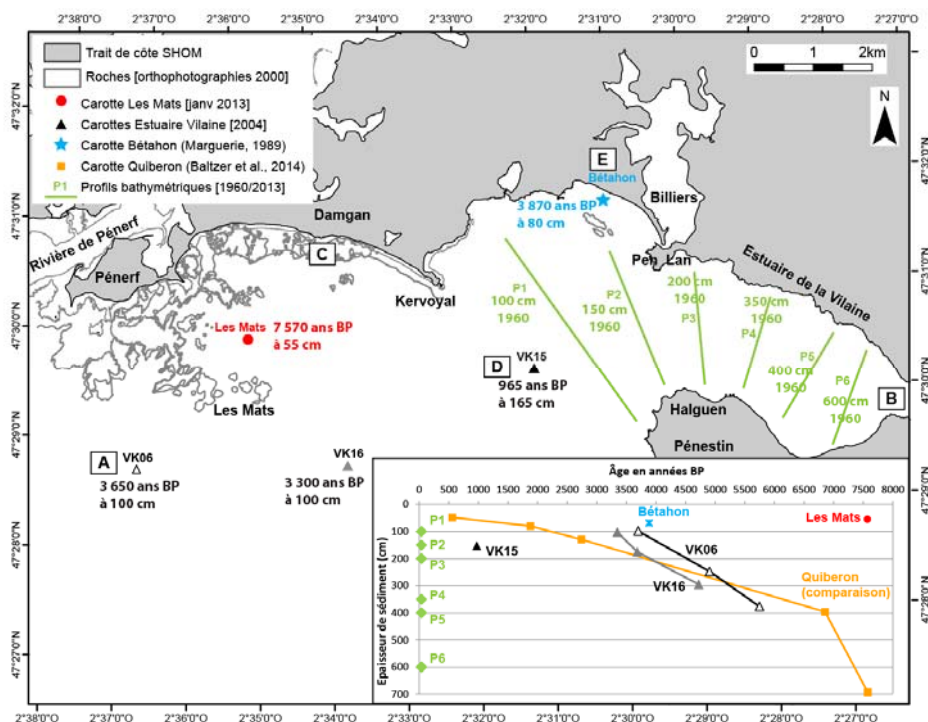
**L'encadré orange indique la zone de calcul pour le bilan sédimentaire du Tableau 4.**

Dans l'état actuel de la calibration, le modèle reproduit les tendances long terme pour des années moyennes (Figure 61 et Tableau 4) mais sous-estime fortement la dynamique associée à des événements extrêmes comme les crues ou les tempêtes (Figure 59) ainsi que les dépôts estivaux au niveau du domaine intertidal, comme au niveau de la partie externe de l'estuaire. De plus, la consolidation possible des vases en été n'est pas prise en compte dans l'état de surface des sédiments lors des premiers coups de vents d'automne. Dans ce cas, ces événements énergétiques surestiment l'érosion du système. Et enfin, l'état bathymétrique initial du site conditionne l'évolution du système (Figure 60).

Ainsi, la réalisation d'un modèle hydromorphosédimentaire nécessite de nombreuses données de terrain et d'observations afin de redéfinir à chaque événement les conséquences sur, non seulement la bathymétrie, mais surtout sur l'évolution du sédiment pendant l'événement et sa nouvelle érodabilité.

#### IV.3.c. Synthèse de la dynamique sédimentaire à l'échelle de la baie de Vilaine depuis 8 000 ans.

Le croisement des deux approches, large à l'échelle de la sismique et plus réduite à l'échelle des relevés bathymétriques, a permis de proposer un fonctionnement hydromorphosédimentaire de la baie de Vilaine séparant la dynamique antérieure à 1970 et précisant l'impact du barrage d'Arzal sur ce système sédimentaire (Figure 62, Figure 63 et Figure 64).

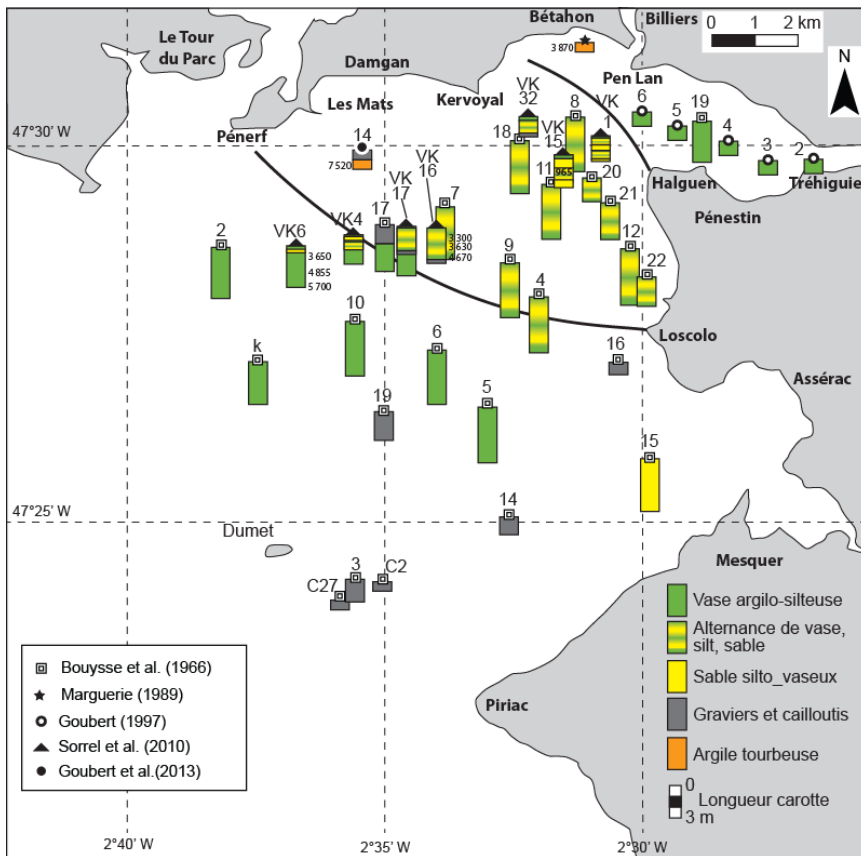


**Figure 62. Bilan des taux de sédimentation par datation des carottes et par l'analyse des données bathymétriques (Goubert et Le Gall, 2016). [A, B, C, D, E : localisation des coupes de la Figure 64]**

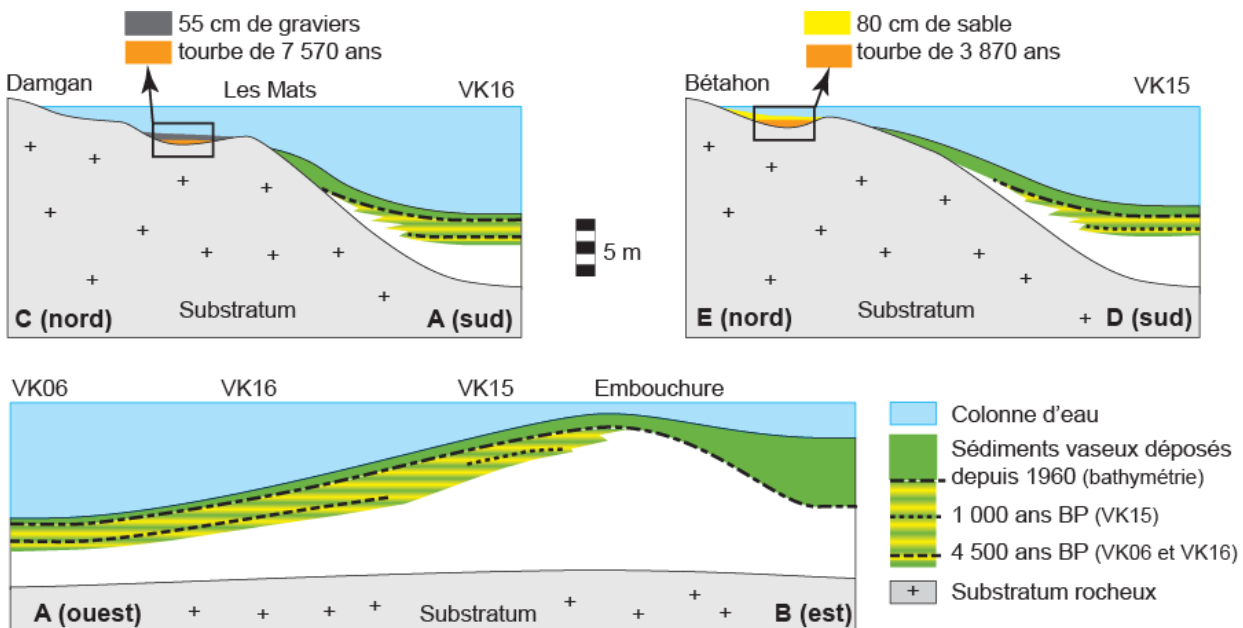
La partie interne de l'estuaire présente, depuis la construction du barrage d'Arzal en 1965, un fort taux de sédimentation de 1 à 6 m d'Ouest (profil P1) en Est (profil P6) en 50 ans (Figure 62). Vers la partie externe de l'estuaire, les taux de sédimentation diminuent d'Est en Ouest, d'environ 1 000 ans à 1,65m (VK15) à 3 650 ans à 1 m (VK06). Concernant les domaines peu profonds des Mats et de Bétahon, les dépôts déposés sur des tourbières fossiles sont peu épais : seulement 55 cm au niveau des Mats et au maximum 80 cm pour le secteur de Bétahon (Figure 62).

En terme de faciès sédimentaires (Figure 63), les sédiments déposés dans la partie interne de l'estuaire, depuis la construction du barrage en 1965, sont vaseux. Les carottes de la zone externe entre les lignes Halguen/Kervoyal à Loscolo/Penerf sont caractérisées par des alternances de sable et de vase, la couche superficielle étant un sable envasé. Puis les carottes de la zone de la baie jusqu'à l'île Dumet montrent à nouveau des dépôts vaseux.

Le croisement de ces données permet de proposer des coupes schématiques (Figure 64), montrant le cortège de haut niveau et les liens entre amont/aval et centre de la baie/estuaire et plages adjacentes. Comme dans de nombreux cas, la nature du comblement dépend de la géomorphologie, de la configuration de l'espace disponible créé et de la nature des particules et du budget sédimentaire disponibles.



**Figure 63. Synthèse des faciès sédimentaires reconnus en carottage dans la baie et l'estuaire de la Vilaine (Goubert et Le Gall, 2016).**



**Figure 64. Coupes schématiques de l'estuaire de la Vilaine représentant la sédimentation associée au cortège de haut niveau, depuis 7 500 ans à partir des carottes, et à la dynamique sédimentaire récente depuis 1960 à partir des données bathymétriques (Goubert, en prép.).**

**Porteur ou co-porteur de programmes de recherche :**

- > Contrats avec l'IAV (Institution d'Aménagement de la Vilaine)
- > Contrats avec DHI-Nantes (Danish Hydraulic Institut)
- > Les bouchots des Mats (CD 56)
- > Thèse VASSAB d'Olivier Morio encadré par E. Goubert et M. Sedrati (CDE + Région Bretagne)

### Participations aux programmes de recherche :

> Thèses de D. Menier et de C. Traini, VIVAMOD

> DIETE : Diagnostic Étendu de l'Eutrophisation en baie de Vilaine (Ifremer-Nantes, P. Souchu)

### Travaux réalisés

**Goubert E.**, 1997a. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes lidoensis et selseyensis en Baie de Vilaine (France) et lignée évolutive. *Geobios*, 21, 303-310.

**Goubert E.**, 1997b. Les *Elphidium excavatum* (Terquem), foraminifères benthiques, vivant en Baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement. Réflexions sur l'approche méthodologique, la lignée évolutive et sur l'utilisation en paléocéologie. Doctorat Université Nantes, 2 vol., 186 p., 108 fig.

**Goubert E.**, Redois F., Debenay J.P., 2000. Foraminiferal recolonization of the Vilaine estuary (W France) after a flood event. 2nd Internat. "Application of Micro- and Meioorganisms to Environmental Problems" (27 août / 1er septembre 2000, Canada).

Menier D., **Goubert E.**, Le Corre C., 2001. Mission Bingolaine : L'estuaire externe de la Vilaine : paléoenvironnement et dynamique actuelle. Rapport pour l'IAV, 46 p.

Manceau S., Alix A.-S., Menier D., **Goubert E.**, Y. Quété, 2004. Mission d'assistance à la tenue et à la valorisation des données bathymétriques de l'estuaire de la Vilaine. Rapport pour l'IAV, 25 p.

**Goubert E.**, Menier D., 2005. Évolution morphosédimentologique de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2003 : Valorisation des campagnes bathymétriques. Rapport pour l'IAV, 104 p.

**Goubert E.**, 2006. The 1995 flood in the Vilaine Estuary (France): consequences on bathymetry, sedimentation and living foraminifera. *Forams 2006, International Symposium on Foraminifera*, 10-15 septembre 2006, Natal, RN, Brésil.

Menier D., Reynaud JY, Proust JN, Guillocheau F., Guennoc P., Tessier B., Bonnet S., **Goubert E.**, 2006. Inherited fault control on the drainage pattern and infilling sequences of late glacial incised valleys, SE coast of Brittany, France. *SEPM Special Publication « Incised Valleys in Time and Space »*, 85, 37-55.

**Goubert E.**, 2007. Étude des plages de Pénerf à Billiers par la méthode des pieux depuis juillet 2003 : validation de la méthode des pieux, valorisation des données antérieures et poursuite de l'étude. Rapport pour l'IAV, 15 p.

Mertens K.N., Ribeiro, S., Bouimetarhan I., Caner, H., Combourieu Nebout N., Dale, B., De Vernal A., Ellegaard M., Filipova M., Godhe A., **Goubert E.**, et al., 2009. Process length variation in cysts of a dinoflagellate, *Lingulodinium machaerophorum*, in surface sediments : Investigating its potential as salinity proxy. *Marine Micropaleontology*, 70, 54-69.

Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., **Goubert E.**, Frénod E., Bernard N., 2009. Modélisation numérique hydrosédimentaire de l'Estuaire de la Vilaine (Morbihan, France). 31ème journées de l'Hydraulique, Paris, 22-23 septembre 2009.

**Goubert E.**, Frénod E., Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., Bernard N., 2010. The use of altimetric data (Altus) in the characterization of hydrodynamic climates controlling hydrosedimentary processes of intertidal mudflat: the Vilaine estuary case (Brittany, France). *Paralia*, 3, 6.17-6.31.

Tessier C., Vested H.J., Christensen B.B., **Goubert E.**, Salaün F., 2012. Modélisation numérique de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine. *Paralia*, XII, 471-480.

Vested H.J., Tessier C., Christensen B.B., **Goubert E.**, 2013. Numerical modelling of morphodynamics, Vilaine estuary. *Ocean Dynamics*, 63, 423-446.

Morio O., Sedrati M., **Goubert E.**, 2014. Analyze of waves dynamic over an intertidal mudflat of a sandy-gravelly estuarine beach: Field survey and preliminary modeling approach. EGU, 2014.

Ratmaya W., Souchu P., Salmon Monviola J., **Goubert E.**, 2015. Comparison of nutrient concentration in the Vilaine Bay with nutrient inputs from the Vilaine River: indication of additional internal sources during summer months. 50th European Marine Biology Symposium, Alfred Wegener Institut, 20-25 sept. 2015.

**Goubert E.**, Le Gall R., 2016. Analyse de la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine à différentes échelles temporelles. Rapport pour l'IAV, 29 p.

**Goubert E.**, Le Gall R., 2016. Évolution morphobathymétrique de l'estuaire de la Vilaine depuis 1960 à partir de l'analyse des relevés bathymétriques et des forçages hydrodynamiques de 1960 à 2013. Rapport pour l'IAV, 34 p., 50 annexes.

Morio O., Boivin J.P.; Sedrati M., Garlan T., **Goubert E.**, 2016. Kite Aerial Photography system for seasonal monitoring of morpho-sedimentary variations on a muddy-sandy macrotidal estuarine beach (Vilaine estuary, France). ECSA 56 Coastal systems in transition : From a 'natural' to an 'anthropogenically-modified' state. 4-7 September, Bremen, Germany.

Morio O., Sedrati M., **Goubert E.**, Floc'h F., Furgerot L., Garlan T., 2016. Morphodynamics of a mixed-sediments (sand and mud) macrotidal estuarine beach under contrasted energy conditions (Vilaine estuary, France). ACO 2016, 11-13 October 2016, Brest, France.

Morio O., Sedrati M., **Goubert E.**, Floc'h F., Furgerot L., Garlan T., 2016. Morphodynamic of a sandy-muddy macrotidal estuarine beach under contrasted energy conditions (Vilaine estuary, France). *SI 75, Journal of Coastal Research*, 258-262.

Souchu P., Cochenec-Laureau N., Ratmaya W., Retho M., Andrieux-Loyer F., Le Merrer Y., Barille L., **Goubert E.**, Laverman A., 2016. Diagnostic Étendu de l'Eutrophisation. Rôle des sédiments dans le cycle des nutriments et impacts sur l'eutrophisation de la baie de Vilaine. Rapport IFREMER pour l'AELB, 117 p.

**Goubert** et al., publications en cours

#### **IV.4. Le Golfe du Morbihan 1 : modèle de distribution des corps sédimentaires et des foraminifères benthiques**

##### **IV.4.a. Présentation du Golfe du Morbihan et des campagnes d'acquisition de données**

Les travaux présentés ici sur le Golfe du Morbihan (Figure 46) ont débuté par des relevés sismiques dans le cadre de la thèse de David Menier. Le contrat doctoral de Lucia Pérez Belmonte, encadrée par moi-même, a permis de poursuivre ces investigations par des séries de prélèvements de sédiments de surface pour étudier la distribution actuelle des foraminifères benthiques, et enfin par des carottages pour proposer un cadre chronologique et sédimentologique au comblement du Golfe.

Le Golfe du Morbihan est subdivisé en une succession de trois sous-secteurs, séparés par l'île aux Moines à l'Ouest et l'île d'Arz à l'Est (Tableau 5 et Figure 65). Ces différents sous-secteurs présentent des profondeurs décroissantes d'Ouest en Est et sont parcourus par des réseaux complexes de chenaux tidaux orientés selon deux directions structurales armoricaines préférentielles N160° et N40°. Le passage de la mer vers l'intérieur du Golfe, puis le passage d'un sous-secteur à l'autre s'effectue par des rétrécissements et des seuils topographiques entre les pointes des îles et la côte. Les courants de marée diminuent depuis l'entrée du Golfe jusqu'à la rivière de Noyal à l'Est (Tableau 5) et chaque rétrécissement d'un sous-secteur à l'autre est caractérisé par une accélération des courants. À l'entrée du Golfe, le substrat est induré (rocher nu ou graviers et blocs), puis le substrat devient meuble et sa granulométrie diminue progressivement en allant vers l'Est. Concernant les estrans, leurs superficies augmentent en s'éloignant de l'entrée du Golfe et leurs occupations, par des herbiers à zostères ou par l'ostréiculture, évoluent en parallèle (Tableau 5).

**Tableau 5. Caractéristiques des trois sous-secteurs du Golfe du Morbihan.**

	1. De Locmariaquer à l'île aux Moines	2. De l'île aux Moines à Ilur	3. À l'Est d'Arz et d'Ilur	
Profondeur	30 – 10 m CM	5 – 10 m CM	1 m CM	
Courants	+++	+	- -	
Substrat	Rocher nu	+++	+	
	Graviers	+++	++	
	Sables	+	+++	+
	Silts/argiles	+	++	+++
Estran	+	++	+++	
Herbier	+	+	+++	
Ostréiculture	+++	+++	-	

Les différents gradients observés de l'entrée du Golfe vers la rivière de Noyal à l'Est, s'observent également le long de la rivière d'Auray, depuis Locmariaquer jusqu'à Auray.

Les relevés sismiques de juin 2002 ont permis de caractériser l'architecture du comblement sédimentaire des trois sous-secteurs ainsi que de la rivière d'Auray. Les carottages ont été effectués en novembre 2005 dans les secteurs où les épaisseurs vues en sismique étaient suffisantes et au niveau des environnements de dépôts propices à l'accrétion sédimentaire (Figure 66). En parallèle, plus de 300 prélèvements de sédiments de surface à la benne ont été effectués sur l'ensemble du Golfe. La distribution granulométrique et l'étude des assemblages de foraminifères ont été menées sur 150 échantillons récoltés à différentes saisons en 2003 et 2004. L'ensemble de ces données a été traité par Pérez-Belmonte (2008) dans le cadre de sa thèse.



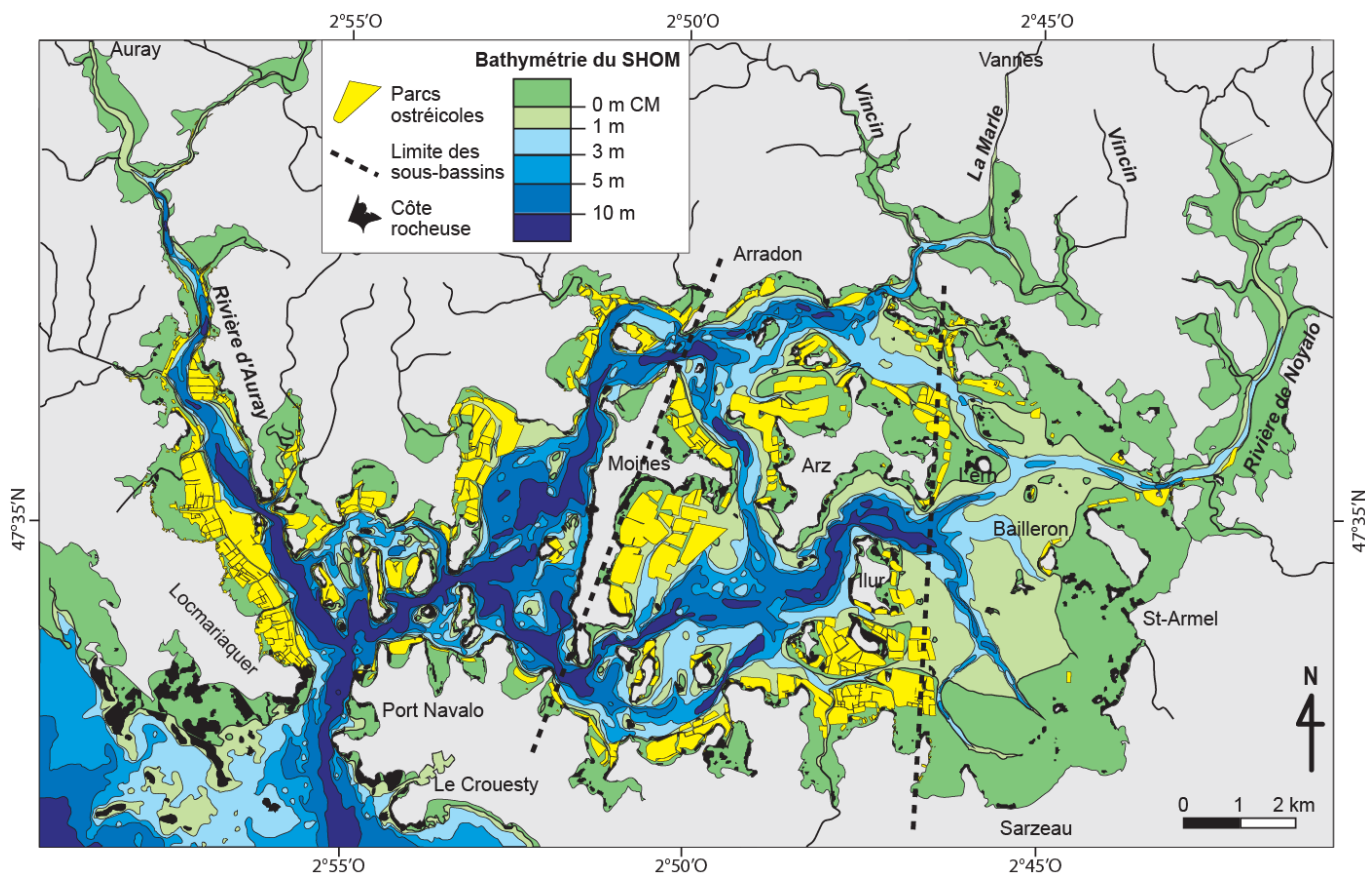


Figure 65. Carte morphobathymétrique du Golfe du Morbihan (Goubert, en prép.).

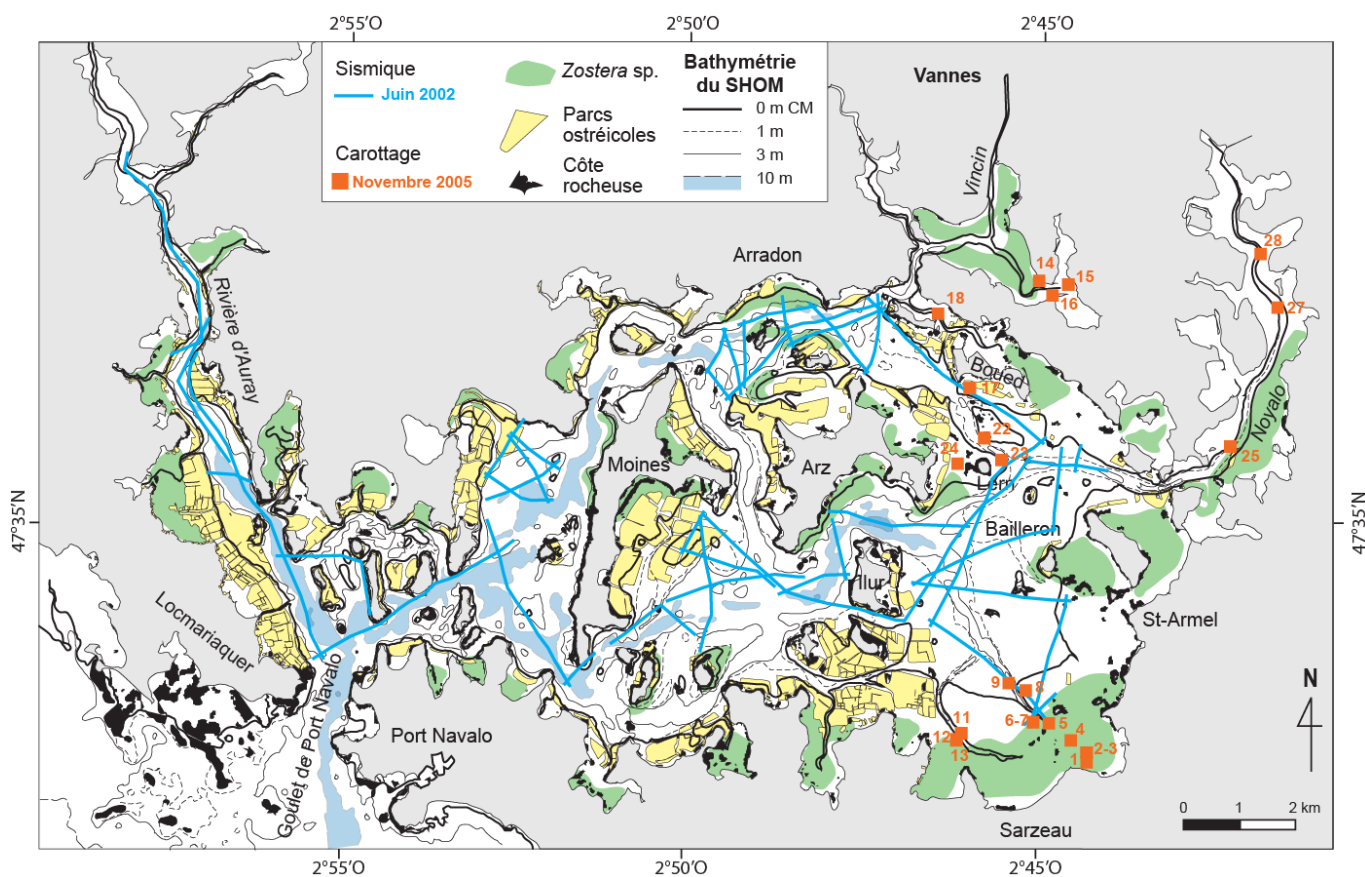


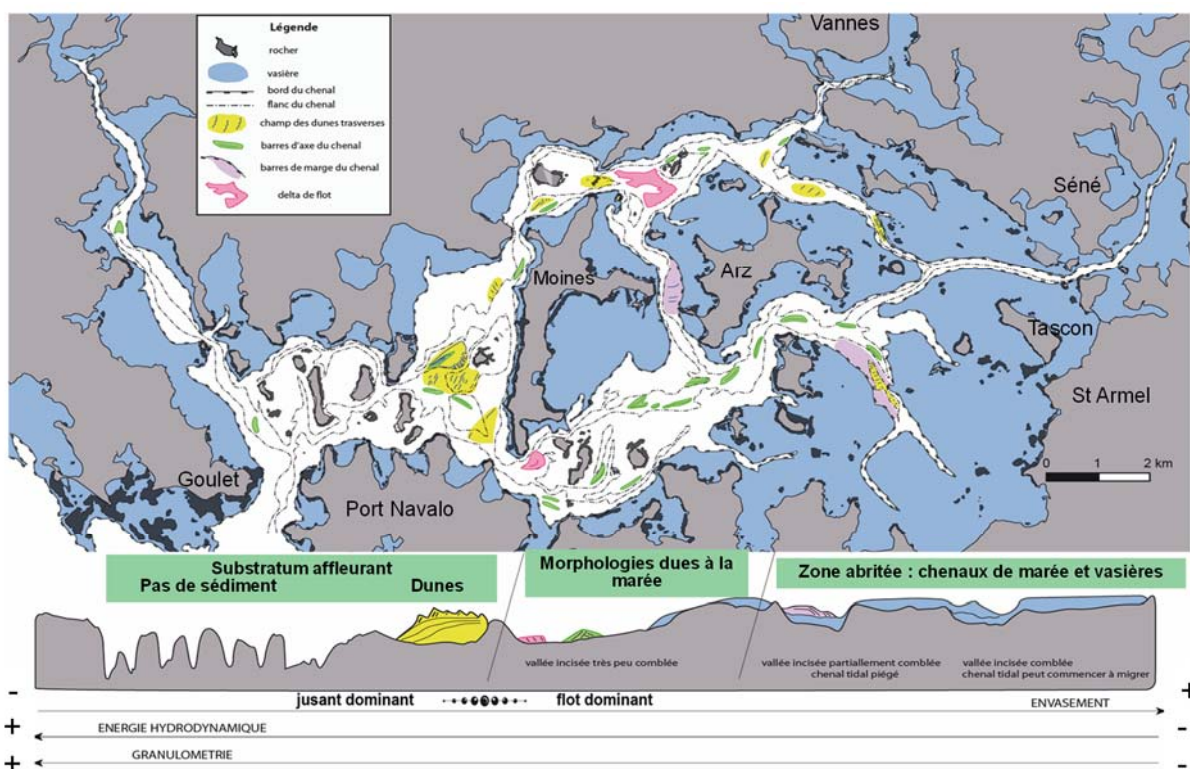
Figure 66. Plan de position de la campagne sismique et des carottages (Goubert, en prép.).

#### IV.4.b. Distribution des faciès et des corps sédimentaires

Les estrans plats visibles en cartographie se poursuivent en domaine subtidal sous forme de platiers vaseux allant jusqu'aux bords des bassins plus profonds dans la partie occidentale du Golfe et jusqu'aux bords des chenaux tidaux dans le secteur oriental (Figure 67).

Les faciès sédimentaires des zones les plus profondes, au niveau des chenaux de marée, sont différents selon l'éloignement de l'entrée du Golfe (Figure 67). La zone de l'entrée du Golfe et le bassin à l'Ouest de l'île aux Moines sont soumis à de forts courants se traduisant par la présence du rocher nu au niveau du goulet puis par des graviers et des corps sédimentaires sableux correspondant à des champs de dunes dans la partie la plus large du bassin de l'Ouest de l'île aux Moines. Les deux étranglements au Nord et au Sud de l'île aux Moines induisent un effet venturi avec les courants de marée. Le relâchement des courants en amont des étranglements provoque la mise en place d'un delta de flot. Les chenaux de la partie centrale entre l'île aux Moines et l'île d'Arz sont caractérisés par la présence de corps sédimentaires longitudinaux de type barre d'axe de chenal.

Pour la partie orientale, les courants sont beaucoup plus faibles, les chenaux sont beaucoup plus comblés (6 m maximum). La géométrie du comblement correspond à des dunes transversales pour le chenal Nord et à des barres d'axe de chenal pour la branche Sud (Perez-Belmonte, 2008).



#### IV.4.c. Modèle de distribution des foraminifères benthiques dans le Golfe du Morbihan

Un modèle de distribution des foraminifères benthiques dans le Golfe du Morbihan a été réalisé à partir du croisement des méthodes précédemment citées pour la bio-indication. La constitution d'assemblages significatifs repose sur (1) les abondances absolues / relatives et les occurrences de chaque espèce dans l'étude, (2) des traitements statistiques (analyse des correspondances), (3) l'approche morphofonctionnelle et (4) les connaissances écologiques des espèces. Toutes les espèces, mêmes celles représentées par un seul individu, sont prises en compte.

Cette approche intégrative permet de proposer pour chaque étude un modèle conceptuel de distribution des foraminifères benthiques adapté au contexte hydromorphosédimentaire.

Dans le cas du Golfe du Morbihan, des comptages de foraminifères vivants et morts réalisés à différentes saisons ont permis à Pérez-Belmonte (2008) de proposer un modèle conceptuel d'assemblages de foraminifères benthiques à significations environnementales (Figure 68) puis de valider ce modèle en regardant la distribution de ces assemblages dans le Golfe du Morbihan (Figure 69). Cette relation entre les assemblages et les environnements de dépôts va permettre d'interpréter dans des carottes sédimentaires les successions de paléoenvironnements correspondant aux modalités de comblement du Golfe du Morbihan.

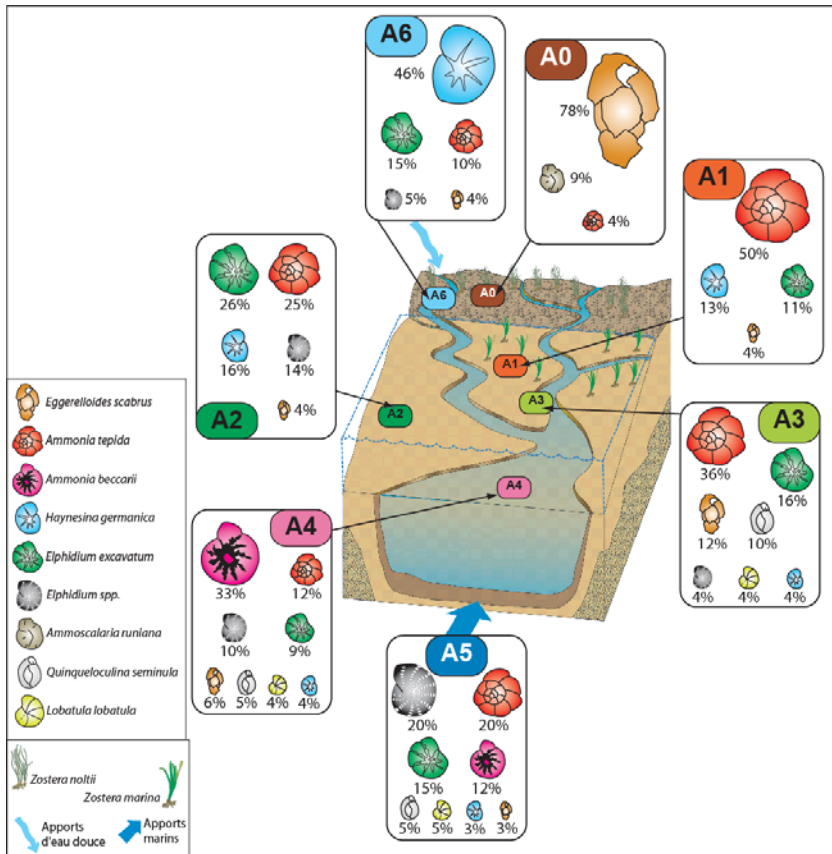


Figure 68. Modèle conceptuel d'assemblages de foraminifères benthiques à significations environnementales (Goubert, en prép.).

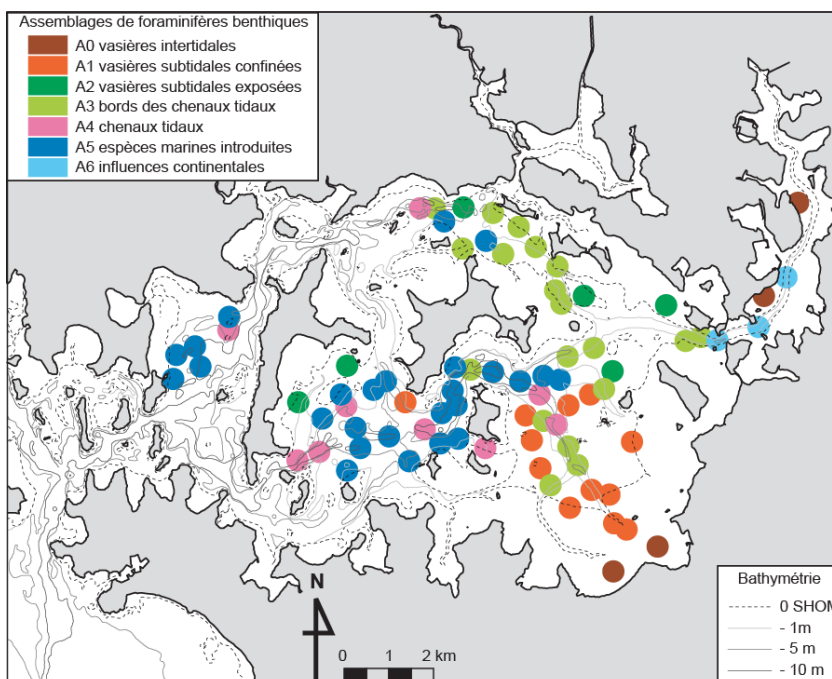


Figure 69. Distribution dans le Golfe du Morbihan des assemblages de foraminifères benthiques caractérisant différents environnements de dépôts (Goubert, en prép.).

Il est alors possible à partir des assemblages de foraminifères de distinguer les chenaux soumis à des influences continentales et les chenaux tidaux. Concernant les zones à sédimentation fine comme les platiers qui bordent les chenaux, il est possible de distinguer les vasières intertidales, les vasières subtidales confinées et les vasières subtidales exposées. De plus, deux types d'assemblages complètent cette distribution : les espèces associées aux bords des chenaux et les espèces d'affinité marine qui indiquent les zones sous l'influence de la marée montante.

#### IV.4.d. Participation à la carte géologique de Vannes (1/50 000) du BRGM

Toutes ces données acquises (sismique, sédimentologique et microfaunique) sur le Golfe du Morbihan ont été valorisées et publiées dans la notice de la carte géologique de Vannes/Saint Gildas de Rhuys (Augier et al., 2011, Annexe 7).

**Porteur du programme de recherche :**

> Thèse GOLFOSED de Lucia Pérez-Belmonte encadrée par **E. Goubert** (CG 56)

**Participations aux programmes de recherche :**

> Thèse de D. Menier

> Carte géologique de Vannes-Saint Gildas de Rhuys

Redois F., Duchemin G., **Goubert E.**, Debenay J.P., 2003. Relationships between vegetation and some Foraminifera on the tidal zone of Auray River (France). Spring Meeting 2003 of The Micropalaeontological Society's Foraminiferal Group, 25-26 avril 2003, GEOMAR Research Center for Marine Geosciences in Kiel, Germany.

Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, 2005. Multi-proxy description of major sedimentary environments in Morbihan's Gulf (NW France). Coastal Hope 2005, 24-29 juillet 2005, Lisboa, Portugal.

Menier D., Bourillet F.J., Proust J.N., Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, Thinnon I., Guennoc P., Guillocheau F., Leroy P., 2006. Morphology and infilling of Quaternary incised valleys on the Armorican margin of the Bay of Biscay. 10 th International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay, 18-20 avril 2006, Vigo, Espagne.

Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, 2006. Surface distribution of foraminifera from the Morbihan's Gulf, France: study for palaeoenvironmental reconstructions. Forams 2006, International Symposium on Foraminifera, Sept. 2006, Natal, Brésil.

Pérez-Belmonte L., **Goubert E.**, Francés Pedraz G., 2008. Recent environmental changes in the Morbihan Gulf (NW France) from benthic foraminifera. ECSA 44, Estuarine and Coastal Sciences Association Instituto Argentino de Oceanografía, Oct. 2008, Bahia Blanca, Argentina.

Menier D., Tessier B., Dubois A., **Goubert E.**, Sedrati M., 2011. Geomorphological and hydrodynamic forcing of sedimentary bedforms - Example of Gulf of Morbihan (South Brittany, Bay of Biscay). Journal of Coastal Research, 64.

Augier R., Menier D., Van Vliet-Lanoë B., Chauris L., Thinnon I., Mougou B., Hallegouët B., avec la collaboration de Do Couto D., Turrillot P., Bellanger M., **Goubert E.**, Perrot J., Gautier C., 2011. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Vannes – Saint-Gildas-de-Rhuys (417). Orléans : BRGM, 263 p.

**Goubert** et al., publications en cours

---

#### **IV.5. Le Golfe du Morbihan 2 : la conchyliculture**

Le Golfe du Morbihan constitue l'un des principaux sites ostréicoles à huîtres creuses (*Crassostrea gigas*) de Bretagne Sud, mais il héberge également un important gisement de palourdes (*Ruditapes decussatus* et *philipinarum*) et quelques gisements d'huîtres plates (*Ostrea edulis*), de coquilles Saint-Jacques (*Pecten maximus*), de pétoncles (*Chlamys varia*), de coques (*Cerastoderma edule*) et de moules (*Mytilus edulis*). Ces activités doivent faire face à différents problèmes et enjeux pour se maintenir : un environnement global de qualité pour le bon développement des cycles de vie (reproduction, captage, croissance), l'absence de contamination bactériologique pour la commercialisation des produits et la mise en conformité des pratiques par rapport aux réglementations environnementales qui imposent le plus faible impact possible de ces activités sur l'environnement. C'est dans ce cadre général que différents organismes (CRC BS<sup>1</sup>, Bretagne Vivante<sup>2</sup>, CDPMEM<sup>3</sup>, CAP 2000<sup>4</sup>, CD56, pêcheurs, ostréiculteurs) m'ont sollicitée pour développer certaines études.

##### IV.5.a. Impact des pratiques ostréicoles sur la biodiversité des foraminifères benthiques

Cette étude (projet OstreBio) a été initiée lorsque les conchyliculteurs ont été dans l'obligation de produire une étude d'incidence environnementale s'ils souhaitaient obtenir une nouvelle concession ou changer leurs pratiques. La démarche a été de proposer les foraminifères comme indicateurs pour distinguer l'impact des contraintes environnementales de celles des pratiques ostréicoles sur la biodiversité des foraminifères benthiques. Le secteur choisi pour l'étude se situe à l'entrée du Golfe, à Locmariaquer. Il s'agit d'un domaine intertidal le long de la rivière d'Auray dont les limites amont/aval sont constituées par des chenaux de marée (Figure 70). Lors de l'implantation de ces concessions, il y a plus de 50 ans, les parcs ont été sablés afin d'augmenter la portance. Actuellement, le substrat est sablo-vaseux.

Ce secteur présente une grande diversité de pratiques ostréicoles : cultures en poches sur tables séparées par des allées plus ou moins larges, cultures à plat avec ramassage à la main ou ramassage à la drague. De plus, sur ce domaine, les concessions inexploitées ont été échantillonnées comme points de références : concessions sans rien sur le sol, ou avec des tables sans poches, ou avec des tables surmontées de poches abandonnées et pleines de coquilles mortes. Toutes les limites des concessions sont marquées par des filets rigides en plastique d'environ 20 cm de haut, dont les croisements constituent des habitats protégés. Deux campagnes de prélèvements ont été réalisées à deux ans d'intervalle (sept. 2008 et nov. 2010) ce qui a permis de voir l'impact de certains changements de pratiques : abandon, mise en place de tables...

---

<sup>1</sup> CRC BS : Comité Régional de la Conchyliculture Bretagne Sud

<sup>2</sup> Bretagne Vivante : Association de protection de la nature, gestionnaire de réserves naturelles dans le Golfe du Morbihan

<sup>3</sup> CDPMEM : Comité Départemental des Pêches Maritimes et des Élevages Marins

<sup>4</sup> CAP 2000 : Association de Conchyliculteurs, Agriculteurs, Pêcheurs pour le maintien des activités primaires dans le Morbihan

Les espèces de foraminifères benthiques présentes sur le site de Locmariaquer sont des espèces typiques trouvées par Pérez-Belmonte (2008) dans le cas des estrans vaseux de l'entrée du Golfe du Morbihan. Les foraminifères se répartissent selon trois grandes zones (Figure 71) : la zone bleue au niveau des bords des chenaux tidaux majeurs, la zone verte au niveau du chenal interne, vaseux, abrité et la zone orange la plus éloignée des chenaux et légèrement surélevée.

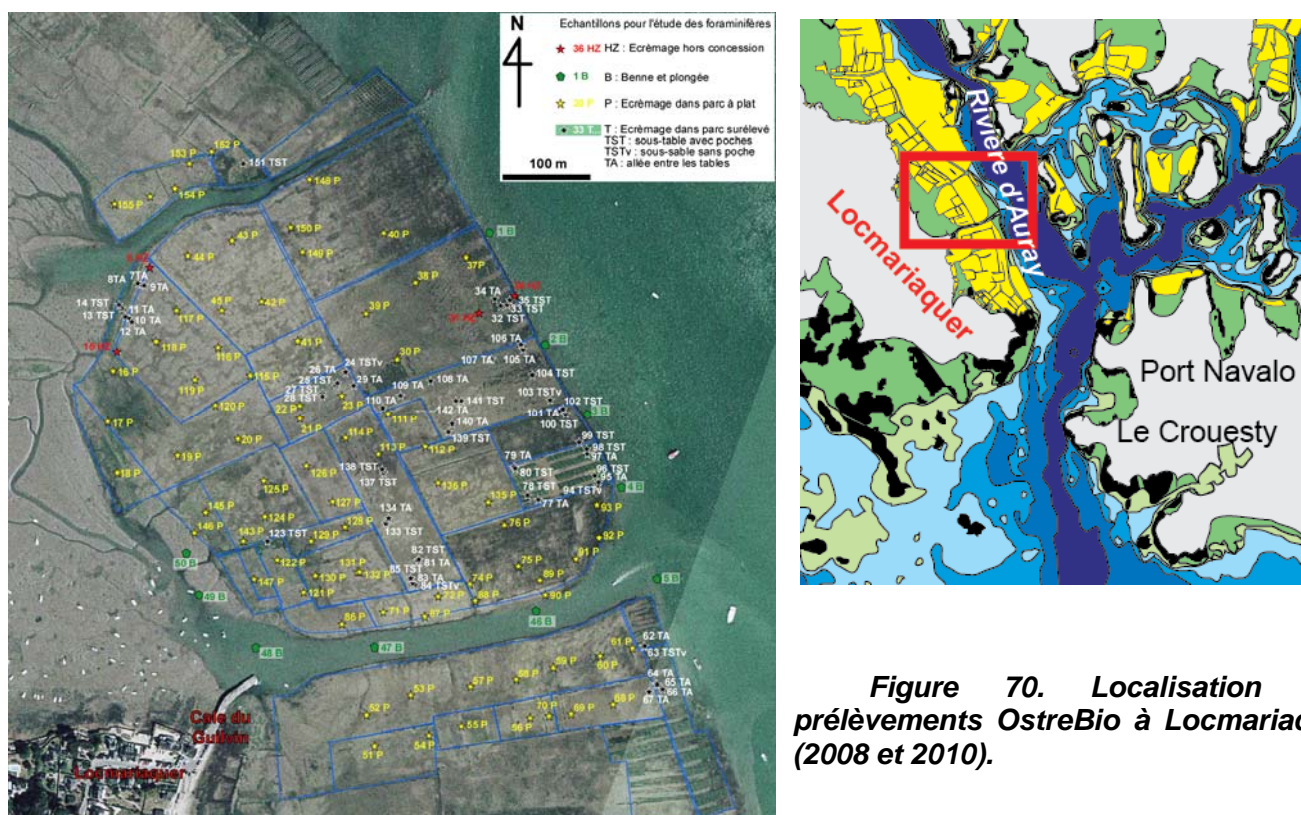


Figure 70. Localisation des prélèvements OstreBio à Locmariaquer (2008 et 2010).

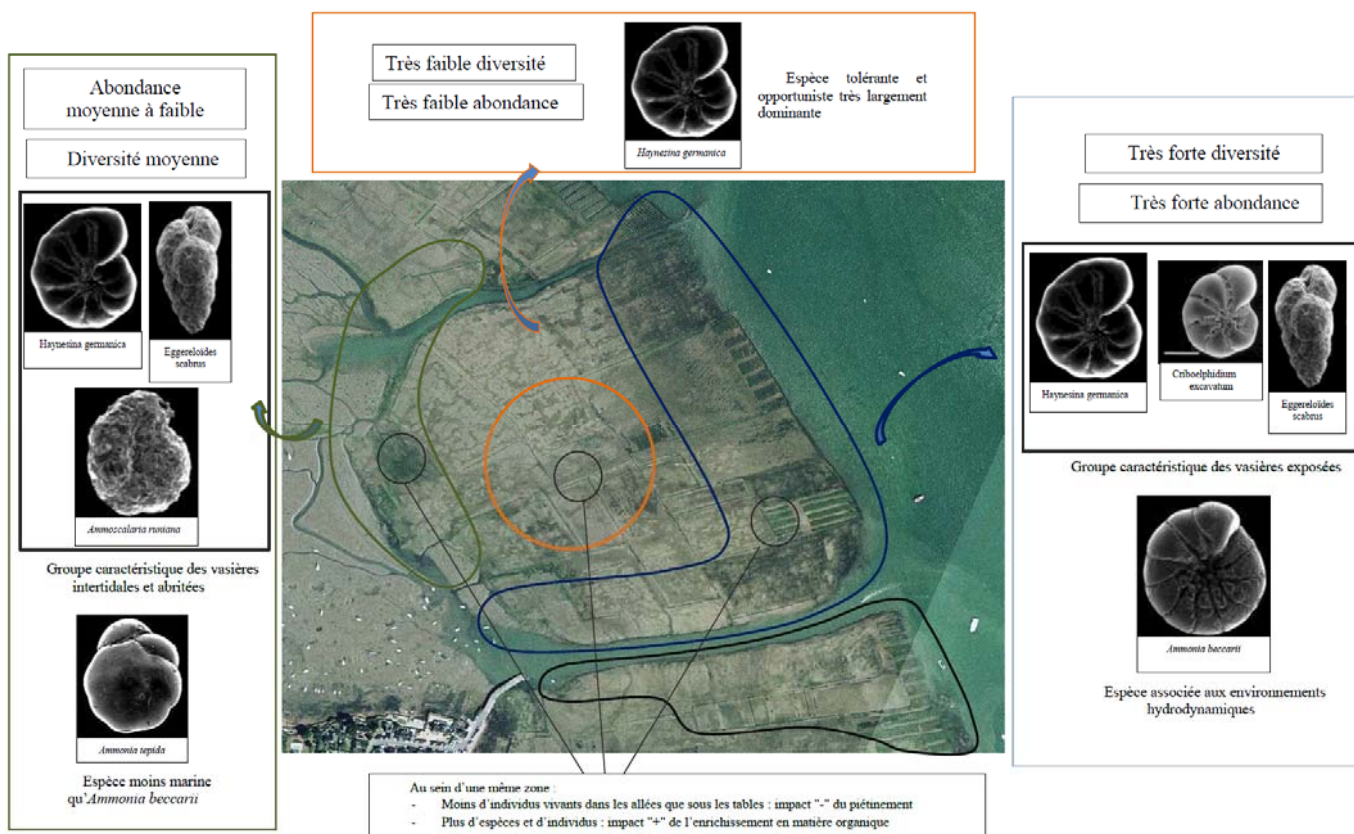


Figure 71. Synthèse des résultats obtenus sur la biodiversité des foraminifères en relation avec les pratiques ostréicoles (Goubert, en prép.).

Les assemblages observés correspondent aux caractéristiques d'un estran vaseux le long de la partie aval d'un estuaire et ceci indépendamment de la présence d'activités ostréicoles. La granulométrie grossière par ajout de sable ne se traduit pas par la présence d'espèces typiques de ce substrat. Ainsi, malgré la modification du substrat et les pratiques ostréicoles, les foraminifères sont tout de même typiques des vasières intertidales et des bords de chenaux tidaux : la présence de tables surélevées induit une légère sédimentation qui redonne aux deux premiers centimètres de sédiments sa granulométrie vaseuse d'origine.

Les forçages environnementaux estuariens/intertidaux contraignent beaucoup plus la distribution des foraminifères que les activités ostréicoles. Les seuls impacts des activités ostréicoles s'observent au sein d'une zone ayant les mêmes caractéristiques environnementales (Figure 71). Ainsi, le piétinement, notamment dans les allées entre les tables, semble avoir un léger impact négatif sur les assemblages de foraminifères, notamment sur les formes vivantes. À l'inverse, il s'avère que l'enrichissement en matière organique induit par les cultures ostréicoles ait un impact positif sur les foraminifères qui présentent une plus grande diversité ainsi qu'une abondance plus importante sous les tables en activité.

**Porteur de programme de recherche :**

> *OstreBio*, post-doc 2 ans V. Le Cadre (E. Goubert, dispositif ASOSC CG56)

**Travaux**

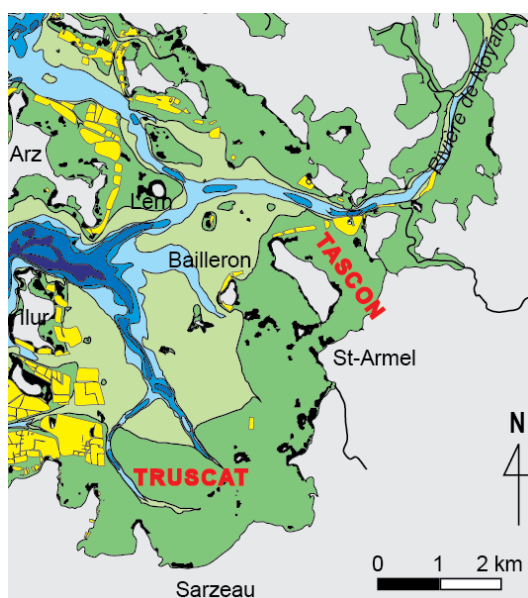
3 rapports pour le CG56

Goubert et al., publication en cours

#### IV.5.b. Les gisements de palourdes du Golfe du Morbihan

Des études spécifiques ont été menées sur trois gisements de palourdes du Golfe du Morbihan répondant à deux questionnements de la part des professionnels. Ces études ont été menées par des étudiants du Master IGREC (Ingénierie et Gestion des Ressources Côtières) encadrés par moi-même.

- ***Baisse du recrutement de jeunes palourdes dans les gisements du Sud-Est du Golfe du Morbihan (Truscat et Tascon)***

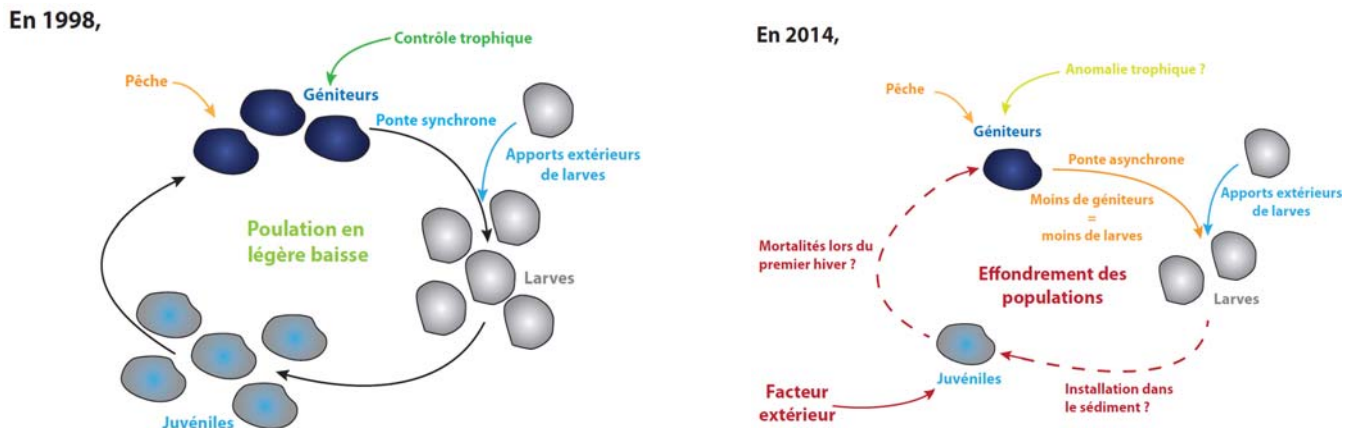


La première approche a été celle des pêcheurs qui souhaitent savoir si le fait de sabler la vasière de Truscat permettait d'avoir un meilleur recrutement de jeunes palourdes. En effet, les jeunes palourdes se fixant sur des granulométries sableuses, un ajout de sable pourrait être envisagé (Kedzierski, 2013).

**Figure 72. Localisation des gisements de palourdes de Truscat et de Tascon.**

La deuxième approche a été celle de l'analyse du cycle de vie des palourdes avec le suivi de la reproduction pour savoir si des géniteurs étaient en état de produire des larves susceptibles de se

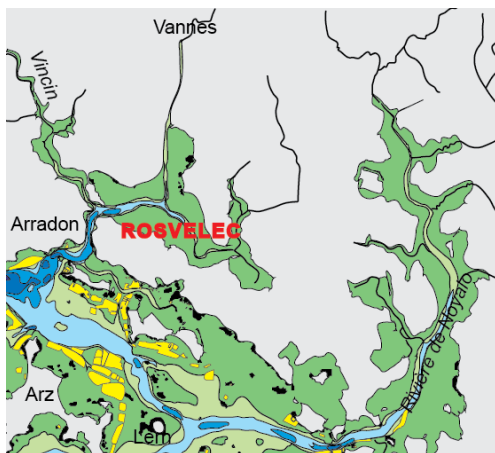
fixer au sédiment et si le cycle de vie subissait toujours les mêmes facteurs forçants. L'analyse des données semble montrer que les facteurs forçants ont évolué de 1998 à 2014 (Figure 73).



**Figure 73. Hypothèse de modification du cycle de reproduction de la palourde japonaise entre 1998 et 2014 (Kedzierski, 2014).**

Enfin, la troisième approche a été une expérimentation zootechnique *in situ* à Tascon afin de tester des substrats pour la fixation des larves de palourdes (Ruel, 2015a, Annexe 8).

- **État bactériologique, sédimentologique et conchylicole de la vasière de Rosvelec**



Il y a environ 15 ans, la vasière de Rosvelec (Figure 74) hébergeait un important gisement de palourdes ouvert à la pêche à pied, mais le site a été déclassé en raison de la très forte contamination par des *Escherichia coli*. Une étude a donc été initiée pour faire un bilan bactériologique, sédimentologique et conchylicole pour voir si la situation avait évolué en 15 ans et surtout depuis l'interdiction de la pêche à pied.

**Figure 74. Localisation de la vasière de Rosvelec.**

Les analyses bactériologiques menées sur les palourdes et sur les sédiments vaseux anoxiques et riches en matières organiques ont révélé la persistance de la contamination des palourdes mais surtout la présence d'*E. coli* dans les sédiments (Figure 75). De plus, le suivi mensuel a permis d'identifier des périodes et des stations particulièrement contaminées aussi bien au niveau des palourdes qu'au niveau du sédiment (Figure 76). Il serait intéressant de poursuivre cette étude afin de mieux comprendre la dynamique de la contamination spatio-temporelle des palourdes et des sédiments et surtout afin d'identifier l'origine des *E. coli* (humaine, bovine, aviaire) et les conditions de leur maintien en vie dans le sédiment.



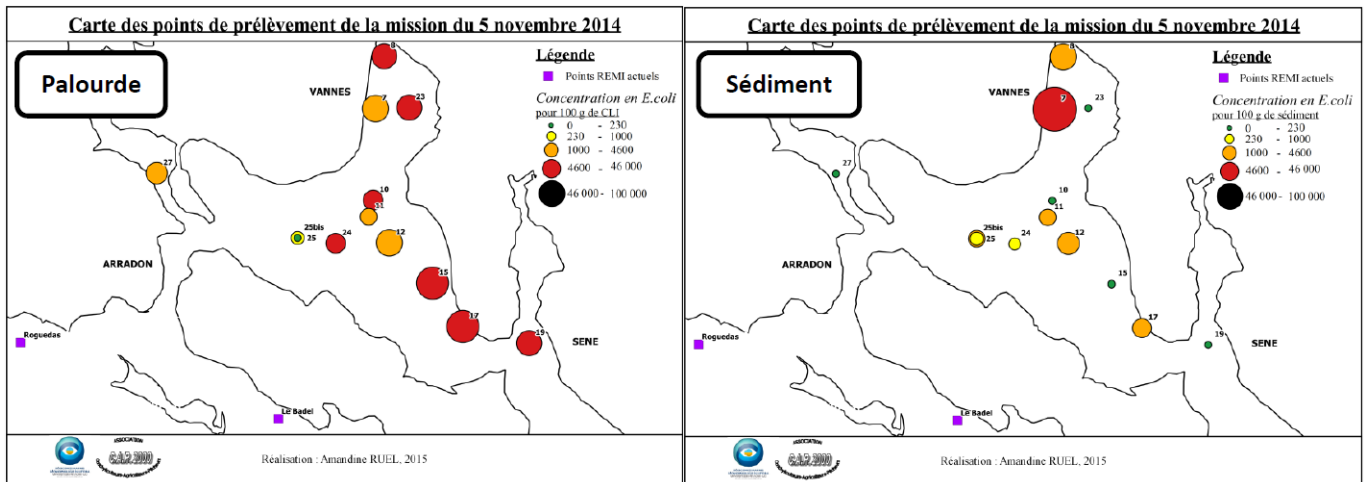


Figure 75. Contaminations par *Escherichia coli* des palourdes et des sédiments de Rosvelec en novembre 2014 (Ruel, 2015b).

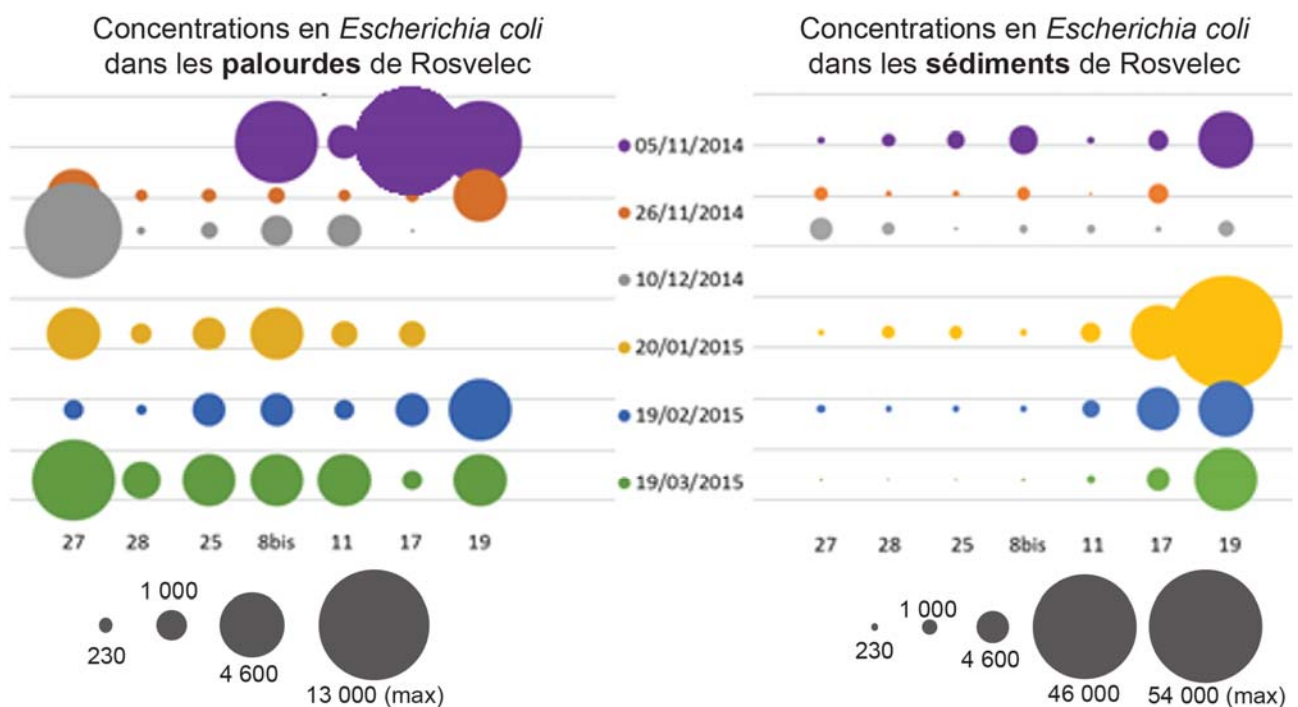


Figure 76. Évolution spatio-temporelle des contaminations par *Escherichia coli* des palourdes et des sédiments de Rosvelec de novembre 2014 à mars 2015 (Ruel, 2015b).

**Porteur de programme de recherche :**

- > TRUSCAT 1, Master 1 M. Kedzierski (E. Goubert, CAP 2000 et CDPMEM, CG56)
- > TRUSCAT 2, Master 2 M. Kedzierski (E. Goubert, CAP 2000 et CDPMEM)
- > ROSVELEC, Master 1 A. Ruel (E. Goubert, CAP 2000 et CDPMEM)
- > TASCON, CDD 2 mois A. Ruel (E. Goubert et CDPMEM)

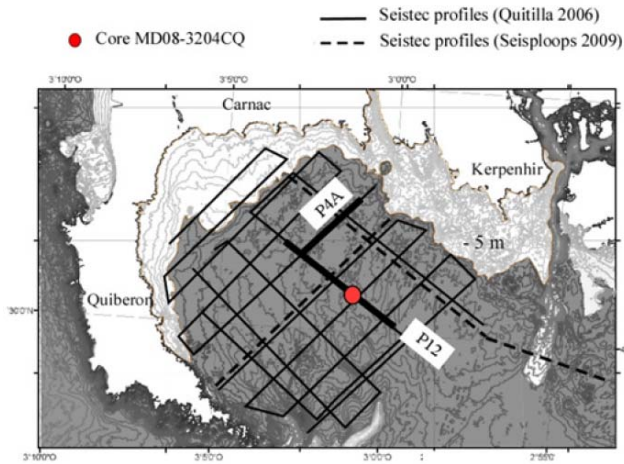
**Travaux**

- Kedzierski M., 2013. Intérêts du sablage des vasières pour la pérennité des gisements de coquillages de pêche à pied du Golfe du Morbihan. Master 1 IGREC, UBS 51 p.
- Kedzierski M., 2014. Diminution des stocks de palourdes japonaises (*Ruditapes philippinarum*) du Golfe du Morbihan des années 1990 à 2014 : étude de la dynamique des populations et suivi de la reproduction 2014. Master 2 IGREC, UBS, 65 p.
- Ruel A., 2015a. Essais de captage de larves de palourdes au niveau de la vasière de Tascon (Golfe du Morbihan). Rapport pour le CDPMEM, 22 p.
- Ruel A., 2015b. Étude du fonctionnement de la vasière de Rosvelec : Aspects bactériologiques, sédimentologiques et conchylicoles. Master 1 IGREC, UBS, 45 p.

## IV.6. La Baie de Quiberon : le comblement de la baie et son fonctionnement actuel

### IV.6.a. La carotte MD08-3204CQ : Mise en évidence de changements climatiques rapides depuis 9 000 ans

Ce programme de recherche a été initié par Agnès Baltzer afin de comparer l'enregistrement sédimentaire holocène avec celui du Loch Sunart (voir section III.2.d).



Une carotte a été réalisée à partir du Marion-Dufresne en 2008 en Baie de Quiberon sous une profondeur d'eau de 17 m. Cette carotte de 9 m de long a traversé trois unités sismiques représentatives du comblement de la Baie de Quiberon (Figure 77, Figure 78).

Figure 77. Localisation de la carotte MD08-3204CQ et des profils sismiques (Baltzer et al., 2014).

La base de la carotte (Figure 78) est constituée d'une unité silteuse (silty-argileuse ou silty-sableuse) [U2] d'environ 4,50 m d'épaisseur allant de 9 970 à 8 700 ans cal BP correspondant à une première partie du prisme transgressif. La deuxième partie du prisme transgressif, à base érosive, est représentée par une unité argileuse [U3] de 2,70 m d'épaisseur dont le sommet est daté à environ 4 300 ans cal BP. La partie sommitale de la carotte, soit 1,30 m, constitue le cortège de haut-niveau caractérisé par une alternance de silts et de sables coquilliers et argileux [U4].

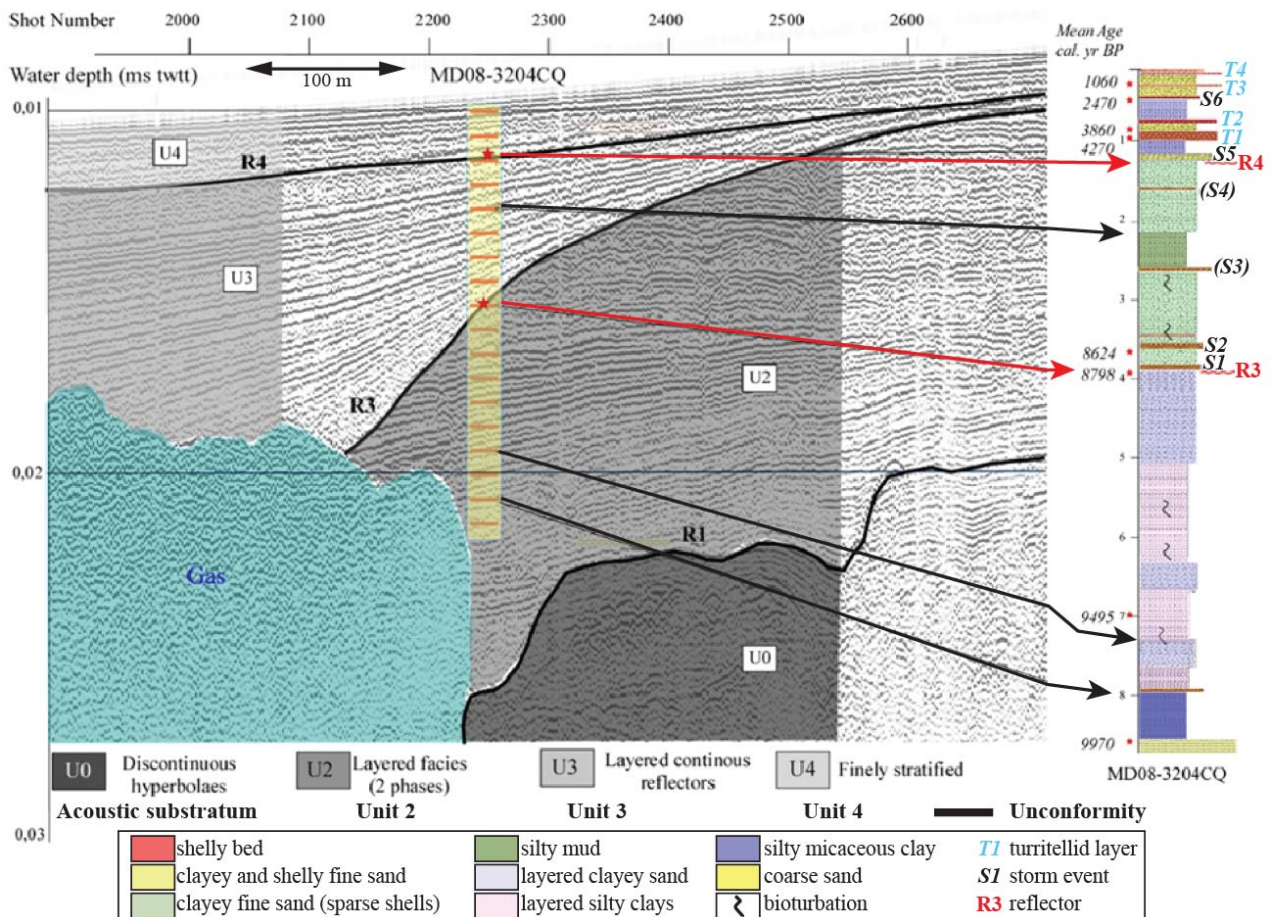
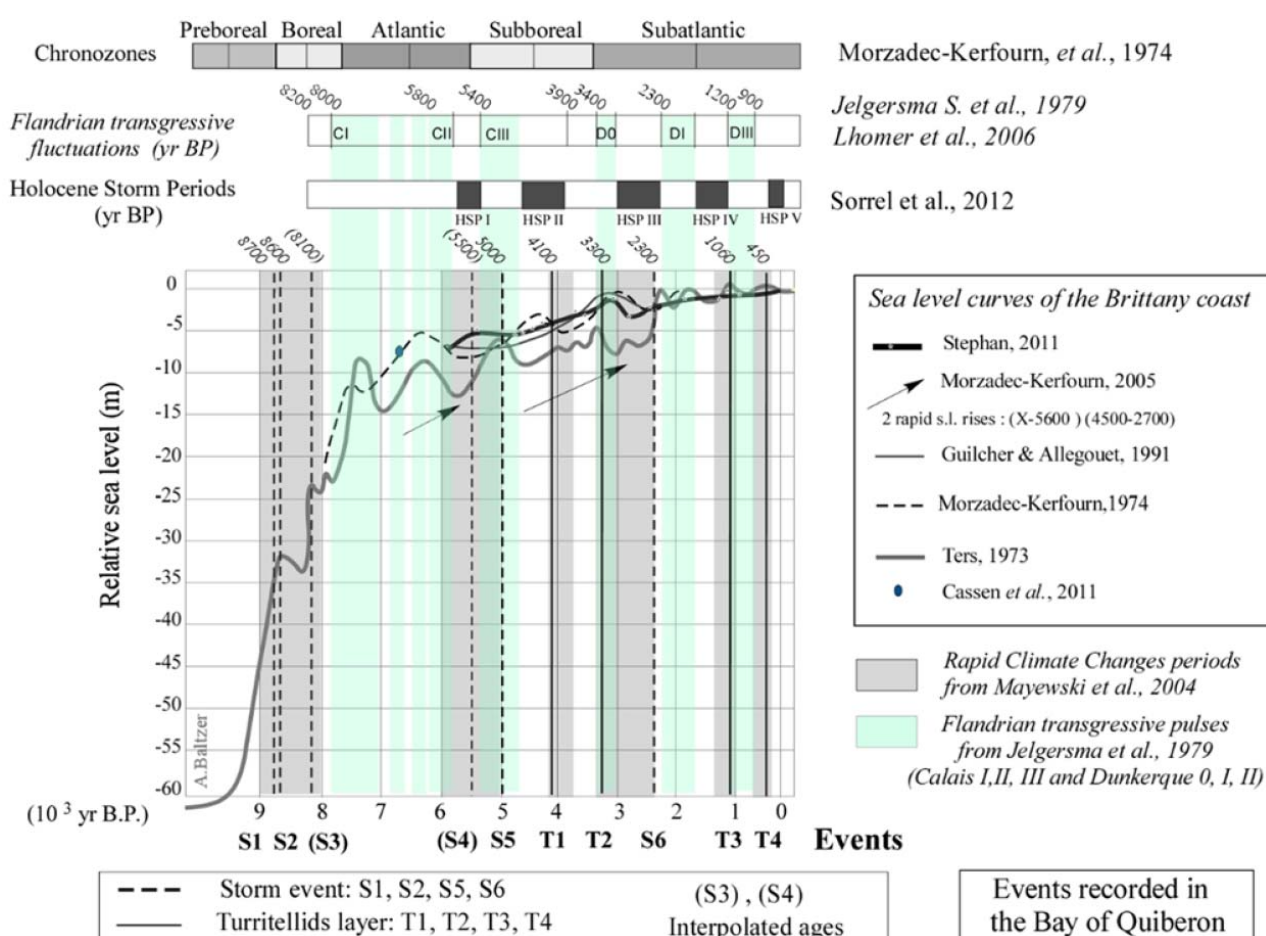


Figure 78. Log de la carotte MD08-3204CQ (modifiée d'après Baltzer et al., 2014).

À partir de l'ensemble des données, il a été possible d'isoler certains événements particuliers (Figure 78) : les épisodes de tempêtes [S1 à S6] et les niveaux à turritelles [T1 à T4]. Ces événements climatiques et biologiques ont été comparés (Figure 79) aux pulsations de la transgression flandrienne (Jelgersma et al., 1979), aux changements rapides du climat (Bond et al., 1997 ; Mayewski et al., 2004) et aux périodes de tempêtes (Sorrel et al., 2012).



**Figure 79. Comparaison des occurrences des différents événements climatiques (Baltzer et al., 2014).**

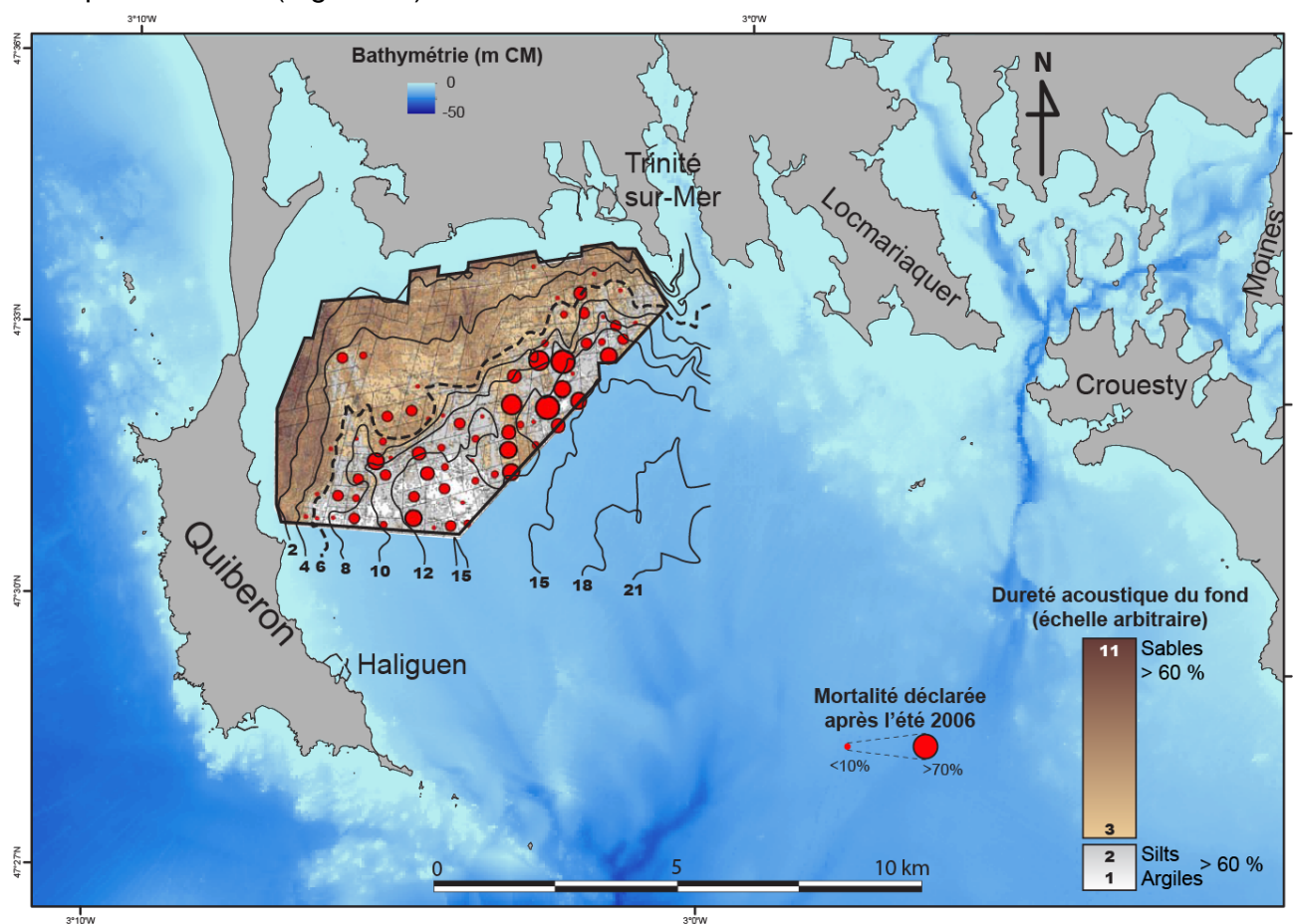
L'adaptation de la méthode rang-fréquence aux spécificités des échantillons fossiles, faible diversité spécifique et grand nombre d'échantillons, a montré son efficacité pour mettre en évidence des cyclicités de quelques centaines à plusieurs milliers d'années sur des carottes littorales (étang du Loc'h, Lorient, et du Loch Sunart, Ecosse). Ces cyclicités climatiques sont souvent étudiées et mises en évidence à partir de carottes marines profondes, mais très rarement à partir de carottes littorales. Il serait intéressant d'appliquer cette méthode aux données de carottes prélevées dans différents contextes littoraux afin de mieux caractériser la nature de certaines oscillations climatiques : refroidissement des masses d'eau, variations de salinité, stratification, oxygénation/eutrophisation, occurrences d'événements extrêmes (tempêtes, crues) ...

#### IV.6.b. Risques Conchylicoles en Baie de Quiberon (RISCO) : distribution des foraminifères et relation avec le cycle de vie des huîtres

##### • **Présentation de la Baie de Quiberon et problématique**

Le Nord-Ouest de la Baie de Quiberon est un secteur ostrécicole où les *Crassostrea gigas* sont, dans la grande majorité des cas, cultivées à même le sédiment et ramassées à la drague. Les concessions peuvent être séparées en deux catégories (Figure 80) : les concessions sableuses peu profondes soumises parfois à une forte agitation dans le cas de vents d'Est à Sud/Sud-Est et les concessions silteuses plus profondes. La limite entre les deux correspond à une rupture de pente entre 5 et 10 m avec la ligne bathymétrique des 6 m soulignant ce dénivelé (Figure 80).

Suite à l'été 2006, les ostréiculteurs ont déclaré de fortes mortalités sur toutes les classes d'âges de *Crassostrea gigas*. L'objectif du programme RISCO était de mieux comprendre les causes de ces mortalités estivales qui ont touché les concessions silteuses les plus profondes (de 8 à 15 m) à dureté acoustique très faible (Figure 80).



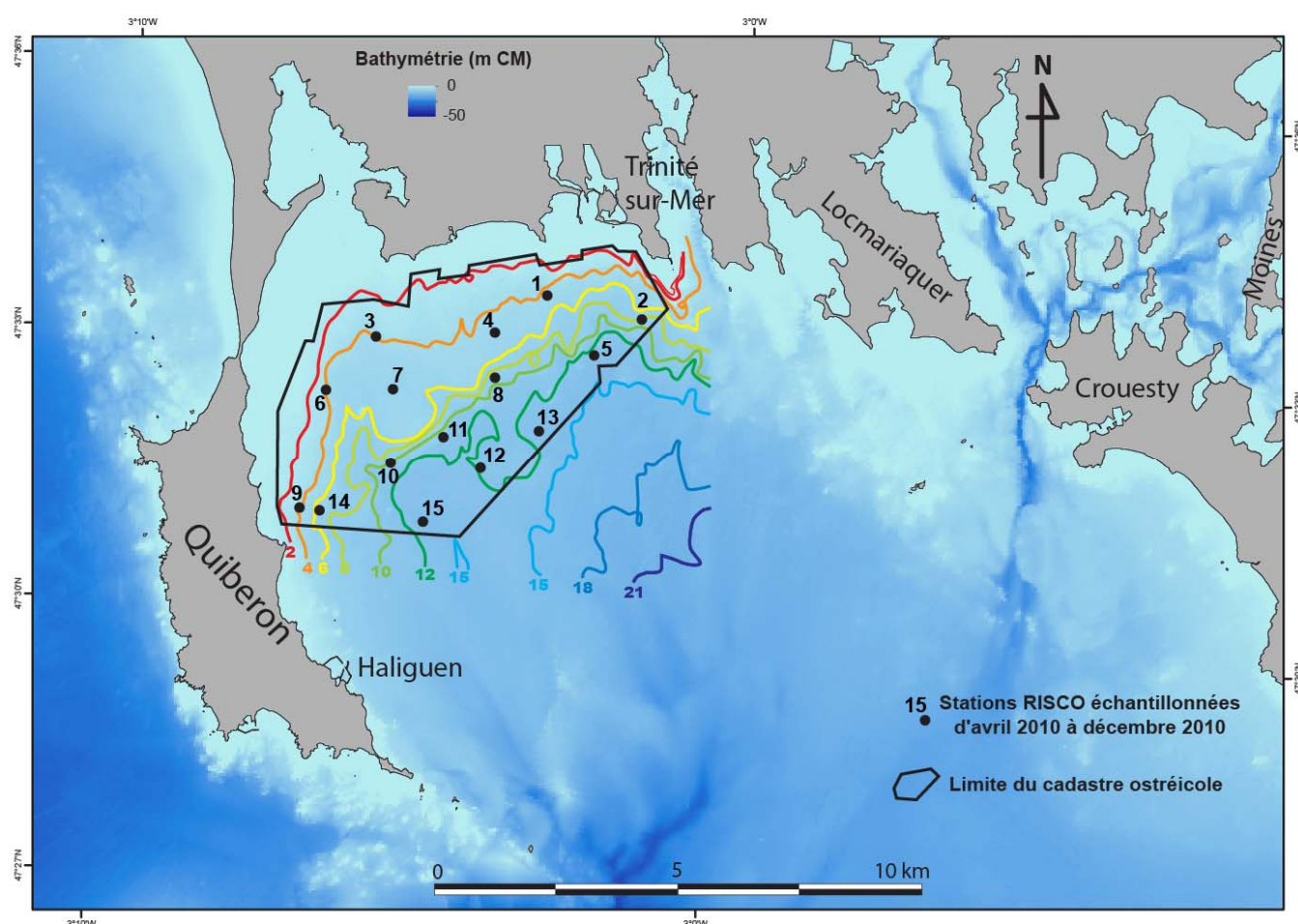
**Figure 80. Bathymétrie, dureté acoustique du fond et localisation des mortalités estivales de 2006 en Baie de Quiberon (Goubert, en prép., modifiée d'après Stanisière et al., 2013).**

- **Protocoles expérimentaux**

Cinq lots d'huîtres ont été installés en quinze stations (Figure 81 et Tableau 6) et chaque mois d'avril à décembre 2010, des prélèvements d'huîtres (comptages pour la mortalité, identifications des traces de prédation et échantillonnages pour les analyses des virus et des bactéries) et des prélèvements de sédiments de surface ont été réalisés. Différents indices biotiques et traitements statistiques ont été effectués sur les données de comptages des foraminifères benthiques.

**Tableau 6. Les cinq lots d'huîtres installés pour le programme RISCO.**

	En poche (Sans Prédation)		Offertes à la prédation (Avec Prédation)
À 70 cm au-dessus du sédiment (Haut)	Naissains (HSP)	18 mois (HSP)	
Sur le sédiment (Bas)	Naissains (BSP)	18 mois (BSP)	18 mois (BAP)

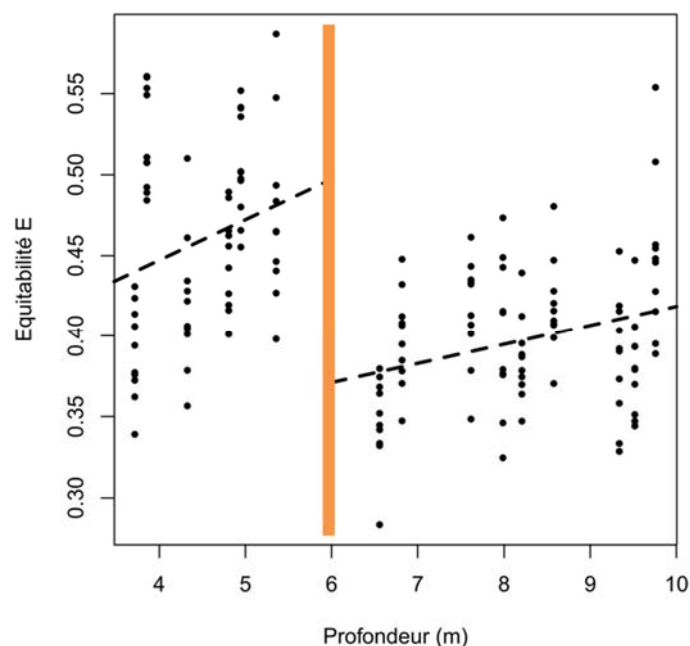


**Figure 81. Localisation des stations de mesures du programme RISCO (Goubert, en prép.).**

- **Relation entre les foraminifères benthiques, la croissance et la mortalité des huîtres**

Les foraminifères vivants ont été comptés mais leur très faible abondance n'a pas permis le traitement des données. Les différents calculs ont donc été effectués sur l'assemblage total (vivant + mort). Cette première remarque permet de préciser que dans le cas de ce site d'étude des prélèvements annuels pourraient être fait afin de suivre l'évolution globale du fonctionnement de ce milieu.

*A priori*, la différence bathymétrique très faible entre les hauts et les bas, ne devrait pas s'exprimer fortement dans les assemblages de foraminifères benthiques.

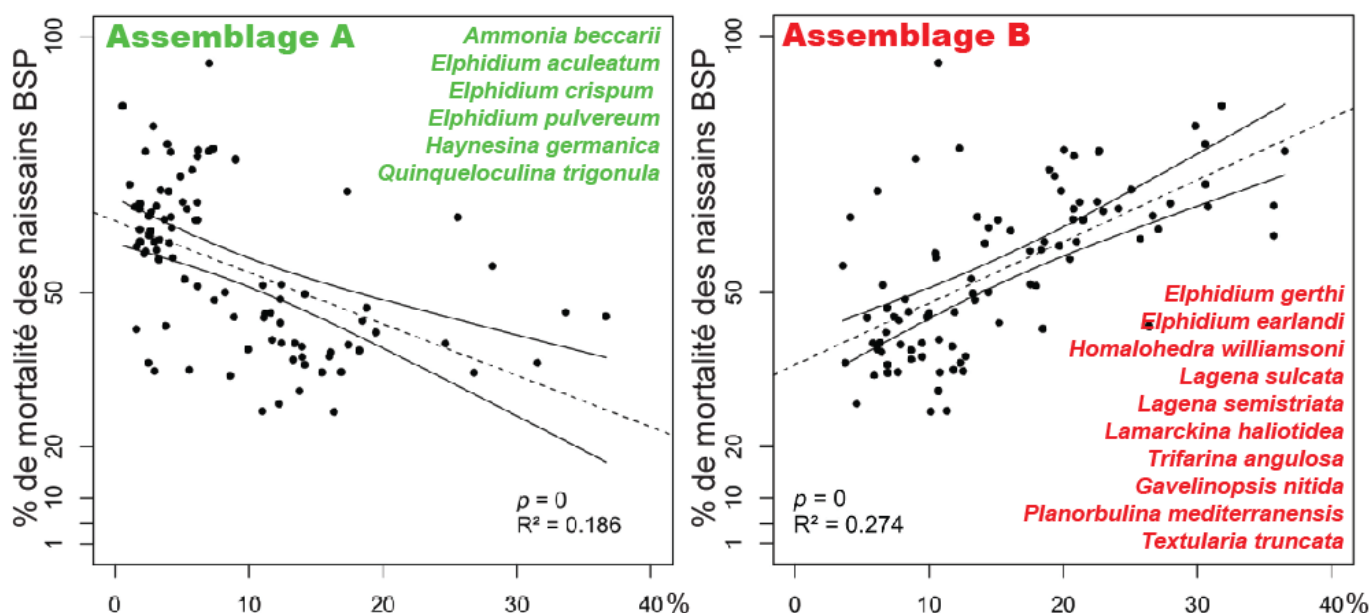


Or, il s'avère que l'indice d'équitabilité présente une discontinuité importante au passage des 6 m (Figure 82) : un indice élevé indique que plusieurs espèces dominent équitablement l'assemblage alors qu'un indice faible indique qu'une seule espèce domine l'assemblage. La dominance d'une seule espèce traduit un déséquilibre de l'environnement et, le plus souvent, il s'agit d'une espèce opportuniste ou tolérante.

Le dénivelé entre 5 et 10 m a donc un impact important sur les assemblages de foraminifères.

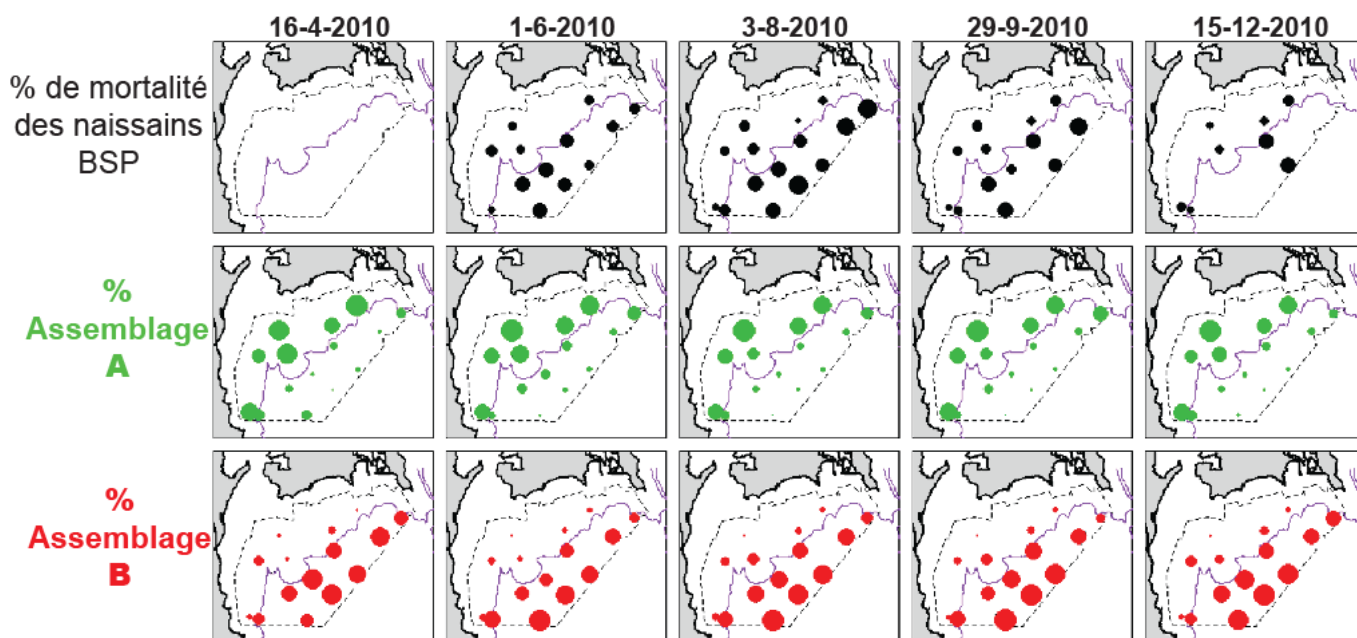
**Figure 82. Évolution de l'équitabilité des assemblages de foraminifères en fonction de la profondeur (en m CM) (Poirier, Goubert, en prép.).**

Des traitements statistiques menés par Clément Poirier (post-doc) ont montré l'existence de différents assemblages dont deux (assemblages A et B) sont associés de manière opposée aux taux de mortalité des naissains (BSP, Tableau 6) au contact du sédiment et protégés de la prédateurs (Figure 83).



**Figure 83. Corrélation entre les assemblages A et B et les pourcentages de mortalité des naissains BSP (Poirier, Goubert, en prép.).**

La distribution spatio-temporelle des pourcentages de présence des assemblages A et B montre, à nouveau, l'importance du dénivelé signalé par l'isobathe 6 m : l'assemblage A dont l'abondance augmente lorsque le taux de mortalité diminue est principalement présent dans le secteur peu profond ; l'assemblage B dont la présence augmente en association avec les fortes mortalités dans les parties les plus profondes du site d'étude (Figure 84).



**Figure 84. Distribution spatio-temporelle des assemblages A et B associés aux mortalités des naissains BSP (Poirier, Goubert, en prép.).**  
 [la ligne en violet correspond à l'isobathe 6 m CM]

Les mortalités estivales de 2006 comme les mortalités des naissains au contact du sédiment en 2010 sont majoritairement situées dans le même secteur plus profond au pied du dénivelé marqué par l'isobathe 6 m CM. De plus, dans le cadre de RISCO, il a été montré que les taux de croissance des naissains au contact du sédiment étaient plus faibles que les taux de croissance des naissains surélevés. Les espèces de l'assemblage B, largement dominant dans ces zones plus profondes silteuses, sont opportunistes/tolérantes et elles indiquent des teneurs en matières organiques et en oxygène variables : les teneurs en oxygène peuvent être à des niveaux d'hypoxie et même d'anoxie (Bernhard, 1986 ; Jorissen et al., 1992 ; Sen Gupta et al., 1996 ; Bernhard & Sen Gupta, 1999 ; Osterman, 2003 ; Platon et al., 2005 ; Polovodova et al., 2011).

Il est ainsi fort probable que les mortalités observées soient la conséquence de ces variations de teneurs en oxygène qui peuvent affecter le développement de l'huître (taux de croissance plus faible) et même provoquer des mortalités importantes. Suite à ces observations, un modèle numérique d'estimation des teneurs en oxygène des eaux de fond a été réalisé par Ifremer (P. Cugier, Mars 3D) à partir des données de forçage des étés de 2000 à 2006 (Stanisière et al., 2013). Il semble qu'au cours de l'été et du début de l'automne 2006, les eaux de fond ont été hypoxiques pendant plusieurs jours de suite, ce qui a pu provoquer les mortalités notées par les ostréiculteurs (Figure 85).

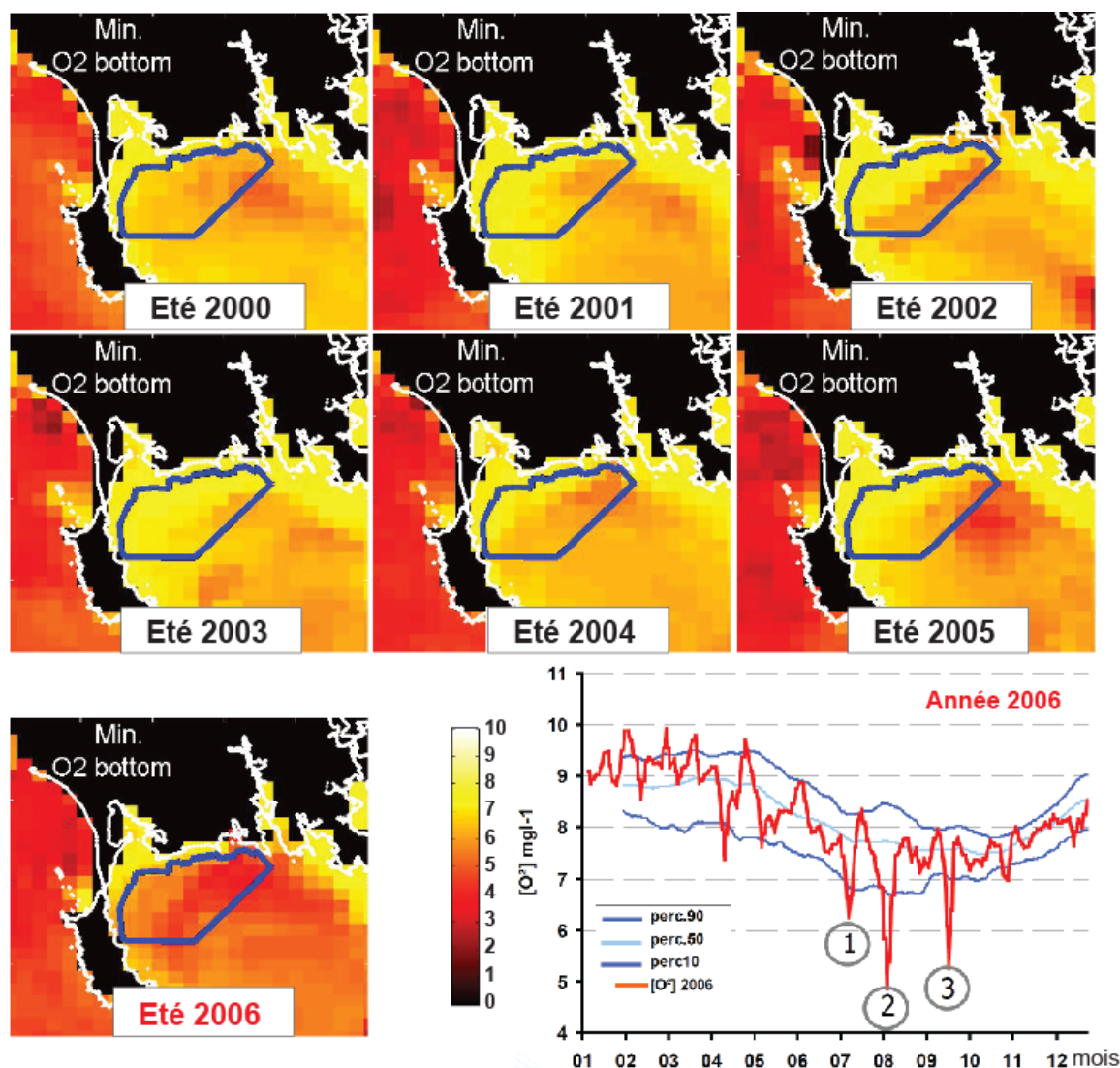


Figure 85. Teneurs minimales en oxygène dissous (mg/l) pour les eaux de fond de 2000 à 2006 (P. Cugier, modèle Mars 3D, modifiée d'après Stanisière et al., 2013).

Mise en évidence de 3 épisodes d'hypoxie en 2006.

**Participations à des programmes de recherche :**

- > RISCO : Risques Conchylicoles en Baie de Quiberon, post-doc 1 an C. Poirier (A. Dréano, CRC BS et J. Mazurier, Ifremer La Trinité, Région Bretagne)
- > Carottage par le Marion Dufresne en Baie de Quiberon (A. Baltzer)

**Travaux**

Mazurie J., Stanisiere J.Y., Dreano A., Augustin J.M., Ehrhold A., **Goubert E.**, Leclerc E., Quinsat K., Sinquin J.M., Charria G., Cugier P., Dumas F., Gohin F., Bouget J.F., Gabellec R., Langlade A., Retho M., 2012. Massive oysters mortalities in Quiberon bay (France) : An hypoxia origin. International Council for the Exploration of the Sea ICES/CIEM ASC, Bergren.

Mazurie J., Stanisiere J.Y., Bouget J.F., Langlade A., Leclerc E., Quinsat K., Herve G., Augustin J.M., Ehrhold A., Sinquin J.M., Meidi-Deviarni I., **Goubert E.**, Cochet H., Dreano A., 2013. Les risques conchylicoles en Baie de Quiberon. Deuxième partie. Le risque de prédation sur l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport final du projet Risco 2010-2013. <http://dx.doi.org/10.13155/29130>, 37p.

Stanisiere J.Y., Mazurie J., Bouget J.F., Langlade A., Gabellec R., Retho M.1, Quinsat K., Leclerc E., Cugier P., Dussauze M., Menesguen A., Dumas F., Gohin F., Augustin J.M., Ehrhold A., Sinquin J.M., **Goubert E.**, Dreano A., 2013. Les risques conchylicoles en Baie de Quiberon. Troisième partie : le risque d'hypoxie pour l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport final du projet Risco 2010-2013. <http://dx.doi.org/10.13155/29131>, 72p.

Baltzer A., Walter-Simonet A.V., Mokeddem Z., Tessier B., **Goubert E.**, Cassen S., Diffio J.A., 2014. Climatically-driven impacts on sedimentation processes in the Bay of Quiberon (south Brittany, France) over the last 10,000 years. *The Holocene*, 24, 6, 679-688.

**Goubert** et al., publications en cours.



---

#### **IV.7. Les éléments traces métalliques dans les environnements littoraux du Morbihan**

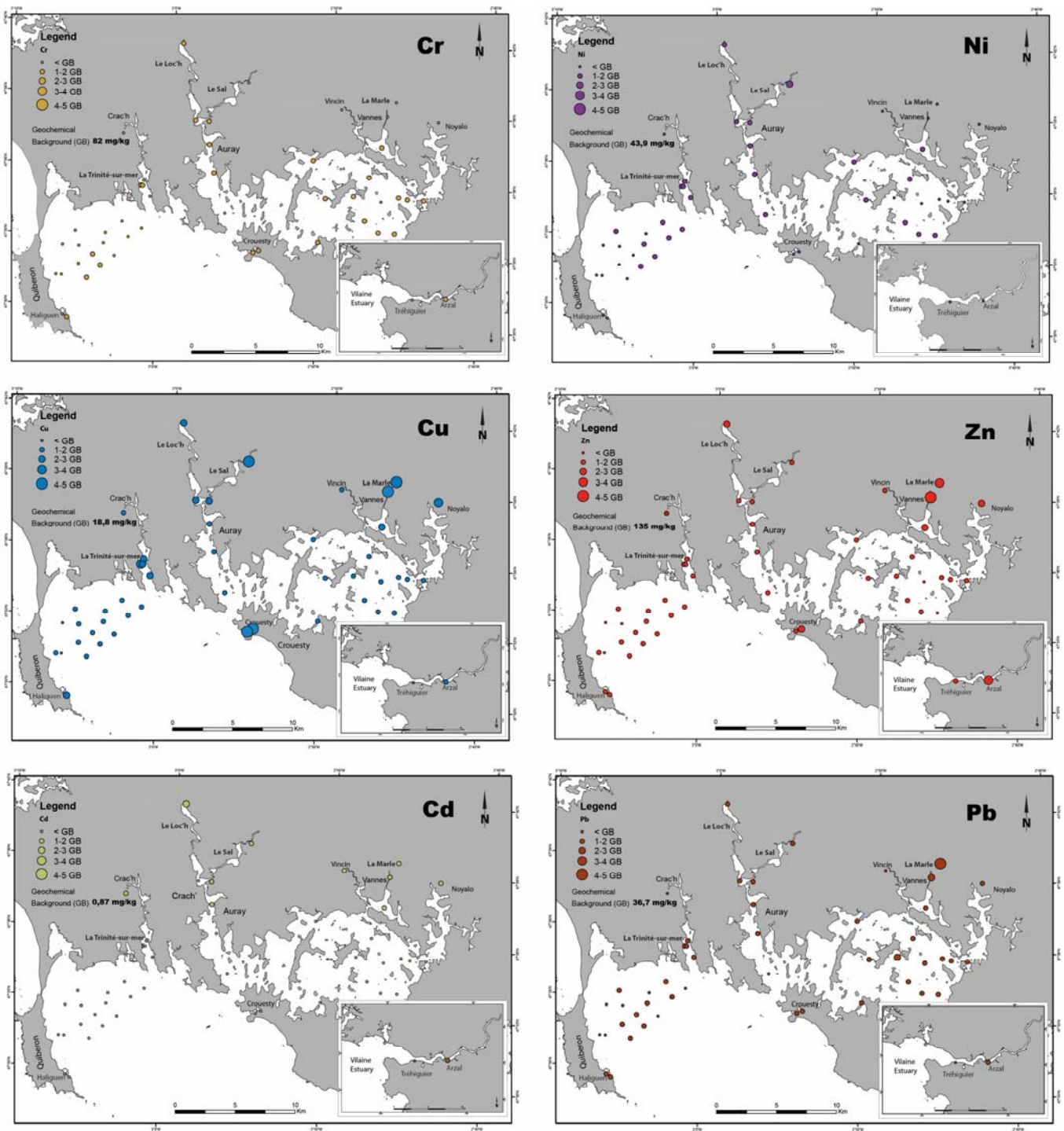
Deux thèses sur les éléments traces métalliques (ETMs) des sédiments de surface des littoraux morbihannais ont été pilotées par le laboratoire : Ong Meng Chuan encadré par D. Menier de 2009 à 2012 et Joselyn Jimenez de 2012 à 2015 encadrée par moi-même. L'objectif de la première étude était de mieux comprendre la distribution des ETMs dans les sédiments de surface de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan. La seconde avait pour objectif de compléter cette étude en continuant le suivi de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan et en comparant avec des échantillons de 5 000 ans d'une carotte du Golfe du Morbihan pour établir un indice d'enrichissement par rapport à un fond géochimique local. De plus, les sédiments des sources potentielles ont été échantillonnés : dans les rivières (parties amont en eau douce), dans l'estuaire de la Vilaine et dans les différents ports. Enfin, l'accent a été mis dans cette thèse sur la spéciation solide des ETMs dans les différentes fractions du sédiment (carbonates, matières organiques/sulfures et oxydes) et sur la notion de biodisponibilité (fraction HCl-soluble). Parallèlement, étant expert pour l'envasement et le devenir des produits de dragage pour le CD 56 et pour la préfecture, il a été possible de mieux caractériser les ETMs spécifiques des ports à partir des analyses réalisées pour les projets de travaux de dragage.

##### IV.7.a. Distribution des ETMs dans les sédiments de surface du Morbihan

Les ETMs présentés sont ceux classiquement analysés dans les études sur les contaminations métalliques : Cr, Ni, Cu, Zn, Cd et Pb (Figure 86). Les teneurs ne sont pas exprimées en mg/kg, mais par rapport aux valeurs du fond géochimique local (GB : Geological Background) indiquant un facteur d'enrichissement.

- ✓ Le chrome et le nickel ne montrent pas d'enrichissement particulier dans les sédiments (max. 2 fois le GB pour le Ni dans le port de la Trinité).
- ✓ Le cuivre ne montre pas d'enrichissement pour la Baie de Quiberon et le Golfe du Morbihan. En revanche, il est fortement enrichi dans les sédiments des ports et des rivières (max. 5 fois le GB). Ces enrichissements correspondent aux usages agricoles et domestiques pour les rivières et dans les peintures antisalissures pour les ports.
- ✓ Concernant le zinc, les enrichissements sont moyens sur l'ensemble de la zone avec certaines zones plus riches dans le secteur de Vannes (rivière et port). Le zinc est associé à toutes les activités métallurgiques, aux infrastructures métalliques des ports et aux coques des bateaux.
- ✓ Les concentrations en cadmium sont globalement similaires à celles du GB.
- ✓ Les teneurs en plomb montrent peu d'enrichissement excepté pour le port de Vannes.

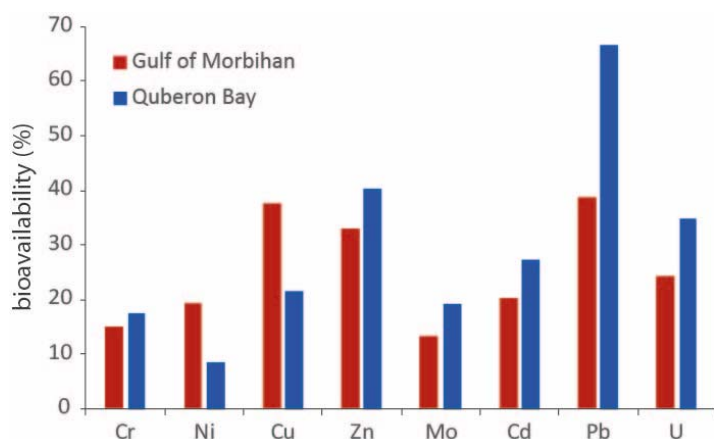
Les enrichissements en ETMs des sédiments des rivières et des ports correspondent à ce que l'on trouve classiquement dans ce type de configuration (Jimenez, 2016).



**Figure 86. Distribution des concentrations totales en ETMs (par rapport au fond géochimique) dans les sédiments de surface des ports, des rivières, de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016).**

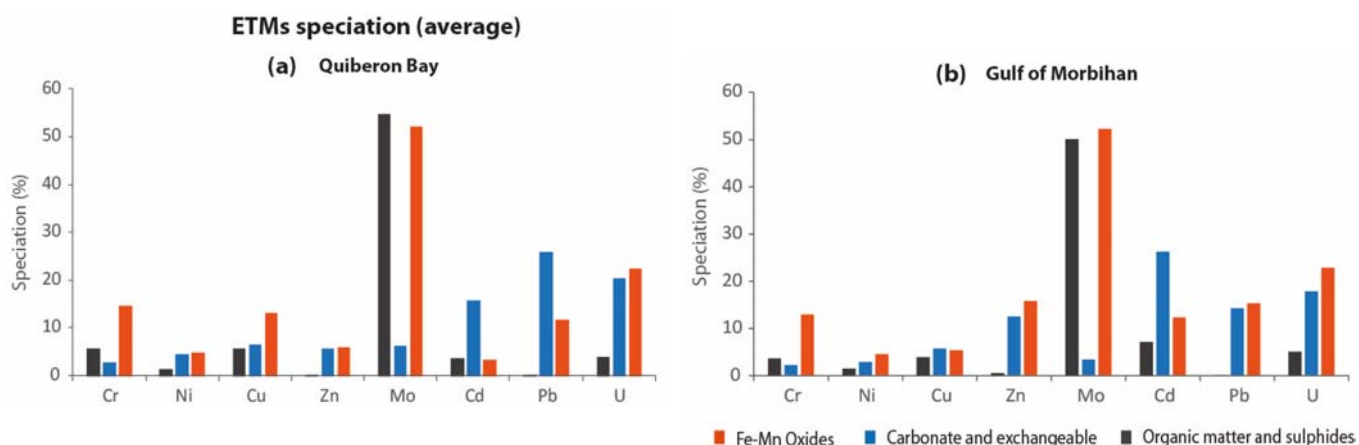
#### IV.7.b. Biodisponibilité et spéciation solide des ETMs

Malgré la distinction physiographique nette entre les deux systèmes Baie de Quiberon et Golfe du Morbihan, l'un est une baie ouverte avec une sédimentation sableuse, l'autre un estuaire complexe confiné vers l'est à sédimentation silto-argileuse, les teneurs en ETMs sont similaires. En revanche la biodisponibilité (fraction HCl-soluble) pour certains ETMs en Baie de Quiberon est supérieure à celle du Golfe du Morbihan (Figure 87) : pour le Zn, Cd et Pb, ainsi que pour le Mo et l'U qui sont des indicateurs de phases hypoxiques/anoxiques.



**Figure 87. Pourcentage moyen de biodisponibilité des ETMs dans les sédiments de surface de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016).**

Concernant la spéciation (Figure 88), certains métaux présentent les mêmes comportements, quel que soit le site : Cr, Ni, Zn, Mo et U. Les métaux sont principalement associés à la fraction oxyde-réductible, excepté pour le Cd classiquement associé aux carbonates. Pour le Pb, il est principalement associé aux carbonates à Quiberon et il se répartit à parts égales entre la fraction carbonatée et les oxydes dans le Golfe. Dans les sédiments des deux sites, la fraction oxydable (matières organiques/sulfures) est la moins réactive, à l'exception du Mo, qui présente une affinité pour les matières organiques et les composés sulfurés. La présence conjointe dans la fraction oxyde et matière organique du Mo semble montrer que des phénomènes d'hypoxie/anoxie sont possibles dans les sédiments des deux sites.



**Figure 88. Représentation (en pourcentage) de la spéciation moyenne des ETMs dans les sédiments de surface de (a) la Baie de Quiberon et du (b) Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016).**

#### IV.7.c. Les ETMs dans les ports du Morbihan

Quatre campagnes de mesures ont été menées par J. Jimenez dans six ports (Figure 89) afin d'estimer une potentielle variation temporelle des concentrations en fonction de la saison (avril 2013, sept. 2013, février 2014 et juillet 2014). Les valeurs d'avril 2013 ont été comparées aux seuils réglementaires N1 et N2 (Figure 90) définis par le groupe GEODE (Groupe d'Étude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement) sur la fraction inférieure à 2 mm pour la gestion des sédiments de dragage. L'ensemble des données acquises en 2013-2014 sont comparées aux résultats des analyses réalisées en 2003, 2006 et 2010 pour les projets de dragage des ports, sauf pour Vannes (Figure 91). Parmi ces projets, seul le dragage du port de la Trinité a été réalisé en 2009 et 2010.

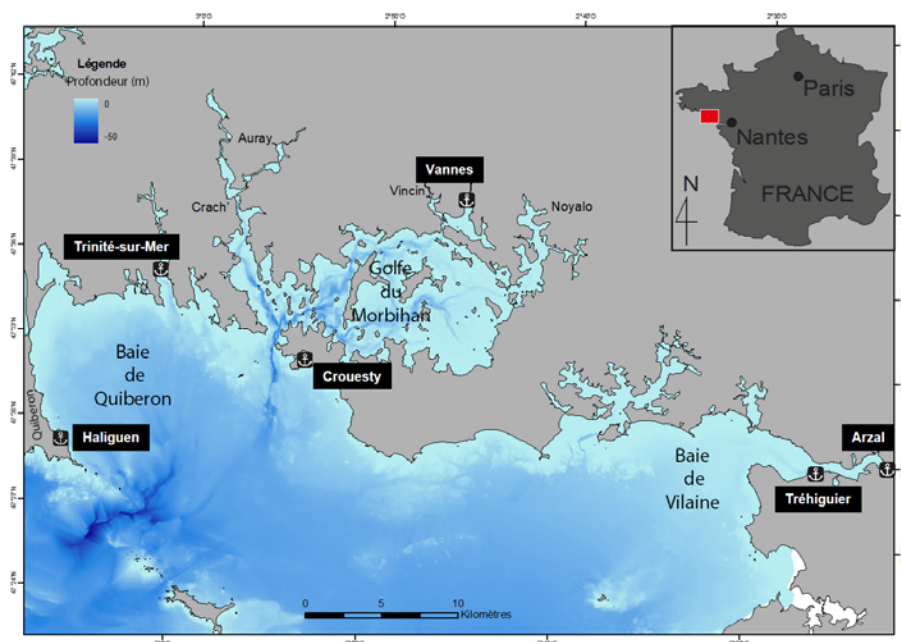


Figure 89. Localisation des ports étudiés (Jimenez, 2016).

Les valeurs des seuils N1 ont été définies à partir de l'ensemble des données disponibles dans les ports français à la fin des années 1990 (Alzieu et al., 1999), les seuils N2 sont les valeurs de N1 multipliées par 2.

Le fond géochimique du Cr est proche du seuil N1. Alors que pour d'autres métaux (Cu, Zn, Cd et Pb), les fonds géochimiques sont largement inférieurs au seuil N1 (divisés par 2). Seul, le fond géochimique du Ni est légèrement supérieur au seuil N1 (Figure 90). Cette donnée est à confirmer, puisqu'un dépassement du seuil N1 peut justifier une mise à terre des sédiments de dragage au lieu d'un clapage en mer. Les tendances de la Figure 90 sont résumées dans le Tableau 7.

Tableau 7. Synthèse des concentrations en EMTs de six ports par rapport aux seuils N1/N2.

	Haliguen	Trinité	Crouesty	Vannes	Tréhiguier	Arzal	Légende
Cr	Cr	Cr	Cr			Cr	> N2
Ni		Ni	Ni			Ni	>> N1
Cu	Cu	Cu	Cu	Cu			± N1
Zn			Zn	Zn		Zn	< N1
Cd				Cd		Cd	
Pb				Pb			
Rmq	Darses	Port de petit estuaire Dragage et clapage en 2009/2010	Darses	Mise à terre des sédiments	Port en estuaire à forte sédimentation et à fort renouvellement de l'eau	Port en eau douce	

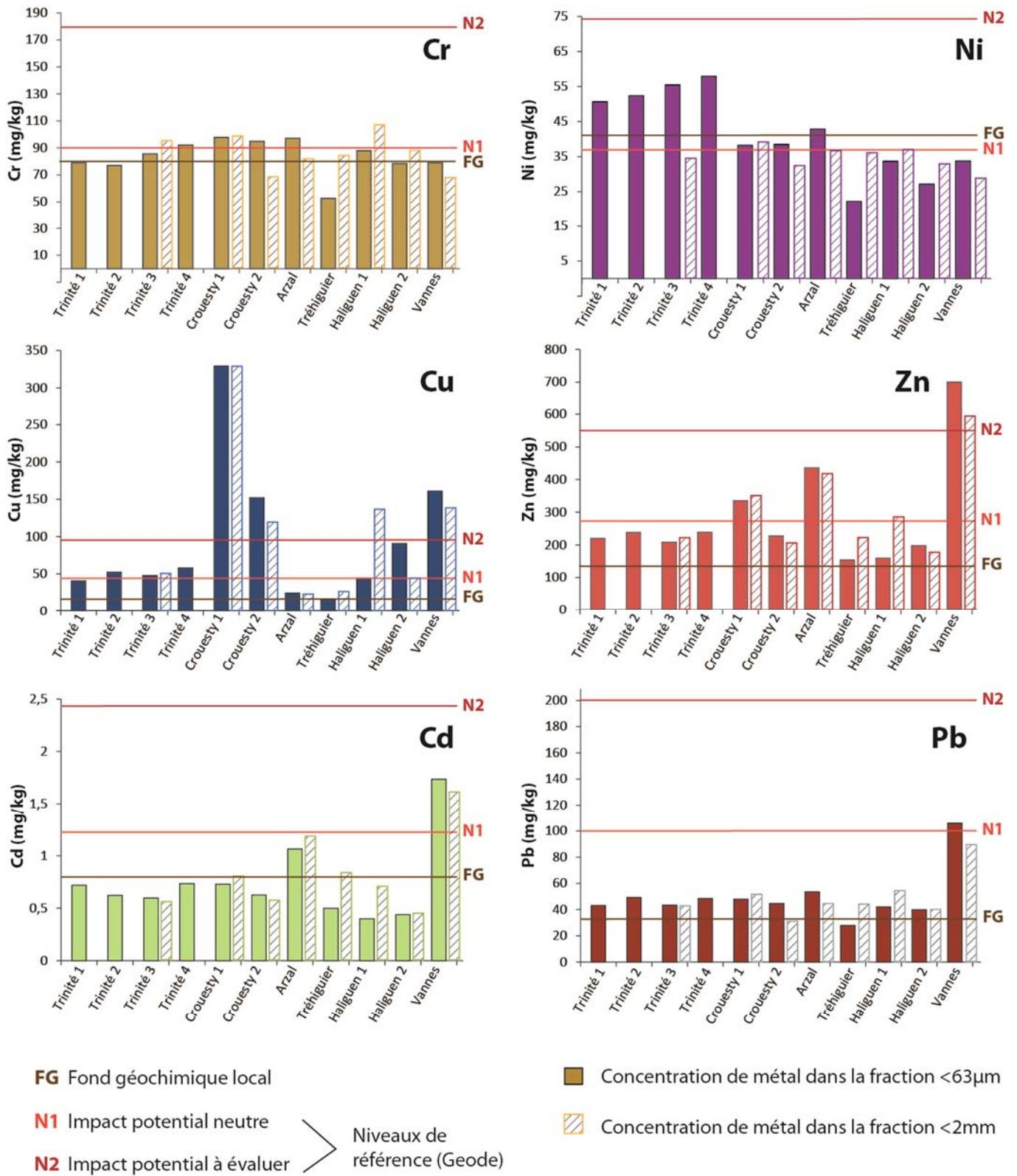


Figure 90. Concentrations en ETMs dans la fraction <63 µm et <2 mm des sédiments de surface des ports en avril 2013 (Jimenez, 2016).

L'analyse temporelle des données disponibles depuis 2003 pour tous les ports, sauf Vannes, permet de mettre en évidence des fluctuations différentes selon l'élément et le port (Figure 91).

Par exemple, la forte concentration en Ni dans le port de la Trinité ne s'observe que pour le prélèvement d'avril 2013 : les valeurs suivantes sont proches des valeurs mesurées en 2006 avant le dragage de 2009/2010. À l'opposé, les faibles valeurs obtenues pour Tréhiguier en avril 2013 sont les plus basses de la série de mesures depuis 2003 et les valeurs suivantes sont très variables, traduisant peut-être un effet saisonnier. Deux ports présentent d'importantes variations : le Crouesty (port à darses confinées) et Arzal (en eau douce). Tous les métaux présentent des fluctuations importantes au moins pour un port.

Le jeu de données est trop restreint pour pouvoir proposer des schémas de comportements. Il serait intéressant de poursuivre les suivis afin de mieux comprendre la dynamique de chaque métal et des cocktails de métaux dans les différentes configurations de ports.

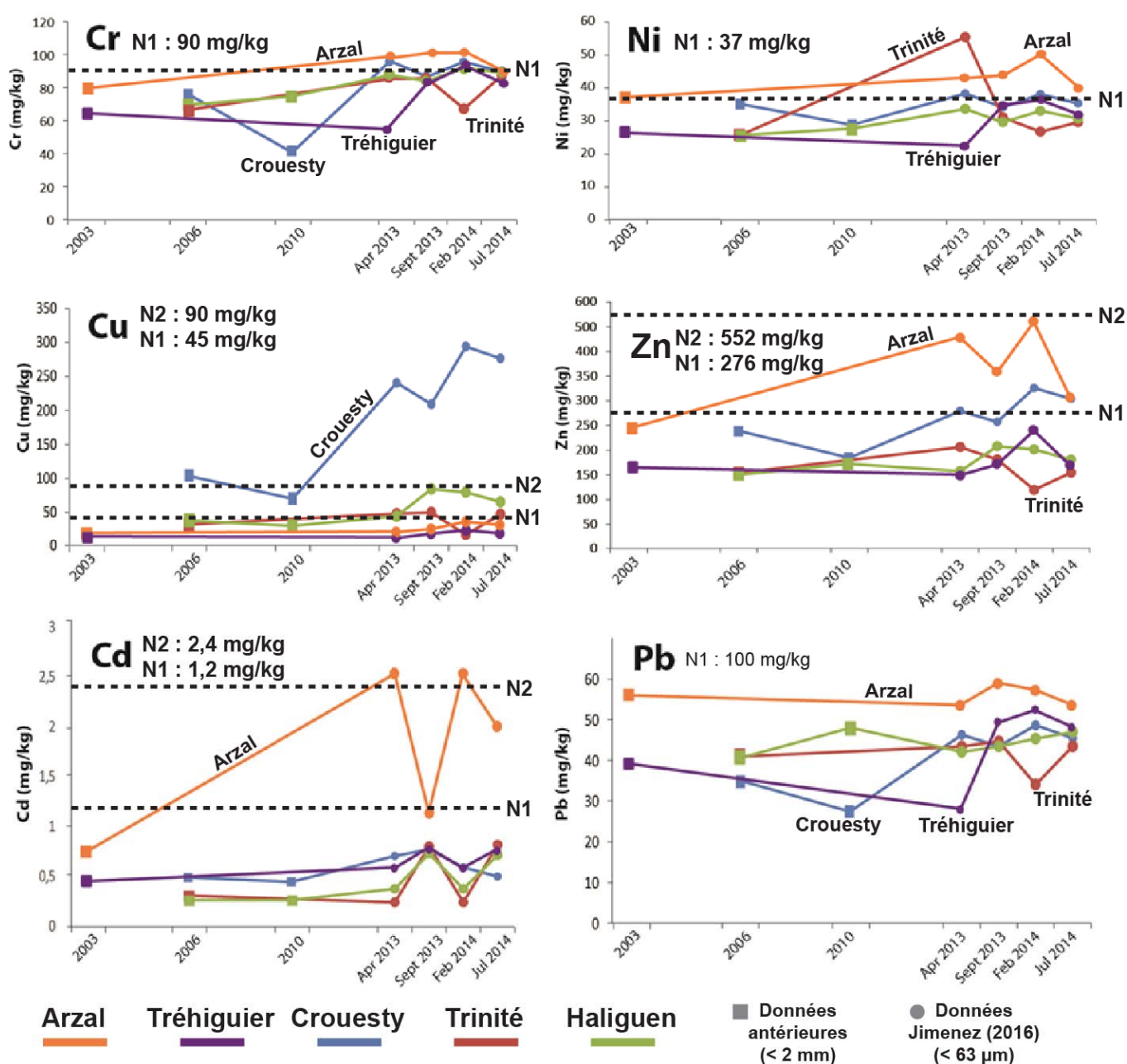
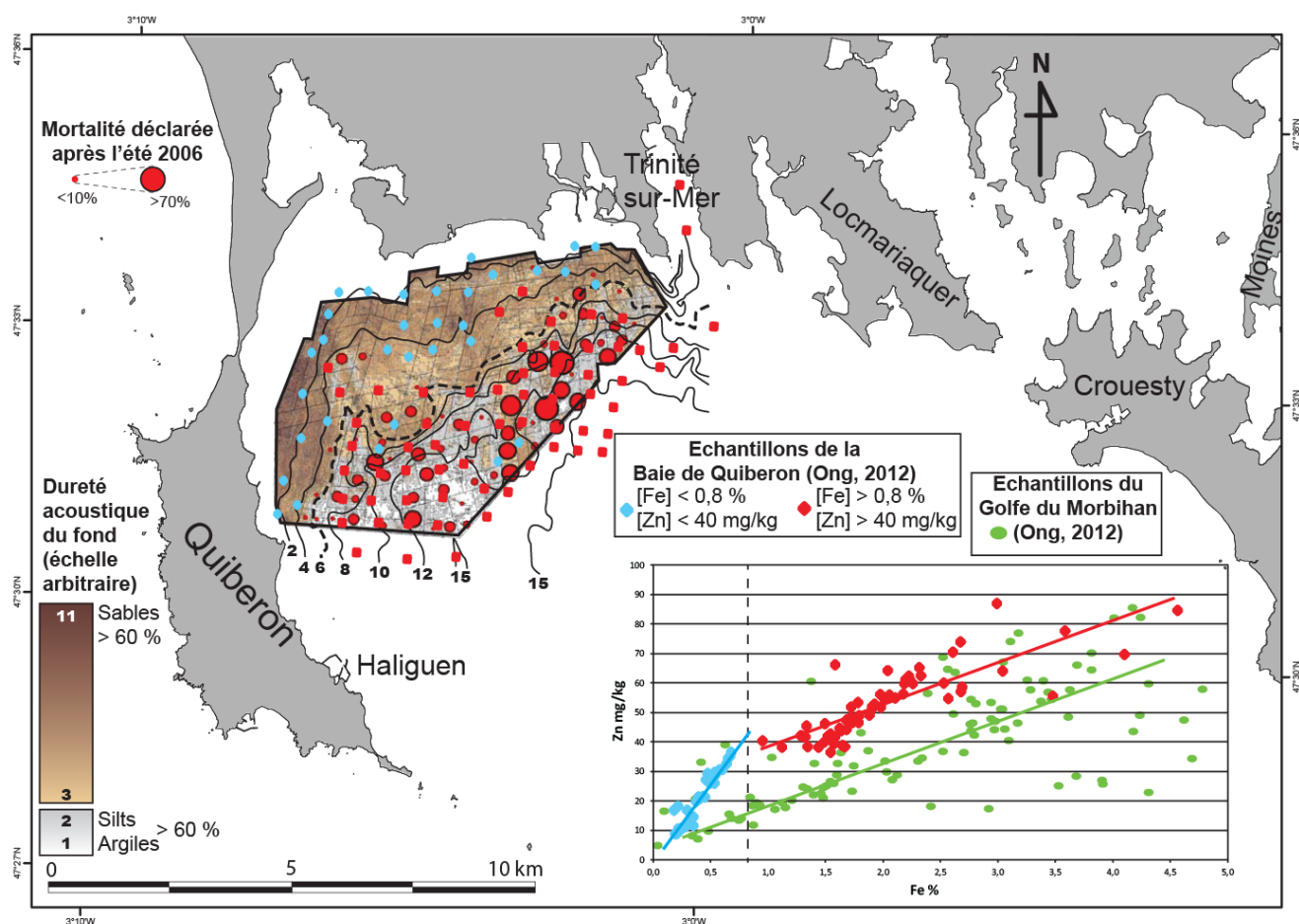


Figure 91. Évolution temporelle des concentrations en ETMs de cinq ports morbihannais (modifiée d'après Jimenez, 2016).

#### IV.7.d. Les ETMs en Baie de Quiberon, les foraminifères et la mortalité des huîtres

Le secteur ostréicole de la Baie de Quiberon a donc été étudié dans le cadre de différentes études : foraminifères/huîtres (programme RISCO) et éléments traces métalliques (Ong, 2012 et Jimenez, 2016). Dans le cadre de la thèse de Ong (2012), les teneurs en certains éléments majeurs comme le fer ont été analysés. Classiquement, les concentrations de certains métaux présentent des corrélations fortement positives : c'est le cas du fer avec le zinc, le cuivre, le lithium, le béryllium, le cobalt, le magnésium (Ong, 2012). Mais, dans le cas du fer et du zinc en Baie de Quiberon, le diagramme montre deux parties (Figure 92) : une première partie pour les concentrations en fer et en zinc respectivement inférieures à 0,8 % et à 40 mg/kg [points bleus] et une seconde partie pour les concentrations supérieures [points rouges], les deux droites de corrélations ayant des pentes très différentes. Si on compare avec les échantillons du Golfe du Morbihan [ronds verts], analysés également par Ong (2012), il semble que les échantillons de la Baie de Quiberon sont enrichis en zinc par rapport aux teneurs en fer.

La représentation cartographique montre que la zone à fortes concentrations en fer et en zinc correspond à la zone des mortalités déclarées en 2006 (Figure 92).



**Figure 92. Les teneurs en fer et en zinc des sédiments de surface de la Baie de Quiberon : Corrélations entre les teneurs en fer et en zinc et comparaison avec le Golfe du Morbihan ; Localisation des échantillons à faibles/fortes concentrations en fer en Baie de Quiberon ; Comparaison avec les zones à fortes mortalités d'huîtres (Goubert, en prép.).**

De plus, la spatialisation de ces résultats montre que les échantillons à faibles concentrations en fer sont localisés au niveau du secteur sableux le moins profond et les échantillons les plus riches en fer et surtout en zinc sont au niveau de la zone silteuse la plus profonde. Les grandes caractéristiques des deux secteurs, profond et peu profond sont présentées dans le tableau suivant.

**Tableau 8. Les grandes caractéristiques de la partie peu profonde et profonde du secteur ostréicole de la Baie de Quiberon.**

	Zone peu profonde	Zone profonde
Profondeur	2 à 5,5 m	6,5 à 9,5 m
Substrat	Sableux, sablo-silteux envasé	Silteux
Foraminifères	Nécessitant une bonne ventilation et de la matière organique fraîche	Tolérant faible [O <sub>2</sub> ] et forte [TOC]
[Fe]	< 0,8 %	> 0,8 %
[Zn]	< 40 mg/kg	> 40 mg/kg
Rapport [Zn]/[Fe]	52	27
Mortalités		Estivale 2006 + naissains au contact du substrat 2010

Il serait intéressant d'explorer plus en profondeur l'ensemble des données disponibles pour mieux comprendre les relations entre les concentrations en ETMs, la présence des foraminifères, les mortalités des huîtres et les phénomènes d'hypoxie.

**Porteur ou co-porteur de programmes de recherche :**

- > Thèse de *Joselyn Jimenez* (encadrement par *E. Goubert* et *D. Menier*, CD56/Région Bretagne)
- > *Devenir des produits de dragage des ports* (*E. Goubert*, expert pour le CD56 et la préfecture)

**Travaux réalisés**

- Jimenez J., **Goubert E.**, Labeyrie L., Coynel A., Menier D., 2014. Quantification of MTE in surface sediments of Morbihan Coast (South Brittany, France): A preliminary approach for determination of sources and dynamics. EGU-2014, Geophysical Research Abstracts, vol.16, EGU2014-7521-2.
- Jimenez J., **Goubert E.**, Labeyrie L., Coynel A., Menier D., 2014. Assessment of reactivity and mobility of MTE in surface sediments in Morbihan Coast (South Brittany, France). Goldschmidt, june 2014, California, Sacramento.
- Jimenez J., **Goubert E.**, Labeyrie L., Coynel A., Menier D., 2015. Spatial and seasonal variability of reactive metals in surface sediments of the Morbihan coast (South Brittany). 13th International Estuarine Biogeochemistry Symposium, 2015, Bordeaux, France.

+ 4 Notes de synthèses (2012, 2014, 2015, 2016) de *E. Goubert* pour le CD56 et les comités de « Suivis des dragages des ports du Morbihan et du devenir des sédiments de dragages ».



---

## V. Conclusions et perspectives

La rédaction de l'HDR est un moment privilégié pour mettre en perspective l'ensemble des activités développées depuis les premiers pas dans le monde universitaire. A partir de 1990, j'ai pu développer des axes de recherche et accompagner des étudiants et des collègues dans de nombreux programmes. A la lumière de ces quelques pages, deux fils conducteurs se sont toujours entremêlés « LE LITTORAL » et « LE FORAMINIFÈRE », non pas pour une collection, pour la classification ou pour les mettre en aquarium, mais comme une éthologue, une ethnologue, une environnementaliste... comme une enquêtrice : s'imprégner de la scène et interroger les protagonistes. Depuis plus de 10 ans, un troisième fil conducteur est venu renforcer les deux autres : les interactions avec « LES ACTIVITÉS HUMAINES ».

Suite à cette HDR de nouvelles perspectives s'ouvrent de manière à maintenir les trois fils conducteurs entremêlés. Voici quatre projets à court, moyen et long termes.

- **À très court terme**

Le premier objectif à court terme est de terminer la rédaction des articles (Goubert, en prép.) afin de valoriser l'ensemble des travaux menés depuis plusieurs années.

- **Les dynamiques des vasières inter- et subtidales : hiérarchisation des facteurs forçant en contextes climatiques différents**

Ce projet s'appuie sur l'étude comparée du fonctionnement des vasières de Guyane et de celle de la baie de Vilaine. Les cyclicités observées répondent à des forçages différents à fréquences et amplitudes variées : saison (sèche/humide), marée, régime des vents, houle, oscillations climatiques différentes (ITCZ, ENSO, NAO, AMO...). Dans les deux cas, une approche actuelle/passée pourra être menée : suivis bathymétriques et altimétriques des vasières en relation avec les facteurs forçants et études de carottes (granulométrie, foraminifères...). Depuis 18 000 ans, la hiérarchisation des facteurs forçant a changé au fil de la transgression, de la stabilisation du niveau marin, de la sédentarisation de l'Homme, des aménagements humains, des changements climatiques actuels... L'enjeu est de mieux cerner dans quel contexte un facteur est dominant ou négligeable. De plus, un facteur peut toujours être dominant, mais ces caractéristiques ont pu changer : sens et vitesse du vent ; orientation, longueur d'onde et amplitude de la houle ; fréquence des forts coefficients de marée ; nature du stock sédimentaire... Cette hiérarchisation des facteurs forçant et les variations de leurs caractéristiques sont importantes à prendre en compte dans le cadre des reconstitutions paléoenvironnementales et surtout dans les estimations des évolutions futures de nos littoraux.

---

**Compétences développées précédemment** : ce projet repose principalement sur les compétences acquises dans le cadre de l'étude du fonctionnement morphosédimentaire de l'estuaire et de la Baie de Vilaine (IV.3. La baie et l'estuaire de la Vilaine de 8 000 ans à nos jours : synthèse, relevés et modélisations, page 87 et suivantes).

---

**Collaborations et partenaires envisagés** : LGO, dont E. Gensac ; USR LEEISA-Cayenne. Il s'agit d'un projet porté par Erwan Gensac qui a débuté en juin 2017.

- **Foraminifères benthiques, eutrophisation/hypoxie, fluctuations climatiques et éléments traces métalliques en Bretagne Sud : actuel et passé**

A la lumière des différents travaux sur la Baie de Quiberon (Ong, 2012 ; Mazurier et al., 2013 ; Stanisière et al., 2013), il a été mis en évidence les interactions entre les paramètres morphosédimentaires, les conditions eutrophes/hypoxiques, les assemblages de foraminifères, les mortalités des huîtres et les concentrations en éléments métalliques traces et majeurs. Depuis 2014, l'étude DIETE (Diagnostic ÉTendu de l'Eutrophisation en Baie de Vilaine) pilotée par Ifremer, a été initiée au niveau de la zone où le risque d'hypoxie était le plus fort d'après la modélisation faite par Ifremer dans le cadre de RISCO. Il a été montré dans le cas du Golfe du Mexique (Turner et al., 2005) que l'hypoxie avait progressé depuis environ 1 000 ans en réponse aux développements de l'agriculture et aux modifications de l'occupation et des usages des sols.

Parallèlement, les études des foraminifères benthiques des carottes présentées ici ont très souvent révélé la possibilité d'apporter des informations sur les enregistrements des modifications environnementales (dégradation/restauration) en relation ou non avec les fluctuations climatiques.

Ce premier projet s'articule donc autour de deux approches avec différents objectifs :

Approches méthodologiques	Objectifs
Suivis actuels : des teneurs en oxygène, en matières organiques et nutriments ; des assemblages de foraminifères et des populations d'huîtres ; des teneurs en ETMs des sédiments, des tests de foraminifères et des coquilles d'huîtres	Fonctionnement actuel des environnements eutrophes/hypoxiques. Enregistrements des phases d'eutrophisations et d'hypoxies par les assemblages de foraminifères, par les teneurs en EMTs des sédiments, des tests et des coquilles. Établissement de nouveaux indices biotiques.
Études de carottes (déjà acquises et à acquérir) : application de la méthode rang-fréquence et des approches morphofonctionnelles et statistiques ; analyses des ETMs des sédiments et des tests de foraminifères	Reconstitutions paléoenvironnementales. Historique des eutrophisations et des hypoxies. Enregistrements des fluctuations climatiques (RCC, pulsations de la transgression, occurrences des tempêtes, des crues... Fonds géochimiques pour les teneurs en ETMs

**Compétences développées précédemment** : ce projet repose sur la grande majorité des approches et des expériences précédentes, aussi bien sur les études actuelles que sur les études paléoenvironnementales et paléoclimatiques.

**Collaborations et partenaires envisagés** : LGO, dont D. Menier ; M. Elliott et A. Baltzer (U. Nantes) ; B. Tessier (U. Caen) ; A. Coynel (U. Bordeaux) ; Ifremer Nantes et Brest... Il s'agit d'un projet structurant pour le laboratoire à l'échelle du « Grand-Ouest » pour fédérer autour d'un programme l'ensemble des partenaires avec lesquels j'ai déjà travaillé sur des projets séparés. Je souhaite être porteur de ce projet et de l'initier en 2017-2018 en sollicitant des financements de la part de l'AELB, du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire pour recruter un post-doc, puis de poursuivre dans le cadre d'un EC2CO accompagné par une demande de financement de thèses. J'envisage de réaliser ce programme dans les 6 ans à venir, puis de poursuivre les opérations de suivis actuels afin de pérenniser les missions d'observations développées depuis le début des années 2000 au laboratoire.

- 
- **Rôles des forçages naturels et anthropiques dans le fonctionnement des estuaires et des deltas indiens**

Il s'agit d'un projet en émergence avec Muthuvairavasamy Ramkumar (Periyar University, India). L'objectif est de caractériser le fonctionnement des différents deltas présents sur toute la côte orientale de l'Inde, du delta du Gange jusqu'à l'extrémité Sud de l'Inde. Comme précédemment l'un des buts est de hiérarchiser les facteurs forçant : éloignement de la source de fractions fines du Gange, flux sédimentaires continentaux, orientation de la côte par rapport aux houles dominantes, régime des moussons, aménagements humains... Les principales approches méthodologiques seront les suivantes : bathymétrie, sismique, sédimentologie, distribution des foraminifères benthiques, études de carottes...

---

**Compétences développées précédemment** : ce projet repose sur les expériences acquises dans les différents estuaires que j'ai pu étudier aussi bien à partir des foraminifères qu'à partir de carottes.

---

**Collaborations et partenaires envisagés** : LGO, dont D. Menier ; Mu. Ramkumar (Periyar University, India). Ce projet va se construire progressivement au cours des 10 prochaines années avec la possibilité de co-encadrer des étudiants en Master et en thèse pour l'étude notamment des foraminifères.

- **Maintien des travaux en relation avec les activités humaines dans le Morbihan**

Les thématiques en lien avec les problèmes de conchyliculture, de dragages des ports, de teneurs en ETMs, de contaminations bactériologiques seront poursuivis en fonction des sollicitations des acteurs locaux.

---

**Compétences développées précédemment** : ce projet repose sur la grande majorité des approches et des expériences précédentes, aussi bien sur les études actuelles que sur les études paléoenvironnementales et paléoclimatiques.

---

**Collaborations et partenaires envisagés** : LGO, dont M. Sedrati, E. Gensac, D. Menier ; acteurs locaux. Il s'agit d'actions qui permettent au laboratoire de conserver un ancrage local et qui permettent également d'accompagner la formation des étudiants du Master Ingénierie et Gestion des Ressources Côtières et Littoral (LGO-UBO-UBS).

---

## VI. Références bibliographiques

- Alley R.B., Mayewski P.A., Sowers T., Stuiver M., Taylor K.C., Clark P.U., 1997. Holocene climatic instability; a prominent, widespread event 8,200 yr ago. *Geology*, 25, 6, 483-6.
- Alve E., Korsun S., Schönfeld J., Dijkstra N., Golikova E., Hess S., Husum K., Panieri G., 2016. Foram-AMBI: A sensitivity index based on benthic foraminiferal faunas from North-East Atlantic and Arctic fjords, continental shelves and slopes. *Marine Micropaleontology*, 122, 1-12.
- Alzieu C., Michel P., Chiffolleau J.F., Boutier B., Abarnou A., 1999. Contamination chimique des sédiments. In : *Dragages en environnement marin : État des connaissances – Comportements des polluants*, coord. Alzieu, Ifremer Ed., 69-107.
- Armynot du Châtelet E., 2003. Evaluation des possibilités d'utilisation des foraminifères comme bio-indicateurs de pollution dans les environnements paraliques. Doctorat Université Angers, 342 p.
- Arthuis R., Cyprien A.L., Batardy C., 2006. Les alluvions fossiles de la Loire et ses affluents entre Ancenis et Champtocé-sur-Loire (Loire Atlantique). Chronologie et stratigraphie des alluvions ; structuration de l'espace ligérien. *Aestuaria - Archéologie en Loire, actualité de la recherche dans les régions Centre et Pays de la Loire*, 12, 239-253.
- Arthuis R., Nauleau J.F., **Goubert E.**, Barbier-Pain D., Baudouin V., 2015. Reconstitution paléogéographique de la vallée de la Loire à Nantes depuis 8 000 ans. *PUR*, 22 p.
- Atlas de l'Environnement du Morbihan, 2010. <http://csem.morbihan.fr/atlas.php>
- Augier R., Menier D., Van Vliet-Lanoë B., Chauris L., Thinson I., Mougin B., Hallegouët B., avec la collaboration de Do Couto D., Turrillot P., Bellanger M., Goubert E., Perrot J., Gautier C., 2011. Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Vannes – Saint-Gildas-de-Rhuys (417). Orléans : BRGM, 263 p.
- Baltzer A., Walter-Simonet A.V., Mokeddem Z., Tessier B., Goubert E., Cassen S., Dikko J.A., 2014. Climatically-driven impacts on sedimentation processes in the Bay of Quiberon (south Brittany, France) over the last 10,000 years. *The Holocene*, 24, 6, 679-688.
- Barbaroux L., Duplax S., Visset L., 1980. Les dépôts du Quaternaire récent (Atlantique-actuel) et le remaniement flandrien du Weichsélien dans la région de Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 27, 61-85.
- Barbaroux L., Duplessy J.-C., Margerel J.-P., Visset L., 1974. Variations climatiques et sédimentologiques récentes (période Atlantique à actuel) dans l'estuaire de la Loire. Mise en évidence d'épisodes lagunaires. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris, série D*, 278, 573-576.
- Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G., Zindler A., 1990. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 345, 31.
- Benito G., Macklin M.G., Zielhofer C., Jones A.F., Machado M.J., 2015. Holocene flooding and climate change in the Mediterranean. *Catena*, 130, 13-33.
- Berkeley A., Perry C.T., Smithers S.G., Horton B.P., Taylor K.G., 2007. A review of the ecological and taphonomic controls on foraminiferal assemblage development in intertidal environments. *Earth-Science Reviews*, 83, 205-230.
- Bernhard J.M., 1986. Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits: Jurassic through Holocene. *Journal of Foraminiferal Research*, 16, 207-215.

- 
- Bernhard J.M., Sen Gupta B.K., 1999. Foraminifera of oxygen depleted environments. In: Sen Gupta, B.K. (Ed.), *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Press, London, 201-216.
- Bicchi, E., **Goubert E.**, Debenay, J.P., Armynot du Chatelet, E., 2002. How to characterise a paralic system: with total or with living foraminiferal assemblages ? *International Symposium on Foraminifera FORAMS 2002* (4-8 février 2002, Perth, Australie) p. 25.
- Biteau F., 1978. Morphologie du substratum et remplissage alluvionnaire de la vallée de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire. DEA, Université de Nantes, 47 p.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani, G., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278, 1257-1266.
- Bond G.C., Showers W., Elliot M., Evans M., Lotti R., Hajdas I., Bonani G., Johnson S., 1999. The North Atlantic's 1e2 kyr climate rhythm: relation to Heinrich events, Dansgaard/Oeschger cycles and the little ice age. *Geophysical Monograph Series*, 112, 35-58.
- Borja A., Franco J., Pérez P., 2000. A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments. *Marine Pollution Bulletin*, 40, 12, 1100-1114.
- Bouchet V.M.P., 2007. Dynamique et réponse fonctionnelle des foraminifères et de la macrofaune benthiques en zone ostréicole dans les Pertuis charentais. Doctorat Université Angers, 404 p.
- Bouchet V.M.P., Debenay J.P., P.G. Sauriau, Radford-Knoery J., Soletchnik P., 2007. Effects of short-term environmental disturbances on living benthic foraminifera during the Pacific oyster summer mortality in the Marennes-Oléron Bay (France). *Marine Environmental Research*, 64, 358-383.
- Bouchet V.M.P., Alve E., Rygg B., Telford R.J., 2012. Benthic foraminifera provide a promising tool for ecological quality assessment of marine waters. *Ecological Indicators*, 23, 66-75.
- Cassen S., Baltzer A., Lorin A., Fournier J., Sellier D., 2011. Submarine Neolithic stone rows near Carnac (Morbihan), France: Preliminary results from an acoustic underwater survey. In: Benjamin J, Bonsall C, Pickard C et al. (eds) *Submerged Prehistory Archeology*. Oxford Books, 99-110.
- Cattaneo A., Steel R.J., 2003. Transgressif deposits: a review of their variability. *Earth Science Reviews*, 62, 187-228.
- Chao A., Shen T.J., 2003. Nonparametric estimation of Shannon's index of diversity when there are unseen species in sample. *Environmental and Ecological Statistics*, 10, 429-443.
- Chaumillon E., Tessier B., Reynaud J.Y., 2010. Stratigraphic records and variability of incised valleys and estuaries along French coasts. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 181, 2, 75-85.
- Ciffroy P., Reyss J.L., Siclet F., 2003. Determination of the residence time of suspended particles in the turbidity maximum of the Loire estuary by <sup>7</sup>Be analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57, 553-568.
- Clauzon G., Suc J.P., Gautier F., Berger A., Loutre M.F., 1996. Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis, controversy resolved? *Geology*, 24, 363-366.
- Corliss B.H., Chen C., 1988. Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications. *Geology*, 16, 716-719.
- Crave A. (dir), 2009. Inondations dans le bassin de la Vilaine : paramètres hydrogéomorphologiques et flux terrigènes. Rapport pour l'IAV, 245 p.

- 
- Crutzen P.J., Stoermer E.F., 2000. The “Anthropocene”. *Global Change, NewsLetter, The International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP): A Study of Global Change*, 41, 17-18.
- Cyprien A.L., 2002. Chronologie de l’interaction de l’homme et du milieu dans l’espace central et aval de la Loire (Ouest de la France). Doctorat Université de Nantes, 258 p.
- Cyprien A.L., Visset L., Carcaud N., 2004. Evolution of vegetation landscapes during the Holocene in the central and downstream Loire basin (Western France). *Vegetation History Archaeobotany*, 13, 181-196.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R., 1992. Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 6, 102-111.
- Dalrymple R.W., Choi K., 2007. Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-Science Reviews*, 81, 3-4, 135-174.
- Darling K.F., Schweizer M., Knudsen K.L., Evans K.M., Bird C., Roberts A., Filipsson H.L., Kim J.H., Gudmundsson G., Wade C.M., Sayer M.D.J., Austin W.E.N., 2016. The genetic diversity, phylogeography and morphology of Elphidiidae (Foraminifera) in the Northeast Atlantic. *Marine Micropaleontology*, 129, 1-23.
- Debenay J.P., 1990. Recent foraminiferal assemblages and their distribution related to environmental stress in the paralic environments of West Africa (Cape Timiris to Ebrie Lagoon). *Journal of Foraminiferal Research* 20, 267-282.
- Debenay J.P., Beck-Eichler B., Fernandez-Gonzalez M., Mathieu R., Bonetti C., Duleba W., 1996. Les foraminifères paraliques des côtes d’Afrique et d’Amérique du Sud, de part et d’autre de l’Atlantique : comparaison, discussion. In: Jardiné S., de Klasz I., Debenay J.P. (Eds.), *Géologie de l’Afrique et de l’Atlantique sud. Comptes rendus des Colloques de Géologie d’Angers*, 16-20 juillet 1994. Éditions Elf-Aquitaine, Paris, 463-472.
- Debenay J.P., Bénéteau E., Zhang J., Stoff V., Geslin E., Redois F., Fernandez-Gonzalez M., 1998. *Ammonia beccarii* and *Ammonia tepida* (Foraminifera): morphofunctional arguments for their distinction. *Marine Micropaleontology*, 34, 235-244.
- Debenay J.P., Millet M., Angelidis M., 2005. Relationships between foraminiferal assemblages and hydrodynamics in the Gulf of Kalloni (Greece). *Journal of Foraminiferal Research*, 35, 327-343.
- Debenay J.P., Luan B.T., 2006. Foraminiferal assemblages and the confinement index as tools for assessment of saline intrusion and human impact in the Mekong Delta and neighbouring areas (Vietnam). *Revue de micropaléontologie*, 49, 74-85.
- Debenay J.P., Bicchi E., **Goubert E.**, Armynot du Châtelet E., 2006. Spatio-temporal distribution of benthic foraminifera in relation with estuarine dynamics (Vie estuary, Vendée, W France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67, 181-197.
- Debret M., Bout-Roumazeilles V., Grousset F., Desmet M., McManus J.F., Massei N., Sebag D., Petit J.R., Copard Y., Trentesaux A., 2007. The origin of the 1500-year climate cycles in Holocene North-Atlantic records. *Climate of the Past*, 3, 569-575.
- Delaine M., Armynot du Châtelet E., Bout-Roumazeilles V., Goubert E., Le Cadre V., Recourt P., Trentesaux A., Arthuis R., 2015. Multiproxy approach for Holocene paleoenvironmental reconstructions from microorganisms (testate amoebae and foraminifera) and sediment analyses: The infilling of the Loire Valley in Nantes (France). *The Holocene*, 25, 407-420.

- 
- Devoy R.J.N., 1982. Analysis of the geological evidence for Holocene sea-level movements in southeast England. *Proceedings of the Geologists' Association*, 93, 65-90.
- Ehlers J., Gibbard P.L., 2004. *Quaternary Glaciations - Extent and Chronology Part I: Europe*. Elsevier, Amsterdam, 488 p.
- Elliott M., 2011. Marine science and management means tackling exogenic unmanaged pressures and endogenic managed pressures – A numbered guide. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 651-655.
- Estournes G., Menier D., Guillocheau F., Le Roy P., Paquet F., Goubert E., 2012. The paleo-Etel River incised valley on the Southern Brittany inner shelf (Atlantic coast, France): Preservation of Holocene transgression within the remnant of a middle Pleistocene incision? *Marine Géology*, 329-331, 75-92.
- Fairbanks R.G., 1989. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- Fairbridge R.W., 1961. Eustatic Changes in Sea Level. *Physics and Chemistry of the Earth*, 4, 99-185.
- Frénod E., **Goubert E.**, 2007. A first step towards modelling confinement of paralic ecosystems. *Ecological Modelling*, 200, 139-148.
- Frontier, S., 1985. Diversity and structure in aquatic ecosystems. *Oceanography and Marine Biology. An Annual Review*, 23, 253-312.
- Garcin M., Farjanel G., Giot D., 2001. Eléments radiochronologiques et palynologiques sur les alluvions du lit majeur de la Loire (Val d'Avaray, Loir-et-Cher, France). *Quaternaire*, 12, 69-88.
- Goubert E.**, 1997a. Le groupe *Elphidium excavatum* (Terquem) : stratégie adaptative des formes *lidoensis* et *selseyensis* en Baie de Vilaine (France) et lignée évolutive. *Geobios*, 21, 303-310.
- Goubert E.**, 1997b. Les *Elphidium excavatum* (Terquem), foraminifères benthiques, vivant en Baie de Vilaine d'octobre 1992 à septembre 1996 : morphologie, dynamique de population et relations avec l'environnement. Réflexions sur l'approche méthodologique, la lignée évolutive et sur l'utilisation en paléoécologie. Doctorat Université Nantes, 300 p.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Lacour D., 2000. Evolution de la biodiversité des foraminifères au cours du Messinien: exemple du bassin de Sorbas (Cordillères bétiques, SE Espagne). *RST 2000*, 18° (17-20 avril 2000, La Villette - Paris).
- Goubert E.**, 2000. Estimation de l'impact de la crise de salinité messinienne sur les foraminifères. "L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques", (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 9.
- Goubert E.**, Néraudeau D., Rouchy J.M., Lacour D., 2001. Foraminiferal record of environmental changes: Messinian of the Sorbas basin (Betic Cordillera, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 175, 61-78.
- Goubert E.**, Menier D., 2005. Evolution morphosédimentologique de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2003 : valorisation des campagnes bathymétriques. Convention d'étude IAV « Mission d'assistance à la tenue et à la valorisation des données bathymétriques de l'estuaire de la Vilaine », 20 p. et 7 volumes d'annexes.
- Goubert E.**, Mokkedem Z., Baltzer A., 2007. Une nouvelle utilisation des foraminifères pour les reconstitutions paléoenvironnementales: la méthode rang/fréquence appliquée à l'étude du

---

remplissage sédimentaire du Loch Sunart (NW, Ecosse) depuis 20 000 ans. 11ème Congrès Français de Sédimentologie (21-27 oct. 2007, Caen).

**Goubert E.**, Frénod E., Peeters P., Thuillier P., Vested H.J., Bernard N., 2010. The use of altimetric data (Altus) in the characterization of hydrodynamic climates controlling hydrosedimentary processes of intertidal mudflat : the Vilaine estuary case (Brittany, France). *Paralia*, 3, 6.17-6.31.

**Goubert E.**, Le Gall R., 2016. Analyse de la dynamique morphosédimentaire de l'estuaire de la Vilaine à différentes échelles temporelles. Rapport pour l'IAV, 29 p.

Grobois C., Meybeck M., Lestel L., Lefèvre I., Moatar F., 2012. Severe and contrasted polymetallic contamination patterns (1900–2009) in the Loire River sediments (France). *Science of the Total Environment*, 435-436, 290-305.

Guélorget O., Perthuisot J.P., 1983. Le domaine paraliq. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. *Travaux du Laboratoire de Géologie de l'ENS*, 16, 136 p.

Guilcher A., Allegouet B., 1991. Coastal dunes in Brittany and their management. *Journal of Coastal Research*, 7, 517-533.

Hayward B.W., Holzmann M., Grenfell H.R., Pawlowski J., Triggs C.M., 2004. Morphological distinction of molecular types in *Ammonia* towards a taxonomic revision of the world's most commonly misidentified foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 50, 237-271.

Jelgersma S., Oele E., Wiggers A.J., 1979. Depositional history and coastal development in The Netherlands and the adjacent North Sea since the Eemian. In: Schüttenhelm RTE and Wiggers AJ (eds) *The Quaternary History of the North Sea*, 2, 115-142.

Jimenez J., 2016. Comportement des éléments traces métalliques (ETMs) dans les sédiments de surface du Golfe du Morbihan et de la Baie de Quiberon (France) : distribution spatiale, spéciation, biodisponibilité et relation avec les sédiments des ports et rivières. Doctorat Université Bretagne Sud, 246 p.

Jones R.W., Charnock M.A., 1985. 'Morphogroups' of agglutinated foraminifera. Their life positions and feeding habits and potential applicability in (paleo)ecological studies. *Revue de Paléobiologie*, 4, 311-320.

Jorissen F.J., Barmawidjaja D.M., Puskaric S., van der Zwaan G.J., 1992. Vertical distribution of benthic foraminifera in the northern Adriatic Sea: the relation with organic flux. *Marine Micropaleontology*, 19, 131-146.

Jorissen F.J., 1995. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine Micropaleontology*, 26, 3-15.

Jouanneau J.M., Weber O., Cremer B., Castaing P., 1999. Fine-grained sediment budget on the continental margin of the Bay of Biscay. *Deep-Sea Research II*, 46, 2205-2220.

Kedzierski M., 2013. Intérêts du sablage des vasières pour la pérennité des gisements de coquillages de pêche à pied du Golfe du Morbihan. Master 1 IGREC, UBS 51 p.

Kedzierski M., 2014. Diminution des stocks de palourdes japonaises (*Ruditapes philippinarum*) du Golfe du Morbihan des années 1990 à 2014 : étude de la dynamique des populations et suivi de la reproduction 2014. Master 2 IGREC, UBS, 65 p.

Kobashi T., Severinghaus J.P., Brook E.J., Barnola J.M., Grachev A.M., 2007. Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice. *Quaternary Science Reviews*, 26, 1212-1222.



- 
- Krijgsman W., Hilgen F.J., Raffi I., Sierro F.J., Wilson D.S., 1999. Chronology, causes, and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature* 400, 652-655.
- L'Homer A., Bonnot-Courtois C., Caline B., 2006. Holocene sea level changes and stratigraphic architecture of the depositional wedge in the bay of Mont-Saint-Michel. In: *Symposium on Sea Level Changes: Records, Processes and Modeling*, SEALAIX, Giens, 25–29 September.
- Lacour D., Néraudeau D., Saint-Martin J.P., Lauriat-Rage A., **Goubert E.**, 2000 – Paléoécologie des peuplements messiniens d'échinides irréguliers et de bivalves du bassin de Sorbas (SE Espagne). "L'événement messinien : approches paléobiologiques et paléoécologiques" (6-7 déc. 2000, Rennes), p. 10.
- Lambeck K., 1997. Sea-level change along the French Atlantic and Channel coast since the time of Last Glacial maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 1-22.
- Lawrence T., Long A.J., Gehrels W.R., Jackson L.P., Smith D.E., 2016. Relative sea-level data from southwest Scotland constrain meltwaterdriven sea-level jumps prior to the 8.2 kyr BP event. *Quaternary Science Reviews*, 151, 292-308.
- Lecointre G., Le Guyader H., 2016. Classification phylogénétique du vivant. Tome 1, 4<sup>ème</sup> éd. Belin.
- Legendre, L., Legendre, P., 1984. *Ecologie numérique*. 2nd édition 1. Le traitement multiple des données écologiques. Paris & Québec : Masson & les Presses de l'Université du Québec.
- Lesueur P., Klingebiel A., 1986. Carte et notice de répartition des sédiments superficiels du plateau continental du Golfe de Gascogne, partie septentrionale (1/50 000). Co-éditions BRGM-IFREMER, carte géologique de la marge continentale française, 1 carte, 1 notice, 23p.
- Lethiers F., 1998. *Évolution de la biosphère et événements géologiques*. Gordon and Breach Science Publishers, 325 p.
- Li X., Jian Z., Shi X., Liu S., Chen Z., Wu Y., Shi F., 2015. A Holocene record of millennial-scale climate changes in the mud area on the inner shelf of the East China Sea. *Quaternary International*, 384, 22-27.
- Loubere P., Rayray S., 2016. Benthic foraminiferal assemblage formation: Theory and observation for the European Arctic Margin. *Deep-Sea Research*, 113, 107-118.
- Martins M.V.A., Pinto A.F.S., Frontalini F., da Fonseca M.C.M., Terroso D.L., Laut L.L.M., Zaaboub N., da Conceição Rodrigues M.A., Rocha F., 2016. Can benthic foraminifera be used as bio-indicators of pollution in areas with a wide range of physicochemical variability? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182, 211-225.
- Mayewski, P.A., Rohling, E., Stager, C., Karlén, W., Maasch, K., Meeker, L.D., Meyerson, E., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig, E., 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62, 243-255.
- Menier D., 2004. Morphologie et remplissage des vallées fossiles sud-armoricaines : apport de la stratigraphie sismique. Doctorat Université Bretagne Sud, 204 p.
- Menier D., Tessier B., Proust J.N., Baltzer A., Sorrel P., Traini C., 2010. The Holocene transgression as recorded by incised-valley infilling in a rocky coast context with low sediment supply (southern Brittany, western France). *Bulletin de la Société géologique de France*, 181, 2, 115-128.
- Menier D., Tessier B., Dubois A., Goubert E., Sedrati M., 2011. Geomorphological and hydrodynamic forcing of sedimentary bedforms - Example of Gulf of Morbihan (South Brittany, Bay of Biscay). *Journal of Coastal Research*, 64, 1-5.

- 
- Menier D., Augris C., Briend C., 2014. Les réseaux fluviatiles anciens du plateau continental de Bretagne Sud. Editions Quae, ISBN : 978-2-84433-174-8, 107 p.
- Meybeck M., Vörösmarty C., 2005. Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. *Comptes Rendus Geoscience*, 337, 107-123
- Mojtahid M., Geslin E., Coynel A., Gorse L., Vella C., Davranche A., Zozzolo L., Blanchet L., Bénéteau E., Maillet G., 2016. Spatial distribution of living (Rose Bengal stained) benthic foraminifera in the Loire estuary (western France). *Journal of Sea Research*, 118, 1-16.
- Mörner N.A., 1969. Eustasy and climatic changes during the last 15,000 Y. *Geologie en Mijnbouw*, 48, 389-399.
- Morner N.A., 1984. Climatic changes on a yearly to millennial basis. Concluding remarks. In: *Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis*. Morner & KarlCn, Eds., Reidel hbl. Co., 637-651.
- Moros M., Andrews J.T., Eberl D.D., 2006. Holocene history of drift ice in the northern Atlantic: evidence for different spatial and temporal modes. *Paleoceanography*, 21, PA2017, 1-10.
- Morzadec-Kerfourn M.T., 1974. Variations de la ligne de rivage armoricaine au quaternaire : analyses polliniques de dépôts organiques littoraux. Université de Rennes, Institut de géologie, Mémoire de la Société géologique et minéralogique de Bretagne, 17, 208 p.
- Morzadec-Kerfourn M.T., 1975. Evolution paléogéographique du Marais de Dol en Bretagne (Ille et Vilaine) durant le Flandrien. *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, 7, 49-51.
- Morzadec-Kerfourn M.T., 1985. Variations du niveau marin à l'Holocène en Bretagne (France). *Eiszeitalter Gegenwart Hannover*, 15-22.
- Morzadec-Kerfourn M.T., 2005. Interaction between sea-level changes and the development of littoral herbaceous vegetation and autotrophic dinoflagellates. *Quaternary International*, 133-134, 137-144.
- Murray J., 2006. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge university press, 426 p.
- Ong M.C., 2012. Evaluation and mapping of metallic trace elements in surficial sediments and oysters from Quiberon Bay and Gulf of Morbihan, Brittany, France. Doctorat Université Bretagne Sud, 318 p.
- Osterman L.E., 2003. Benthic foraminifers from the continental shelf and slope of the Gulf of Mexico: an indicator of shelf hypoxia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58, 17-35.
- Osterman L.E., Poore R.Z., Swarzenski P.W., 2008. The last 1000 years of natural and anthropogenic low-oxygen bottom-water on the Louisiana shelf, Gulf of Mexico. *Marine Micropaleontology*, 66, 291-303.
- Ottman F., Alix Y., Limasset J.C., Limasset O., 1968. Sur le lit ancien de la Loire dans son cours inférieur. *Bulletin du BRGM*, 2, 1, 2, 27-56.
- Ouguerram A., Visset L., 2001. Histoire de la végétation et première mise en évidence d'un milieu marin pendant l'Holocène dans la vallée de l'Erdre et le Val de Gesvres (bassin versant de la Loire, massif Armoricaïn, France). *Quaternaire*, 12, 189-199.
- Pérez-Belmonte L., 2008. Caractérisation environnementale, morphosédimentaire et stratigraphique du Golfe du Morbihan pendant l'Holocène terminal : implications évolutives. Doctorat Université Bretagne Sud, 219 p.

- 
- Pian S., 2010. Analyse multiscalaire et multifactorielle de l'évolution et du comportement géomorphologique des systèmes côtiers sud bretons. Doctorat Université Bretagne Sud, 477 p.
- Pillet L., Voltski I., Korsun S., Pawlowski J., 2013. Molecular phylogeny of Elphidiidae (foraminifera). *Marine Micropaleontology*, 103, 1-14.
- Platon E., Sen Gupta B.K., Rabalais N.N., Turner R.E., 2005. Effect of seasonal hypoxia on the benthic foraminiferal community of the Louisiana inner continental shelf: the 20th century record, *Marine Micropaleontology*, 54, 263-283.
- Poirier C., 2010. Enregistrements sédimentaires des changements environnementaux séculaires à millénaires par la micro- et la macrofaune benthiques littorales. Doctorat Université La Rochelle, 217 p.
- Poirier C., Chaumillon E., Arnaud F., 2011. Siltation of river-influenced coastal environments: Respective impact of late Holocene land use and high-frequency climate changes. *Marine Geology*, 290, 51-62.
- Polovodova I., Nordberg K., Filipsson H.L., 2011. The benthic foraminiferal record of the Medieval Warm Period and the recent warming in the Gullmar Fjord, Swedish west coast. *Marine Micropaleontology*, 81, 95-106.
- Proust J.N., Renault M., Guennoc P., Thinon I., 2010. Sedimentary architecture of the Loire River drowned valleys of the French Atlantic shelf. *Bulletin de la Société géologique de France*, 181, 2, 129-149.
- Reison G.E., 1992. Transgressive barrier island and estuarine systems. In: *Facies models, response to sea level change*. Ontario, Canada, Love Printing Service Ltd p. 179-194.
- Roveri M., Flecker R., Krijgsman W., Lofi J., Lugli S., Manzi V., Sierro F.J., Bertini A., Camerlenghi A., De Lange G., Govers R., Hilgen F.J., Hübscher C., Meijer P.T., Stoica M., 2014. The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences. *Marine Geology*, 352, 25-58.
- Ruel A., 2015a. Essais de captage de larves de palourdes au niveau de la vasière de Tascon (Golfe du Morbihan). Rapport pour le CDPMEM, 22 p.
- Ruel A., 2015b. Étude du fonctionnement de la vasière de Rosvelec : Aspects bactériologiques, sédimentologiques et conchyliques. Master 1 IGREC, UBS, 45 p.
- Saad S.A., Wade C.M., 2016. Biogeographic distribution and habitat association of *Ammonia* genetic variants around the coastline of Great Britain. *Marine Micropaleontology*, 124, 54-62.
- Schönfeld J., Alve E., Geslin E., Jorissen F., Korsun S., Spezzaferri S., Members of the FOBIMO group, 2012. The FOBIMO (FORaminiferal Blo-MONitoring) initiative. Towards a standardized protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology*, 94-95, 1-13.
- Sen Gupta B.K., Turner R.E., Rabalais N.N., 1996. Seasonal oxygen depletion in continental-shelf waters of Louisiana: historical record of benthic foraminifers. *Geology*, 24, 227-230.
- Seppa H., Birks H.J.B., Giesecke T., Hammarlund D., Alenius T., Antonsson K., Bjune A.E., Heikkilä M., MacDonald G.M., Ojala A.E.K., Telford R.J., Veski S., 2007. Spatial structure of the 8200 cal yr BP event in Northern Europe. *Climate of the Past Discussions*, European Geosciences Union (EGU), 3, 1, 165-195.

- 
- Severin K.P., 1983. Test morphology in benthic foraminifera as discriminator of biofacies. *Marine Micropaleontology*, 8, 65-76.
- Shannon C.E., Weaver W., 1963. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, 125 p.
- Sonnec E., 2015. *La navigation de plaisance : territoires de pratiques et territoires de gestion en Bretagne. Entre dualité et nécessité de fusion pour une évolution progressiste de l'activité*. Doctoart Université Rennes 2, 503 p.
- Sorrel P., Tessier B., Demory F., Baltzer A., Bouaouina F., Proust J.N., Menier D., Traini C., 2010. Sedimentary archives of the French Atlantic coast (inner Bay of Vilaine, south Brittany): Depositional history and late Holocene climatic and environmental signals. *Continental Shelf Research*, 30, 1250-1266.
- Sorrel P., Debret M., Billeaud I., Jaccard S.L., McManus J.F., Tessier B., 2012. Persistent non-solar forcing of Holocene storm dynamics in coastal sedimentary archives. *Nature Geoscience*, 5, 892-896.
- Spilmont N., 2013. The Future of Benthic Indicators: Moving up to the Intertidal. *Open Journal of Marine Science*, 3, 76-86.
- Stanisiere J.Y., Mazurie J., Bouget J.F., Langlade A., Gabellec R., Retho M.1, Quinsat K., Leclerc E., Cugier P., Dussauze M., Menesguen A., Dumas F., Gohin F., Augustin J.M., Ehrhold A., Siquin J.M., Goubert E., Dreano A., 2013. Les risques conchylicoles en Baie de Quiberon. Troisième partie : le risque d'hypoxie pour l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Rapport final du projet Risco 2010-2013. <http://dx.doi.org/10.13155/29131>, 72p.
- Stephan P., 2009. *Les flèches de galets de Bretagne : morphodynamique passée, présente et prévisible*. Doctorat Université Bretagne Occidentale, 560 p.
- Stephan P., 2011. Colmatage sédimentaire des marais maritimes et variations relatives du niveau marin au cours des 6 000 dernières années en rade de Brest (Finistère). *Norois*, 220, 3, 9-37.
- Ters M., Planchais N., Azema C., 1968. L'évolution de la basse vallée de la Loire, à l'aval de Nantes, à la fin du Würm et pendant la transgression flandrienne. *Bulletin de l'Association Française pour l'étude du Quaternaire*, 3, 217-246.
- Ters M., 1973. Les variations du niveau marin depuis 10 000 ans le long du littoral atlantique français. In "Le Quaternaire : Géodynamique, Stratigraphie et Environnement", Ed. CNRS, Paris, 114-135.
- Tessier B., Billeaud I., Sorrel P., Delsinne N., Lesueur P., 2012. Infilling stratigraphy of macrotidal tide-dominated estuaries. Controlling mechanisms: Sea-level fluctuations, bedrock morphology, sediment supply and climate changes (The examples of the Seine estuary and the Mont-Saint-Michel Bay, English Channel, NW France). *Sedimentary Geology*, 279,62-73.
- Tessier C., Vested H.J., Christensen B.B., Goubert E., Salaün F., 2012. Modélisation numérique de la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine. *Paralia*, XII, 471-480.
- Toucanne S., 2008. *Reconstruction des transferts sédimentaires en provenance du système glaciaire de mer d'Irlande et du paléo-fleuve Manche au cours des derniers cycles climatiques*. Doctorat Université Bordeaux I, 370 p.
- Traini C., Menier D., Proust J.N., Sorrel P., 2013. Transgressive systems tract of a ria-type estuary: The Late Holocene Vilaine River drowned valley (France). *Marine Geology*, 337, 140-155.

- 
- Traini C., Proust J.N., Menier D., Mathew M.J., 2015. Distinguishing natural evolution and human impact on estuarine morpho-sedimentary development: A case study from the Vilaine Estuary, France. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163, 143-155.
- Turner R.E., Rabalais N.N., Swenson E.M., Kasprzak M., Romaine T., 2005. Summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico and its prediction from 1978 to 1995. *Marine Environmental Research*, 59, 65-77.
- Vested H.J., Tessier C., Christensen B.B., Goubert E., 2013. Numerical modelling of morphodynamics, Vilaine estuary. *Ocean Dynamics*, 63, 423-446.
- Visset L., Hauray G., Charriau L., Rouzeau N., 2001. Paléoenvironnement urbain : histoire du comblement des vallées de la métropole nantaise, du Tardiglaciaire à la fin de l'Holocène. *Annales de Bretagne et des Pays de l'Ouest*, 108, 147-165.
- Vörösmarty C.J., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P., Syvitski J.P.M., 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39, 169-190.
- Walling D.E., 2006. Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79, 192-216.
- Walling D.E., Fang D., 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 111-126
- Wang Y., Cheng H., Edwards R.L., He Y., Kong X., An Z., Wu J., Kelly M.J., Dykoski C.A., Li X., 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308, 854-857.

---

# Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

---

**Evelyne Goubert**

Maître de Conférences

Section 36

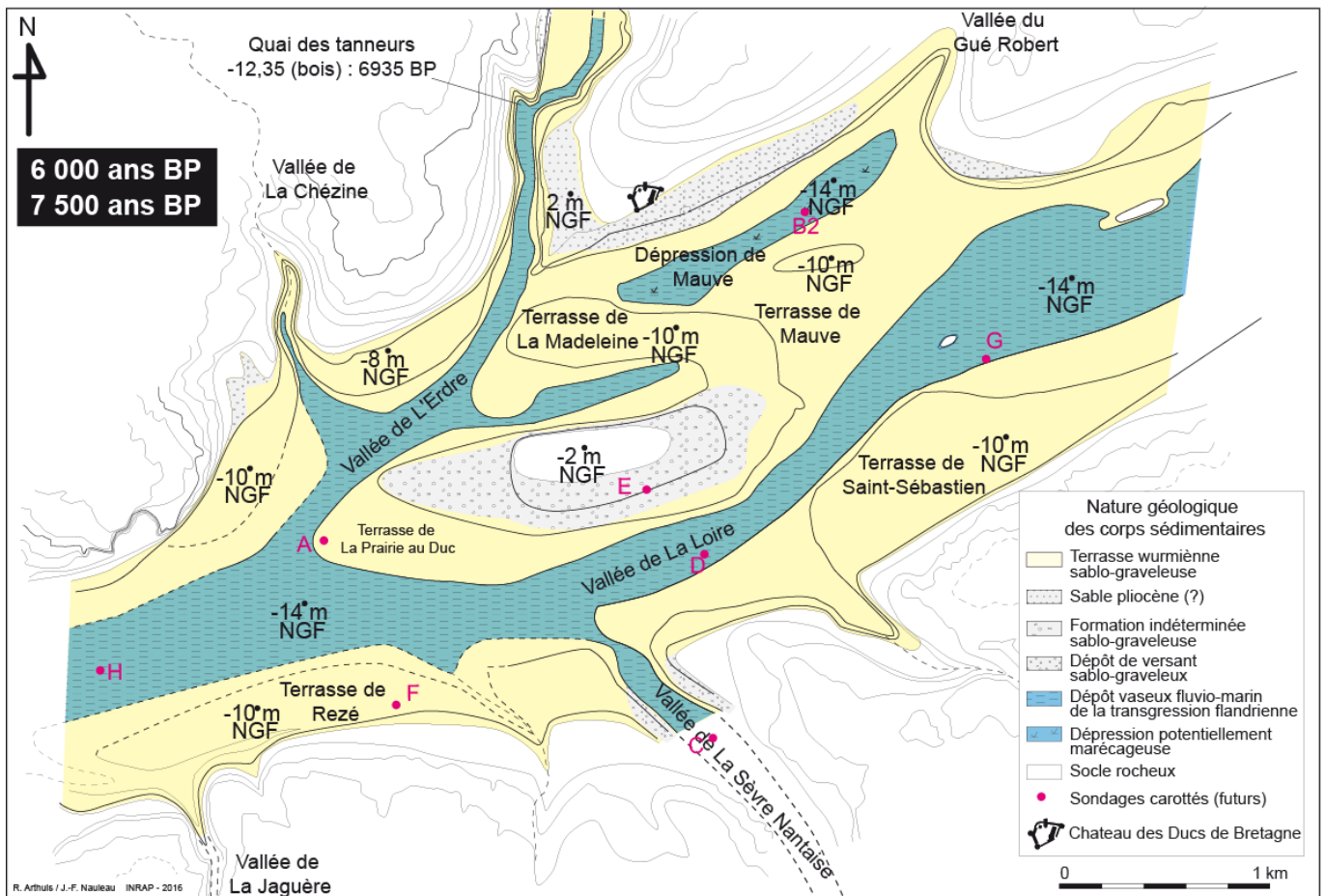
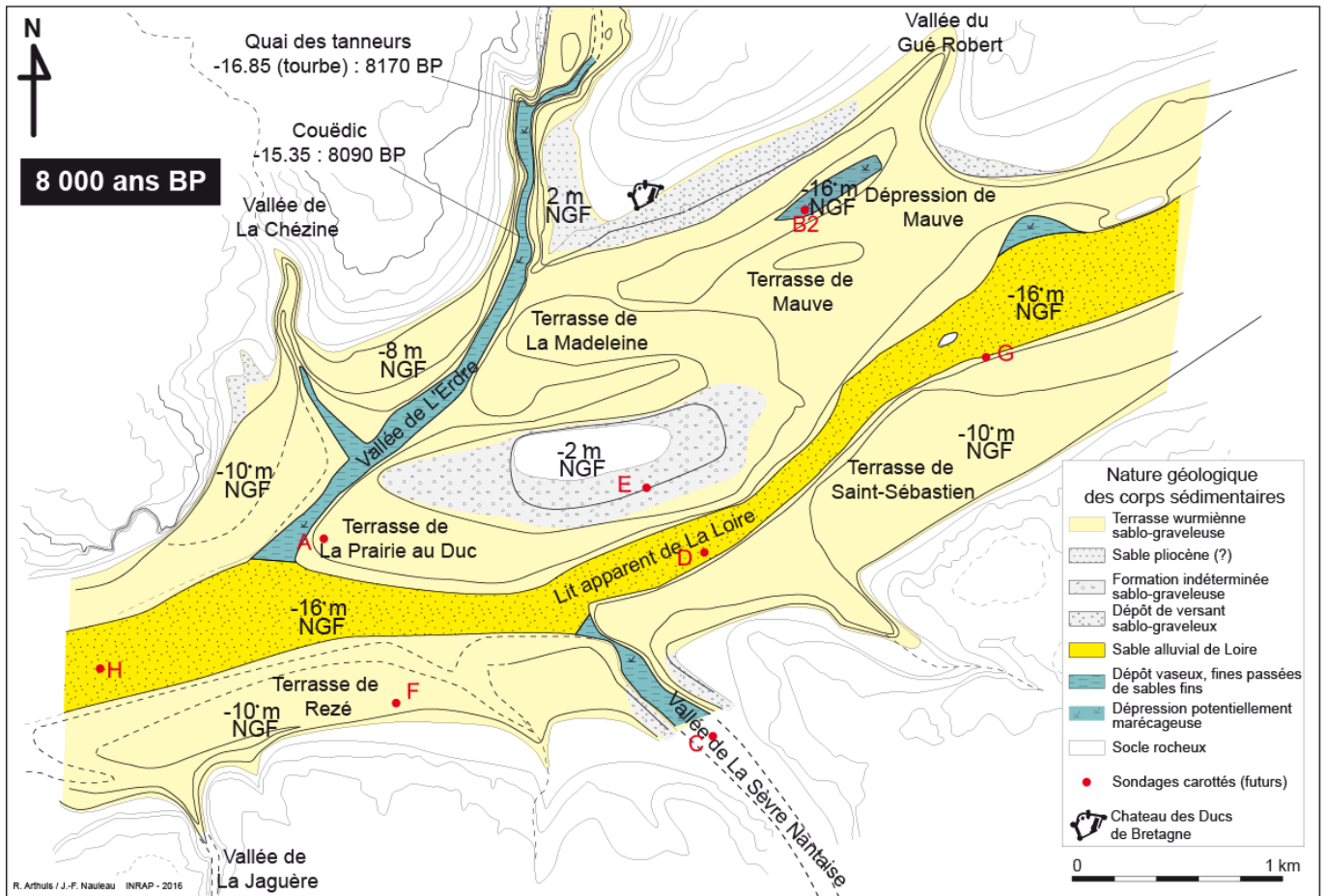
---

**Mai 2017**

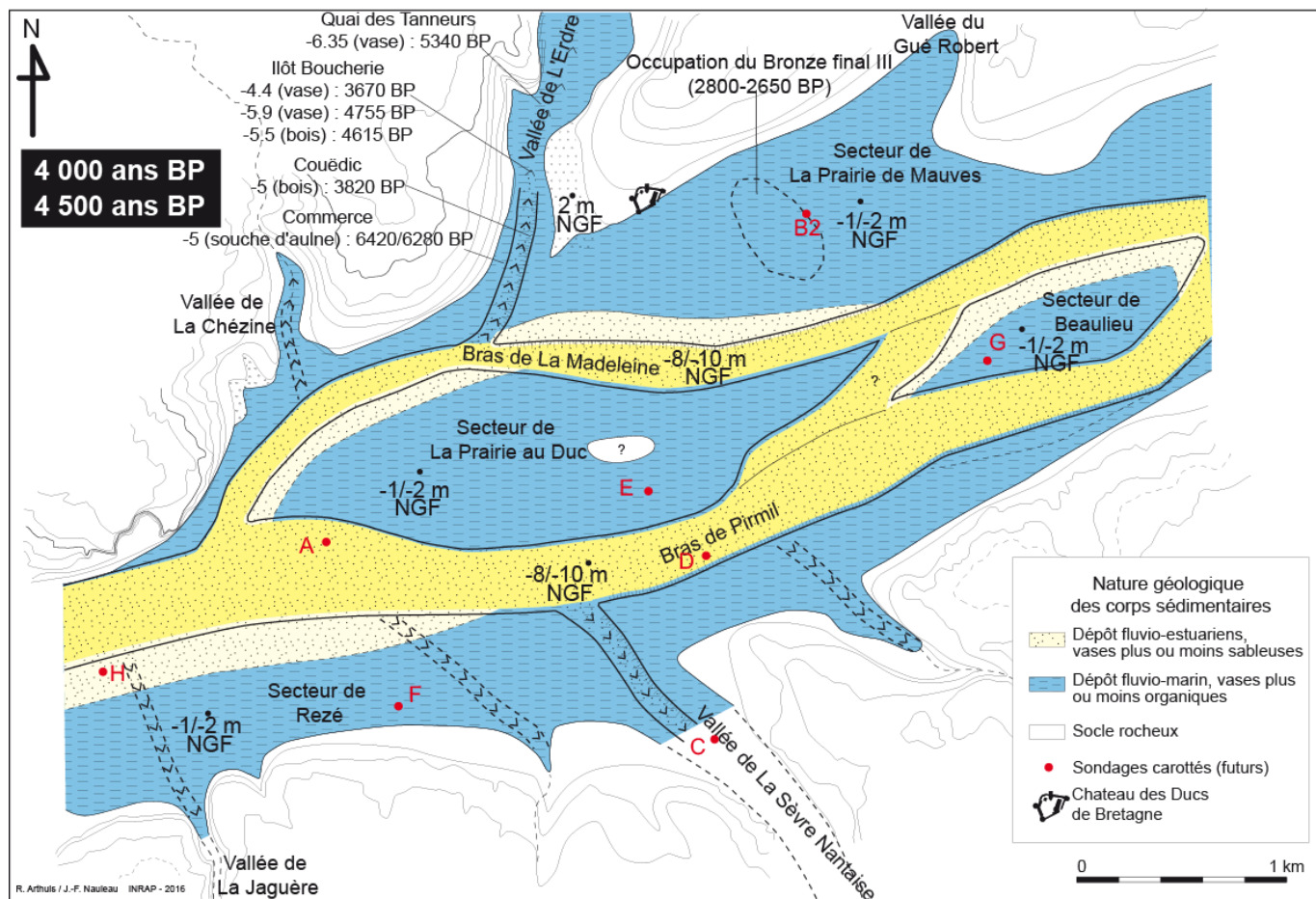
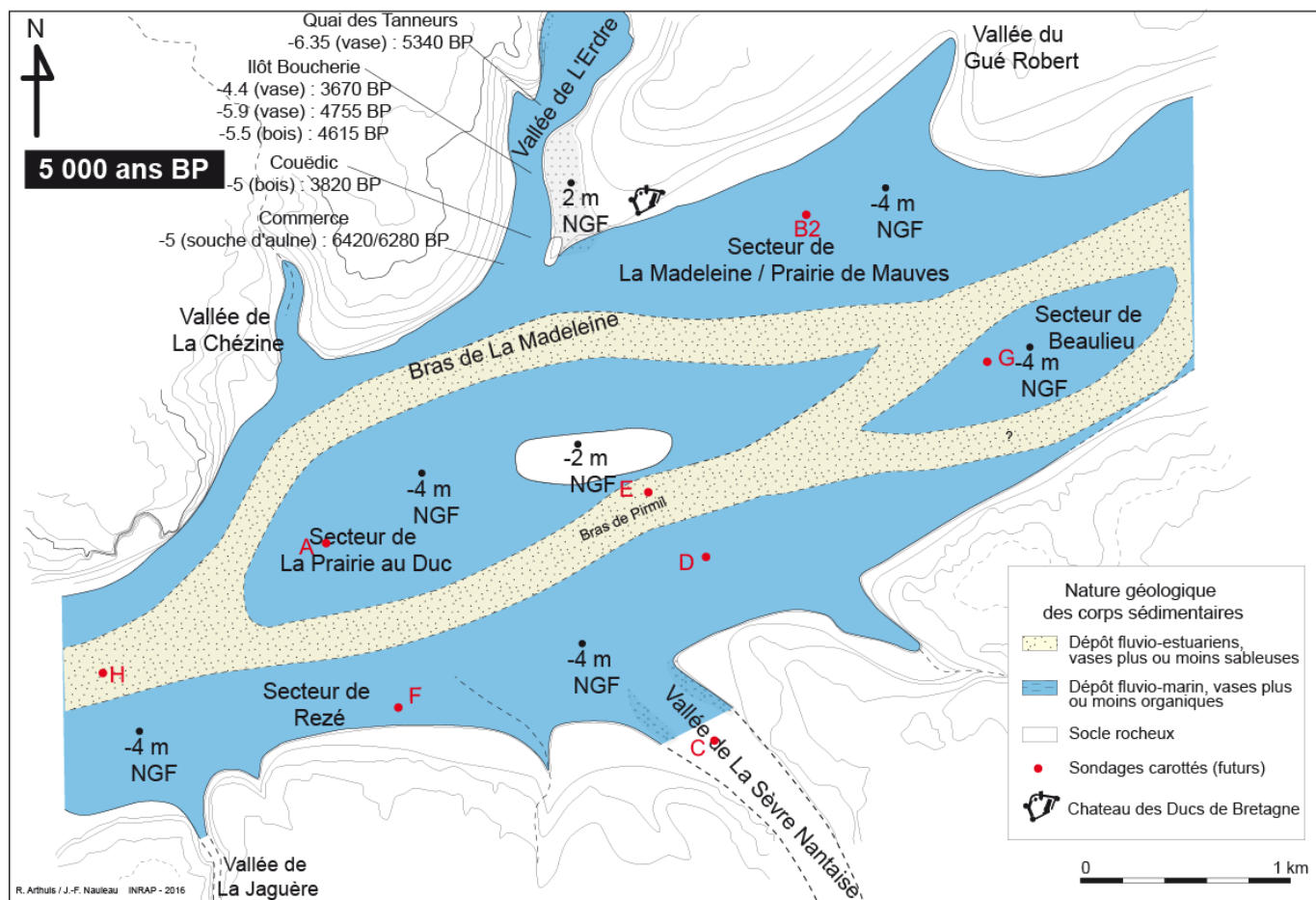
## VII. ANNEXES

Annexe 1. Cartes paléogéographiques de la Loire à Nantes de 8 000 ans à l'actuel.....	142
Annexe 2. Principe de reconstitution paléoenvironnementale des séquences d'ouverture et de fermeture des étangs lorientais.....	145
Annexe 3. Carte géologique simplifiée de la Bretagne Sud à partir de la carte géologique de France du BRGM de 1996 (Atlas de l'environnement du Morbihan © Goubert, 2010).....	146
Annexe 4. Paysage supposé du Sud de la Bretagne il y a environ 14 000 ans avec un niveau marin estimé à – 70m (Menier et al., 2014).....	147
Annexe 5. Paysage supposé du sud de la Bretagne il y a environ 9 000 ans avec un niveau marin estimé à – 30m (Menier et al., 2014).....	147
Annexe 6. Distribution des foraminifères vivants dans l'estuaire de la Vilaine : recolonisation après la crue de janvier 1995 – Comparaison avec un coup de vent (Goubert©2009).....	148
Annexe 7. Carte géologique Vannes Saint-Gildas de Rhuys (1/50 000), feuille n°417, BRGM, Augier et al., 2011. + notice de 271 p. ....	149
Annexe 8. Études sur les palourdes du Golfe du Morbihan. ....	150

**Annexe 1. Cartes paléogéographiques de la Loire à Nantes de 8 000 ans à l'actuel.**

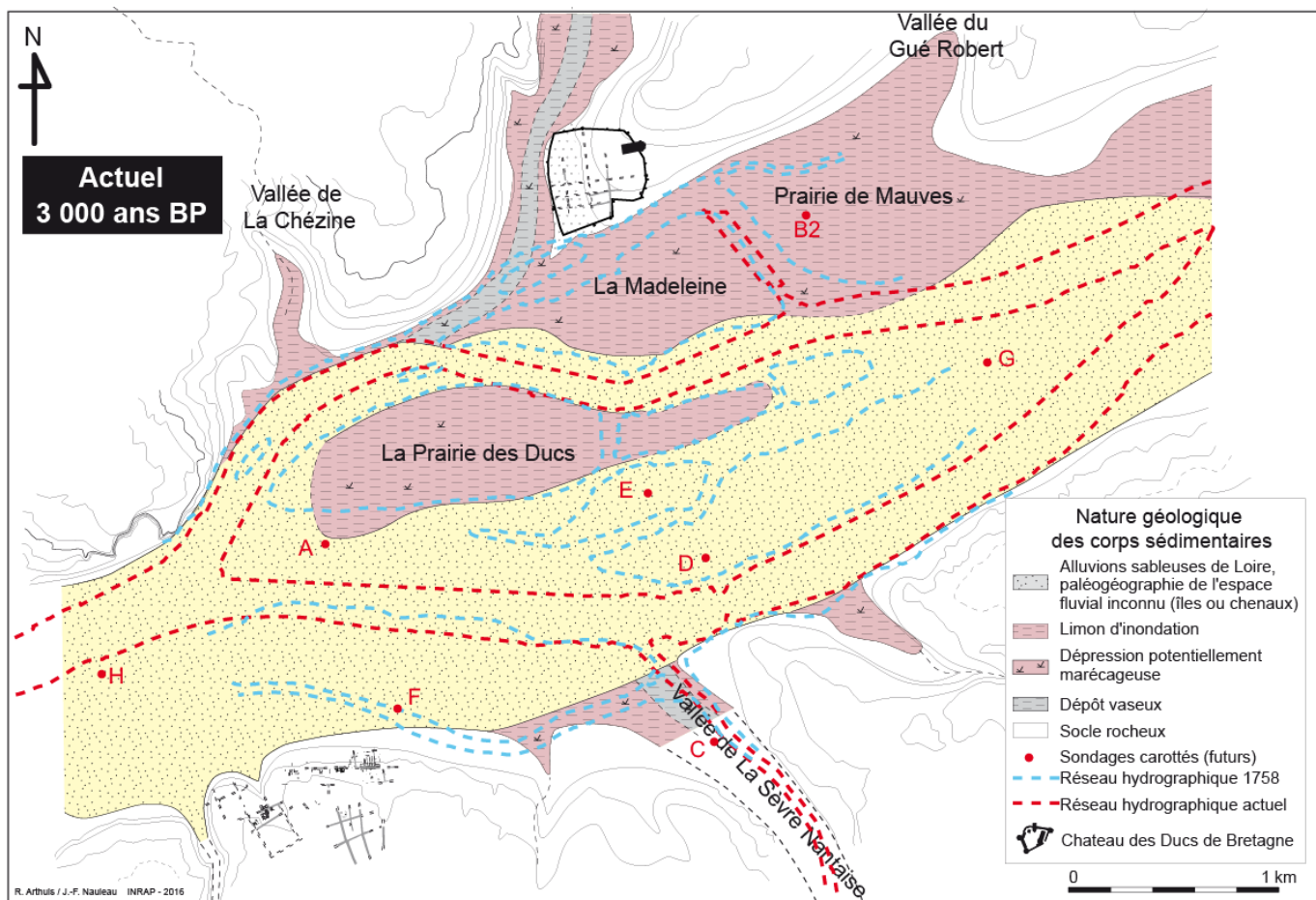


Annexe 1. Cartes paléogéographiques de la Loire à Nantes de 8 000 ans à l'actuel. (suite)



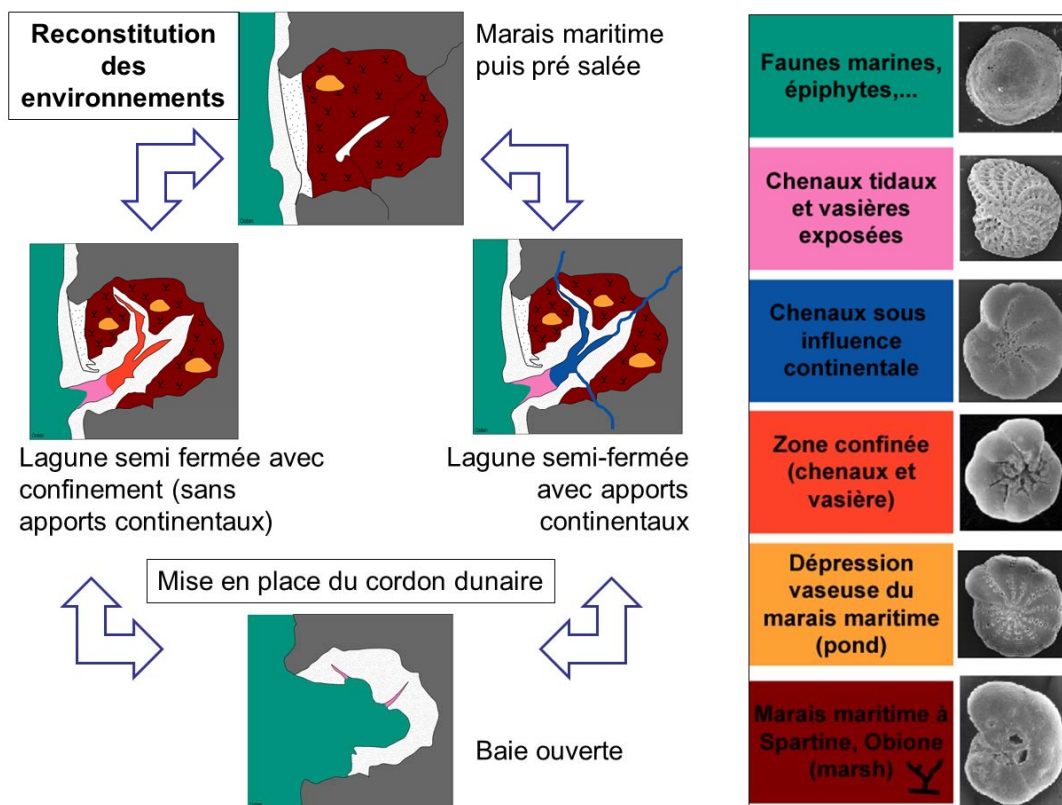


Annexe 1. Cartes paléogéographiques de la Loire à Nantes de 8 000 ans à l'actuel. (fin)

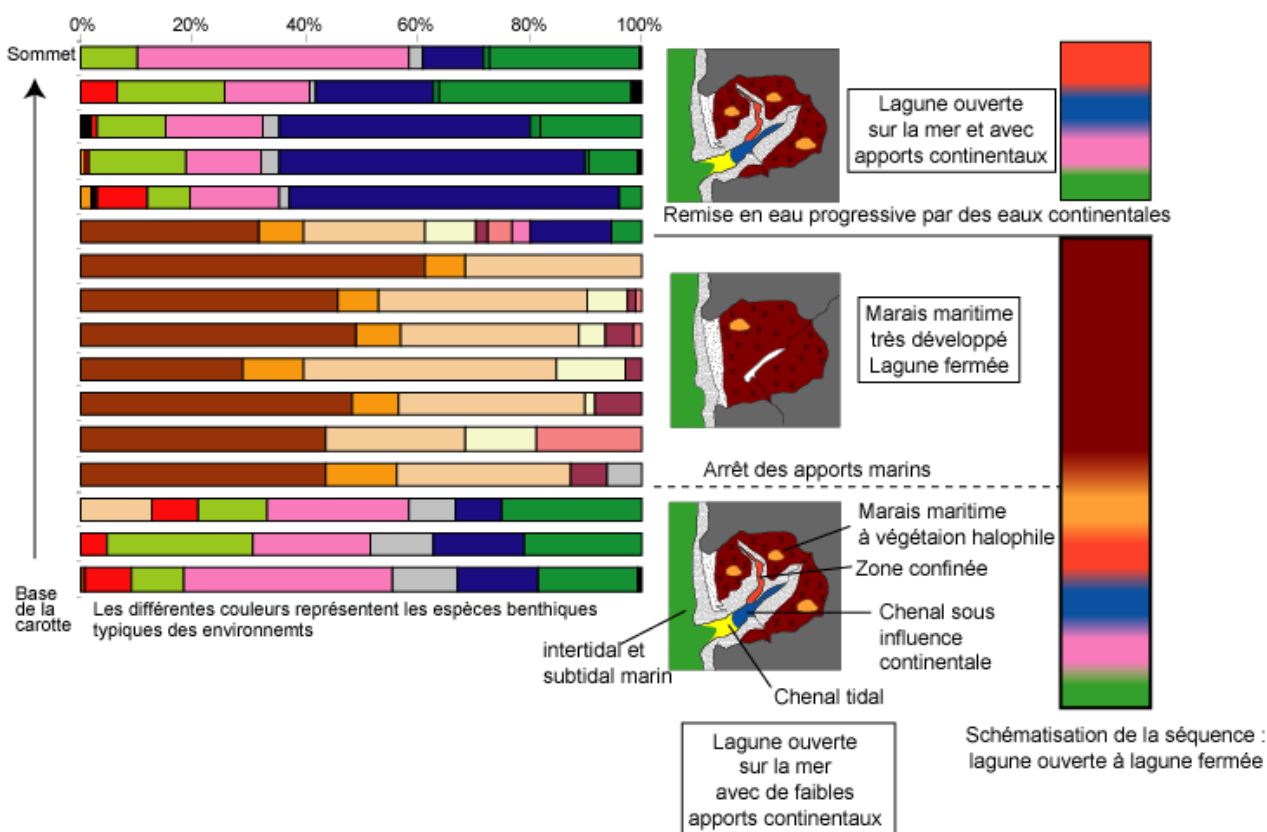


## Annexe 2. Principe de reconstitution paléoenvironnementale des séquences d'ouverture et de fermeture des étangs orientais.

Distribution des groupes écologiques en fonction de l'état de la lagune

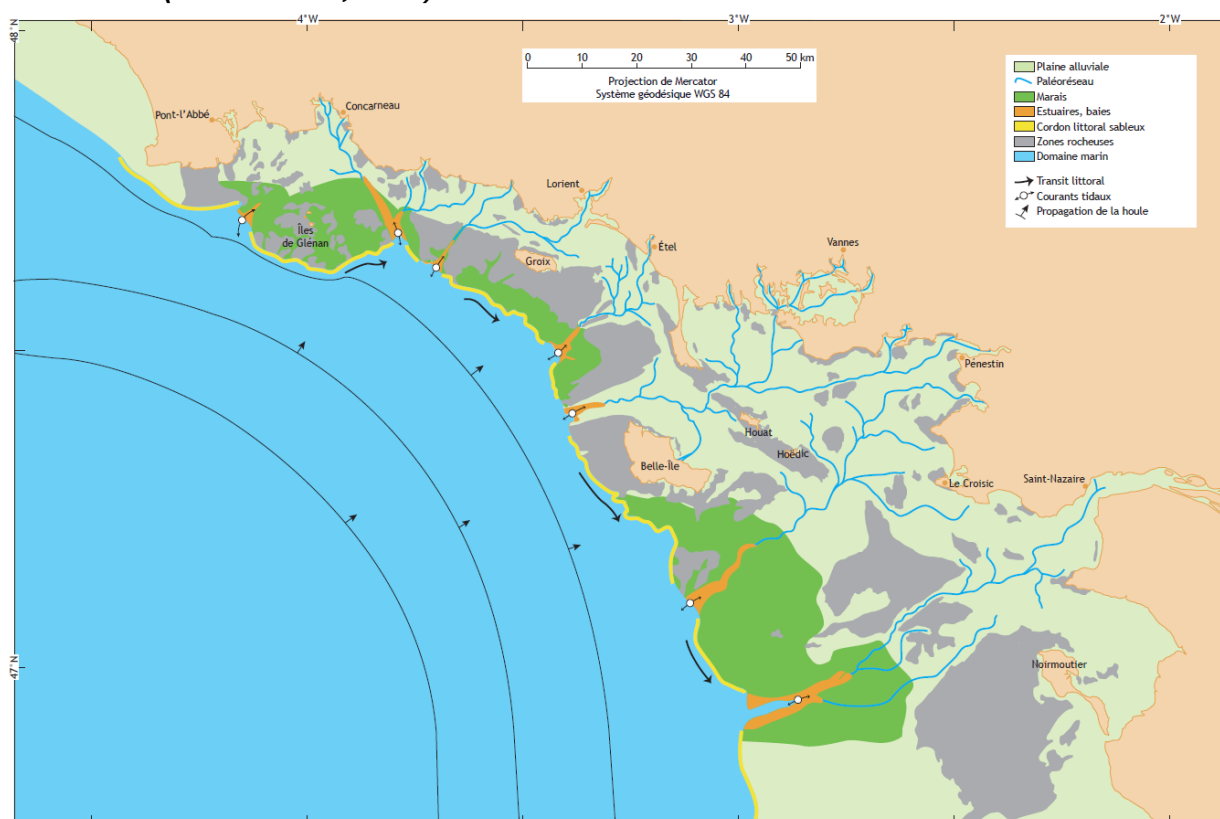


Schématisation des séquences d'ouverture/fermeture à partir des comptages des foraminifères

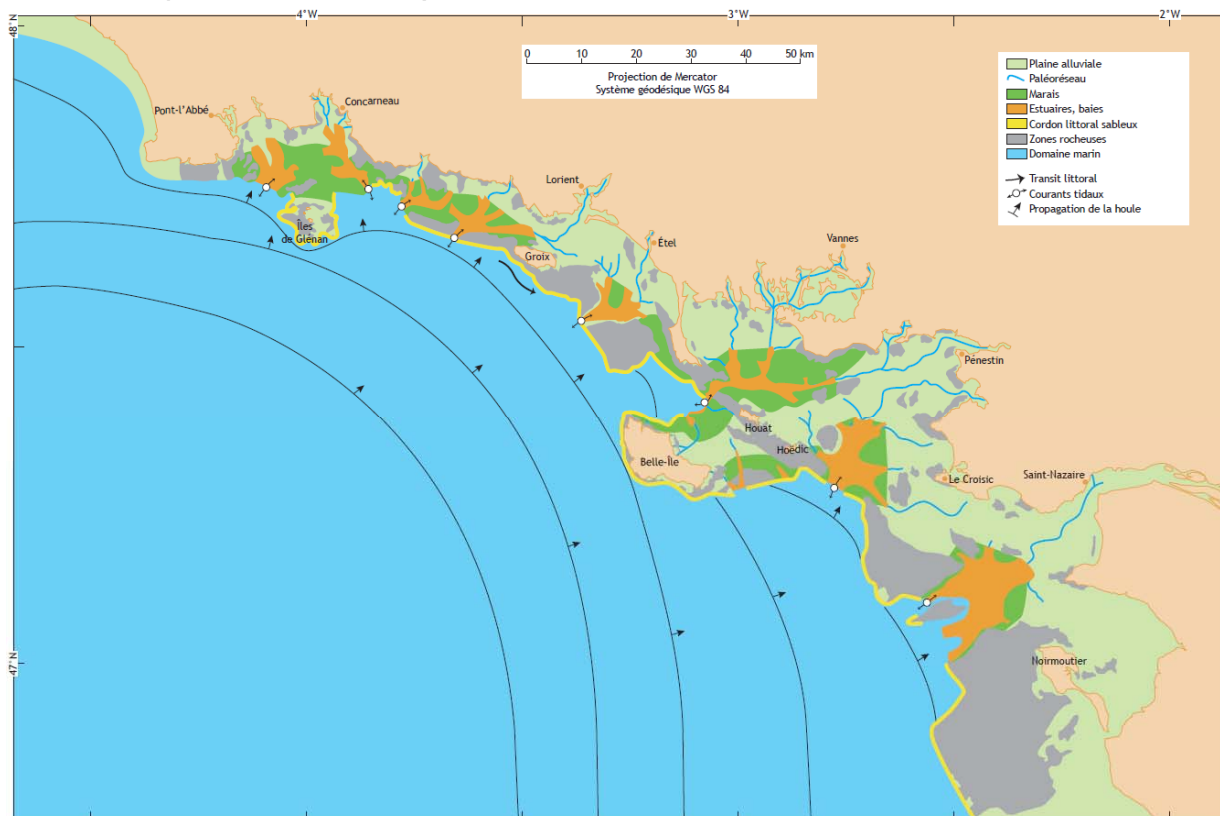




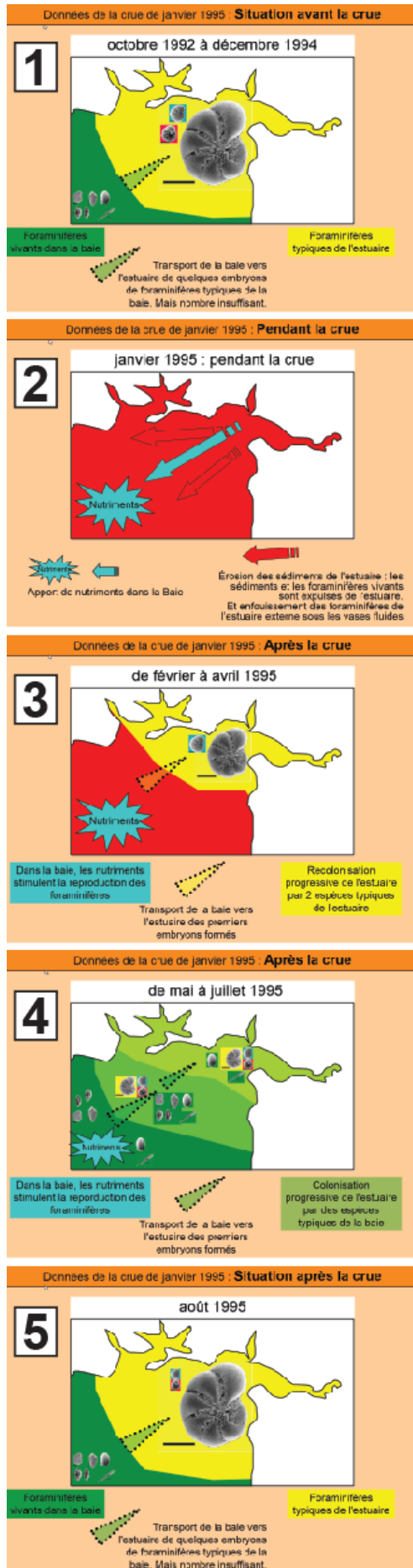
**Annexe 4. Paysage supposé du Sud de la Bretagne il y a environ 14 000 ans avec un niveau marin estimé à - 70m (Menier et al., 2014).**



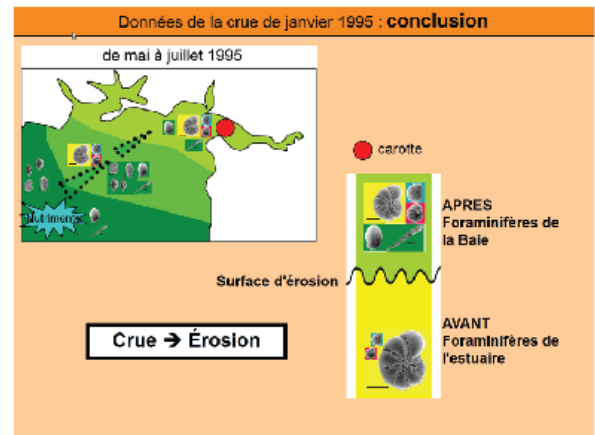
**Annexe 5. Paysage supposé du sud de la Bretagne il y a environ 9 000 ans avec un niveau marin estimé à - 30m (Menier et al., 2014).**



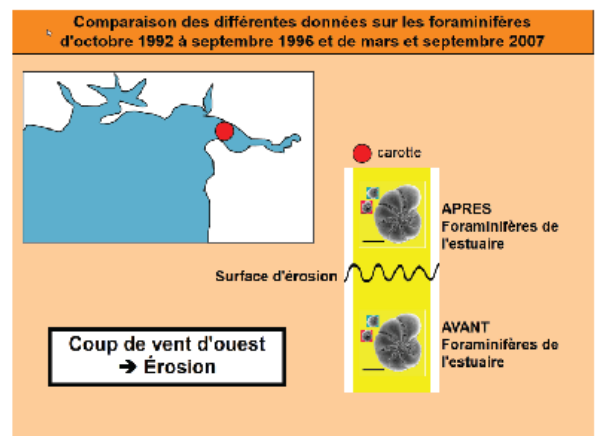
**Annexe 6. Distribution des foraminifères vivants dans l'estuaire de la Vilaine : recolonisation après la crue de janvier 1995 – Comparaison avec un coup de vent (Goubert©2009)**



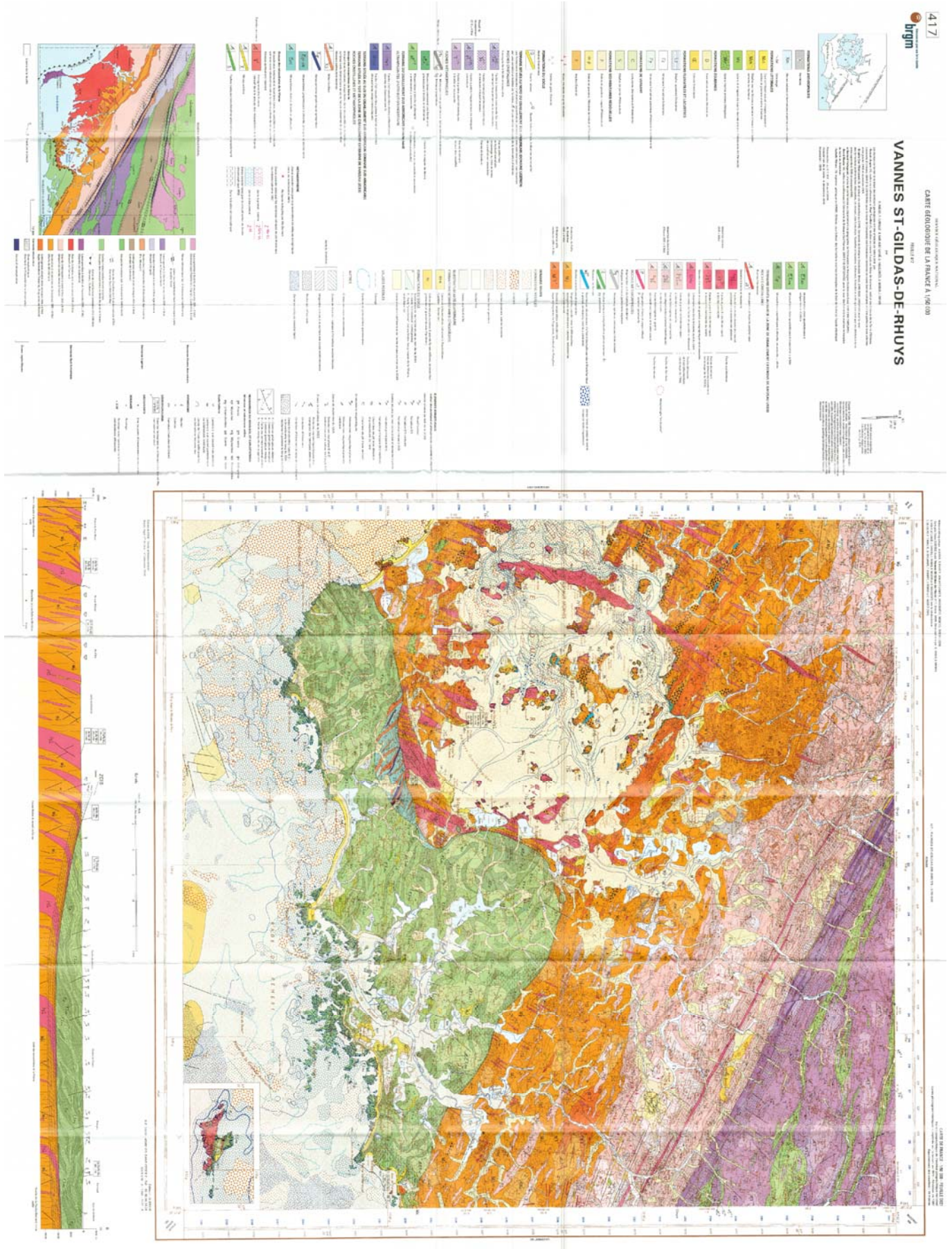
**Estimation de la préservation d'un phénomène de crue dans une carotte**



**Estimation de la préservation d'un coup de vent dans une carotte**



**Annexe 7. Carte géologique Vannes Saint-Gildas de Rhuys (1/50 000), feuille n°417, BRGM, Augier et al., 2011. + notice de 271 p.**



## Annexe 8. Études sur les palourdes du Golfe du Morbihan.



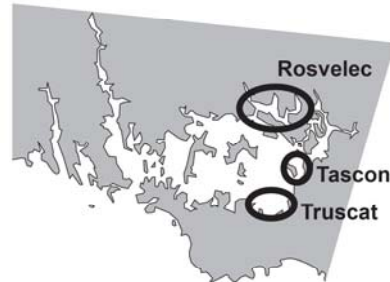
### Estimation du gisement de palourdes de Rosvelec

Densité moyenne de palourdes (indiv / 0,25 m<sup>2</sup>)



Mai 2015

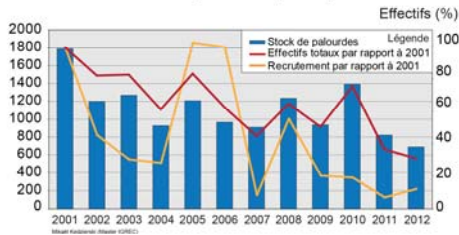
Prélèvements et comptages des palourdes



Faible densité  
Très faible abondance des jeunes palourdes

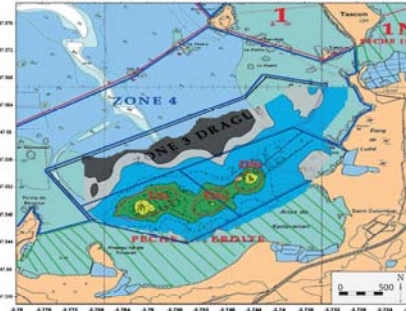
### Evolution du gisement de palourdes sur la vasière de Truscat

Estimation du stock de palourdes (tonnes)



Diminution du stock depuis 2001  
Abondance faible des jeunes palourdes

Densité moyenne de palourdes (indiv / 0,25 m<sup>2</sup>)  
à partir des prélèvements annuels de 2001 à 2011

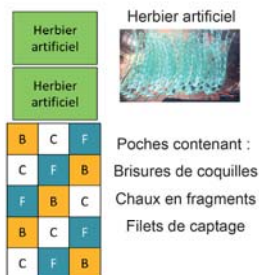


Palourdes pêchées :  
1 000 tonnes en 2001  
160 tonnes en 2012

### Expérimentation pour capter les jeunes palourdes sur la vasière de Tascon



Amélie Ruel (Master IGREC)



---

## VIII. Liste des figures et des tableaux

Figure 1. Localisation en Europe occidentale des principaux sites étudiés. ....	38
Figure 2. Localisation des sites étudiés de Penmac'h à La Loire et des thématiques abordées. ....	38
Figure 3. Succession des différentes activités de recherche de 1990 à 2017, en fonction de la fenêtre temporelle étudiée. ....	39
Figure 4. Détail des activités et des programmes de recherche développés à l'Université Bretagne Sud comme maître de conférences depuis septembre 2001. ....	40
Figure 5. a) Foraminifère vivant avec les pseudopodes et la couche de déchets organiques visibles en microscopie à contraste de phase ; b) Pseudopodes granuloréticulés en microscopie électronique à transmission. ....	41
Figure 6. Les différents types de tests de foraminifères benthiques. ....	42
Figure 7. Milieux et modes de vie des foraminifères. ....	44
Figure 8. Carte de localisation des points de prélèvement dans l'estuaire de la Vie ; Diagramme spatio-temporel de la densité de foraminifères vivants (Debenay et al., 2006). ....	47
Figure 9. Traitements des données de l'estuaire de la Vie (Debenay et al., 2006) : Représentation des analyses canoniques des correspondances. ....	48
Figure 10. Définition et distribution bathymétrique des groupes écomorphologiques de E.G.1 à E.G.7 (Goubert et al., 2001). ....	49
Figure 11. Principe de la méthode rang-fréquence (Goubert, en prép.) : (a) tableau de données ; (b) diagramme rang-fréquence et interprétation ; (c) échelle bi-log (Bouchet et al., 2007) ; (d) échelle non-log pour les échantillons à faible diversité spécifique. ....	50
Figure 12. Carte montrant les zones d'hypoxie dans le Golfe du Mexique d'après les index basés sur les foraminifères benthiques (Osterman, 2003). ....	52
Figure 13. Amplitude des valeurs des EcoQS « actuels » (1 <sup>ère</sup> ligne) et « fossiles » (2 <sup>ème</sup> ligne) pour représenter un état de santé de « Mauvais » à « Très bon » (Bouchet et al., 2012). ....	53
Figure 14. Les 5 cinq groupes écologiques définis pour le calcul du ForAMBI et schéma montrant la distribution des abondances relatives de ces cinq groupes écologiques le long d'un gradient de teneurs en carbone organique total (Alve et al., 2016). ....	54
Figure 15. Distribution des écophénotypes d' <i>Elphidium excavatum</i> de la Méditerranée à l'Islande d'après les illustrations dans les études citant cette espèce (modifiée d'après Goubert, 1997b). ....	55
Figure 16. Enregistrement des paramètres environnementaux dans la morphologie des <i>Elphidium excavatum</i> au fil de la croissance (Goubert, en prép.). ....	56
Figure 17. Localisation des échantillons étudiés pour la caractérisation spatio-temporelle de la lignée évolutive des <i>Elphidium excavatum</i> (modifiée d'après Goubert, 1997a). ....	57
Figure 18. Répartitions stratigraphiques des formes <i>granosum</i> , <i>lidoensis</i> , <i>selseyensis</i> et <i>clavatum</i> de l'espèce <i>Elphidium excavatum</i> (Goubert, 1997a). ....	57
Figure 19. Distribution des évaporites messiniennes et localisation des Cordillères bétiques et du bassin de Sorbas (Roveri et al., 2014). ....	58
Figure 20. Carte géologique simplifiée des Cordillères bétiques au niveau du bassin de Sorbas (d'après Goubert et al., 2001). ....	59
Figure 21. Carte géologique du bassin de Sorbas (modifiée d'après Goubert et al., 2001). ....	59
Figure 22. Les coupes pré-évaporitiques au niveau des plateformes carbonatées du Nord du bassin (Los Lobos, La Mela, Las Mandras) et la coupe complète du pré-évaporitique au post-évaporitique au Sud-Ouest du bassin (Los Yesos) (d'après Lacour et al., 2000). ....	60
Figure 23. Distribution de la macro- et de la microfaune le long de la coupe de Los Yesos (modifiée d'après Goubert et al., 2001 et Lacour et al., 2000). ....	60



Figure 24. Distribution des foraminifères (espèces et groupes écologiques) le long de la coupe de Los Yesos et interprétation paléoenvironnementale (Goubert et al., 2001). .....	61
Figure 25. Localisation des sites étudiés et reconstruction géographique des calottes glaciaires européennes au Dernier Maximum Glaciaire entre 25 et 20 000 ans (modifié par Toucanne, 2008 d'après Ehlers & Gibbard, 2004). .....	63
Figure 26. Variations du niveau marin de - 18 000 ans à l'actuel (Goubert, en prép.).....	64
Figure 27. Variations du niveau marin pour l'Holocène de l'Europe de l'Ouest (Goubert, en prép.).....	64
Figure 28. Morphologie de l'estuaire de la Loire jusqu'à Nantes (Goubert, en prép.).....	66
Figure 29. Localisation des sondages utilisés pour la synthèse du comblement de la Loire. ....	67
Figure 30. Morphologie du substratum rocheux au niveau de Nantes et carte géologique simplifiée (Goubert, en prép.).....	68
Figure 31. Proposition de reconstitution du remplissage des vallées ligériennes à Nantes. A) Reconstitution de la coupe actuelle à partir des sondages géotechniques. B) Coupe chronologique du remplissage.....	70
Figure 32. Logs des carottes recalés en NGF, granulométrie, datation (cal BP) et cadre stratigraphique (Goubert, en prép.).....	71
Figure 33. Enregistrement des modalités du comblement de la vallée de la Loire à Nantes par les foraminifères (Delaine et al., 2015).....	72
Figure 34. Localisation des étangs lorientais de Lannéec et du Loc'h, des carottes et caractérisation morphosédimentologique du littoral (Goubert, en prép.).....	73
Figure 35. Log des carottes de Lannéec et du Loc'h : succession des séquences ouverture/fermeture (Goubert, en prép.).....	74
Figure 36. Synthèse des données des assemblages de foraminifères de la carotte du Loc'h (Goubert, en prép.).....	75
Figure 37. Localisation de la carotte du Loch Sunart (Ecosse).....	76
Figure 38. Log synthétique de la carotte MD04-2833 du Loch Sunart, diagramme rang-fréquences basé sur les assemblages de foraminifères et correspondances avec les changements climatiques rapides (Goubert et al., 2007).....	76
Figure 39. La carotte des Glénans (VK03-58b) : log, assemblages de foraminifères et interprétations paléoenvironnementales.....	77
Figure 40. Carte morphobathymétrique du plateau continental sud-breton (MNT SHOM-Ifrémer, modifié d'après Menier et al. (2014).....	80
Figure 41. La Bretagne Sud et les différents types de côtes (modifiée d'après, <a href="http://www.bretagne-environnement.org/">http://www.bretagne-environnement.org/</a> , synthèse de 2016). .....	81
Figure 42. Roses des vents (%) pour Groix, Belle-Île, Quiberon et Estuaire de la Vilaine (d'après les données de Météo France et modifiées d'après les illustrations de Windfinder.com).....	82
Figure 43. Répartition des sédiments superficiels sur le plateau continental sud-armoricain (Lesueur & Klingebiel, 1986) modifiée d'après (Menier et al., 2014). .....	83
Figure 44. Les ports de Bretagne Sud (modifié d'après GIP Bretagne Environnement, Sonnic, 2015). a) De Concarneau à la Vilaine, b) Le Golfe du Morbihan. ....	85
Figure 45. Cadastre conchylicole de 2013 (modifié d'après le Comité Régional de la Conchyliculture de Bretagne Sud, <a href="http://www.huîtres-de-bretagne.com/">http://www.huîtres-de-bretagne.com/</a> ). .....	86
Figure 46. Le système baie / estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).....	88
Figure 47. Caractéristiques physiographiques de l'estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).....	88
Figure 48. Bathymétrie de l'estuaire de la Vilaine en 2013 (Goubert, en prép.).....	89
Figure 49. Bathymétrie de la Vilaine en 1960 (Goubert, en prép.).....	90

Figure 50. Bilan sédimentaire de l'estuaire de la Vilaine de 1960 à 2013 (Goubert, en prép.).....	90
Figure 51. Évolution des soldes sédimentaires par zone depuis 1960 (Goubert & Le Gall, 2016). .....	91
Figure 52. Synthèse des dépôts/érosion par zone et des forçages météorologiques et hydrodynamiques (Goubert, en prép.).....	92
Figure 53. Érosion et dépôts suite à la crue centennale de janvier 1995 (Goubert, en prép.).....	93
Figure 54. Dynamique sédimentaire une tempête de type mars 2007 ou janvier 2013.....	94
Figure 55. Bilan de la dynamique sédimentaire estivale de l'estuaire de la Vilaine (Goubert, en prép.).....	95
Figure 56. Localisation des Altus©NKE sur la vasière intertidale de l'estuaire de la Vilaine (d'après Goubert et al., 2010).....	95
Figure 57. Suivis hydrosédimentaires de l'estuaire de la Vilaine du 7 novembre 2007 au 4 avril 2008 (Goubert et al., 2010). a) altimétrie (Altus©NKE) ; b) coefficients de marée, hauteurs d'eau et hauteurs significatives des vagues (Hs) au niveau des Altus ; c) vitesses et sens du vent ; d) débits de la Vilaine (fond gris : phase d'érosion).....	96
Figure 58. Modèle conceptuel des phases d'érosion et de dépôts au niveau de la vasière intertidale Nord de l'estuaire de la Vilaine (d'après Goubert et al., 2010).....	97
Figure 59. Évolution des fonds sédimentaires observée par altimétrie (Goubert et al., 2010) et modélisée au niveau du Banc du Strado de novembre 2007 à mars 2008 (Tessier C. et al., 2012).....	97
Figure 60. Effet de la bathymétrie initiale sur le bilan sédimentaire après une modélisation sur 5 ans sans événement extrême (Vested et al., 2013).....	98
Figure 61. Évolutions des fonds sédimentaires (érosions-dépôts en m) sur une année et bilans massiques des flux de matières pour 4 secteurs (Tessier C. et al., 2012). .....	99
Figure 62. Bilan des taux de sédimentation par datation des carottes et par l'analyse des données bathymétriques (Goubert et Le Gall, 2016). .....	100
Figure 63. Synthèse des faciès sédimentaires reconnus en carottage dans la baie et l'estuaire de la Vilaine (Goubert et Le Gall, 2016).....	101
Figure 64. Coupes schématiques de l'estuaire de la Vilaine représentant la sédimentation associée au cortège de haut niveau, depuis 7 500 ans à partir des carottes, et à la dynamique sédimentaire récente depuis 1960 à partir des données bathymétriques (Goubert, en prép.).....	101
Figure 65. Carte morphobathymétrique du Golfe du Morbihan (Goubert, en prép.).....	104
Figure 66. Plan de position de la campagne sismique et des carottages (Goubert, en prép.).....	104
Figure 67. Distribution des faciès et des corps sédimentaires dans le Golfe du Morbihan (Pérez-Belmonte, 2008).....	105
Figure 68. Modèle conceptuel d'assemblages de foraminifères benthiques à significations environnementales (Goubert, en prép.).....	106
Figure 69. Distribution dans le Golfe du Morbihan des assemblages de foraminifères benthiques caractérisant différents environnements de dépôts (Goubert, en prép.).....	106
Figure 70. Localisation des prélèvements OstreBio à Locmariaquer (2008 et 2010). .....	109
Figure 71. Synthèse des résultats obtenus sur la biodiversité des foraminifères en relation avec les pratiques ostréicoles (Goubert, en prép.).....	109
Figure 72. Localisation des gisements de palourdes de Truscatec et de Tascon. ....	110
Figure 73. Hypothèse de modification du cycle de reproduction de la palourde japonaise entre 1998 et 2014 (Kedzierski, 2014).....	111
Figure 74. Localisation de la vasière de Rosvelec.....	111
Figure 75. Contaminations par <i>Escherichia coli</i> des palourdes et des sédiments de Rosvelec en novembre 2014 (Ruel, 2015b).....	112

Figure 76. Évolution spatio-temporelle des contaminations par <i>Escherichia coli</i> des palourdes et des sédiments de Rosvelec de novembre 2014 à mars 2015 (Ruel, 2015b).....	112
Figure 77. Localisation de la carotte MD08-3204CQ et des profils sismiques (Baltzer et al., 2014). ....	113
Figure 78. Log de la carotte MD08-3204CQ (modifiée d'après Baltzer et al., 2014). ....	113
Figure 79. Comparaison des occurrences des différents événements climatiques (Baltzer et al., 2014). .....	114
Figure 80. Bathymétrie, dureté acoustique du fond et localisation des mortalités estivales de 2006 en Baie de Quiberon (Goubert, en prép., modifiée d'après Stanisière et al., 2013). ....	115
Figure 81. Localisation des stations de mesures du programme RISCO (Goubert, en prép.).....	116
Figure 82. Évolution de l'équitabilité des assemblages de foraminifères en fonction de la profondeur (en m CM) (Poirier, Goubert, en prép.).....	117
Figure 83. Corrélation entre les assemblages A et B et les pourcentages de mortalité des naissains BSP (Poirier, Goubert, en prép.).....	117
Figure 84. Distribution spatio-temporelle des assemblages A et B associés aux mortalités des naissains BSP (Poirier, Goubert, en prép.).....	118
Figure 85. Teneurs minimales en oxygène dissous (mg/l) pour les eaux de fond de 2000 à 2006 (P. Cugier, modèle Mars 3D, modifiée d'après Stanisière et al., 2013). ....	119
Figure 86. Distribution des concentrations totales en ETMs (par rapport au fond géochimique) dans les sédiments de surface des ports, des rivières, de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016). ....	121
Figure 87. Pourcentage moyen de biodisponibilité des ETMs dans les sédiments de surface de la Baie de Quiberon et du Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016).....	122
Figure 88. Représentation (en pourcentage) de la spéciation moyenne des ETMs dans les sédiments de surface de (a) la Baie de Quiberon et du (b) Golfe du Morbihan (Jimenez, 2016). ....	122
Figure 89. Localisation des ports étudiés (Jimenez, 2016). ....	123
Figure 90. Concentrations en ETMs dans la fraction <math><63 \mu\text{m}</math> et <math><2 \text{ mm}</math> des sédiments de surface des ports en avril 2013 (Jimenez, 2016). ....	124
Figure 91. Évolution temporelle des concentrations en ETMs de cinq ports morbihannais (modifiée d'après Jimenez, 2016). ....	125
Figure 92. Les teneurs en fer et en zinc des sédiments de surface de la Baie de Quiberon : Corrélations entre les teneurs en fer et en zinc et comparaison avec le Golfe du Morbihan ; Localisation des échantillons à faibles/fortes concentrations en fer en Baie de Quiberon ; Comparaison avec les zones à fortes mortalités d'huîtres (Goubert, en prép.).....	126
Tableau 1. Traits de vie des foraminifères benthiques.....	43
Tableau 2. Objectifs spécifiques associés aux reconstitutions paléoenvironnementales à partir des différentes carottes. ....	65
Tableau 3. La conchyliculture dans le Morbihan : espèces et pratiques.....	86
Tableau 4. Bilans sédimentaires modélisés (Tessier C. et al., 2012) et calculés par différentiels bathymétriques (Goubert & Menier, 2005). ....	98
Tableau 5. Caractéristiques des trois sous-secteurs du Golfe du Morbihan.....	103
Tableau 6. Les cinq lots d'huîtres installés pour le programme RISCO.....	116
Tableau 7. Synthèse des concentrations en EMTs de six ports par rapport aux seuils N1/N2.....	123
Tableau 8. Les grandes caractéristiques de la partie peu profonde et profonde du secteur ostréicole de la Baie de Quiberon.....	127