

MASTER SML

**MENTION
STPE
PARCOURS
GO
OPTION**

Sédimentologie et Paléoenvironnement

Sarah Ruellan

Etude comparative des protocoles d'extraction palynologique : identification de la meilleure méthode pour l'étude des dinokystes dans les sédiments estuariens

Mémoire de stage de Master1
Année Universitaire **2022-2023**
Structure d'accueil : **IUEM-UBO**

Maîtres de stage : **PENAUD Aurélie** et **VALERO Clara**
Collaborateurs : **LAMBERT Clément** et **MERTENS Kenneth**

Résumé

Depuis la fin des années 1980, le nombre de blooms d'algues toxiques a augmenté de manière abrupte et ininterrompue depuis. Parmi ces algues, le dinoflagellé *Alexandrium minutum* est suivi dans les eaux côtières par des réseaux d'observation (REPHY). Ce dinoflagellé est également producteur de kystes (dinokystes ou stades dormants du cycle de vie de certains dinoflagellés) potentiellement fossilisables. De plus, l'analyse des sédiments pour les assemblages dinokystes requiert des traitements chimiques. Si ce protocole est maîtrisé depuis de nombreuses décennies en palynologie, la non-observation d'*A. minutum* dans les lames palynologiques faites à partir de sédiments récents amène à poser la question de la méthode appropriée pour une observation la plus complète possible des assemblages dinokystes fossiles. Ainsi, l'objectif premier de ce stage était de réaliser un protocole moins agressif reposant sur la séparation de phases minérogéniques/biogéniques par gradient de densité. Ainsi, une comparaison des 2 protocoles a été effectuée à partir de 2 carottes sédimentaires prélevées au Port de Brest (KS-03 et KS-06) et couvrant la période 1936-2009. La mise en place inédite de ce protocole au laboratoire Geo-Ocean s'est toutefois avérée non propice à la concentration des dinokystes sur lames pour la réalisation d'assemblages robustes. Nous avons finalement opté pour une étude paléoécologique haute résolution (11 ans) des dinokystes selon le protocole palynologique conventionnel, tout en comparant les assemblages dinokystes reconstruits avec d'autres proxies (ADN, géochimie, sédimentologie) sur ces mêmes archives afin de discuter des trajectoires récentes de ce site d'étude (Port) jamais étudié jusqu'à présent d'un point de vue palynologique.

Mots-clés : Dinokystes, protocoles palynologiques, étude de trajectoire, comparaison multi-proxies.

Abstract

Since the late 1980s, the number of toxic algal blooms has risen steeply and uninterruptedly. Among these algae, the dinoflagellate *Alexandrium minutum* is monitored in coastal waters by numerous observation networks. This dinoflagellate also produces cysts (dinocysts or dormant stages in the life cycle of certain dinoflagellates). Sediment analysis for dinocyst assemblages requires chemical treatments. Although this protocol is performed for decades in palynology, the failure to observe *A. minutum* in palynological slides corresponding to modern sediments raises the question of the most appropriate method for a complete observation of fossil dinocyst communities. The primary objective of this internship was to try out a less aggressive protocol based on the separation of minerogenic/biogenic phases by density gradient. A comparison of the 2 protocols was carried out using 2 sediment cores taken from the Brest harbour (KS-03 and KS-06), covering the period 1936-2009. However, the unprecedented implementation of this protocol at the Geo-Ocean laboratory proved not to be conducive to the concentration of dinocysts on slides for the reconstruction of robust dinocyst assemblages. We finally opted for a high-resolution (11 years) paleoecological study of dinocysts using the conventional palynological protocol, while comparing the reconstructed dinocyst data with other proxies (DNA, geochemistry, sedimentology) on these same archives to discuss the recent trajectories of this study site (harbour) never studied yet from a palynological point of view.

Keywords : Dinocysts, palynological protocols, paleoecology, multi-proxy analysis.

Sommaire

Listes des tableaux.....	2
I. Contexte.....	5
1. Cadre de l'étude.....	5
a) La rade de Brest	5
b) Contexte sédimentaire	6
2. Impact anthropique	7
II. Matériels et méthodes.....	9
1. Carottes KS-03 et KS-06.....	9
2. Analyses granulométriques	10
3. Protocole palynologique	10
a) Les Dinoflagellés	10
b) Protocoles palynologiques	12
c) Analyses palynologiques : identifications et traitement des données	13
III. Résultats	14
1. Analyses sédimentologiques	14
2. Analyses palynologiques.....	15
a) Diversité et concentration	15
b) Assemblages de dinokystes et palynozones	16
IV. Discussion	19
1. Comparaison spatio-temporelle des assemblages entre le Port et la baie de Daoulas	19
a) Comparaison spatiale	20
b) Comparaison Temporelle	20
2. Dynamique temporelle des données sédimentologiques et paléoécologiques en rade de Brest	21
a) Concentrations totales et diversité en dinokyste	23
b) Données paléogénétiques	23
c) Données Titane et Calcium.....	24
V. Conclusion et perspectives	25
Références	27
Annexes	29

Liste des Figures

Figure 1 : Carte de localisation, de bathymétrie, géologique de Brest et carottes utilisées.....	5
Figure 2 : Carte de la répartition sédimentaire en rade de Brest.....	7
Figure 3 : Cycle de vie des Dinoflagellés.....	11
Figure 4 : Formation au protocole de Bolch	12
Figure 5 : Données sédimentologiques et granulométriques.....	14
Figure 6 : Indice de diversité.....	15
Figure 7 : Assemblages des carottes KS-03 et KS-06.....	17
Figure 8 : Tableau comparatif des assemblages dinokystes de KS-03-06 et I-09.....	18
Figure 9 : Mise en parallèle des données	21

Listes des tableaux

Tableau 1 : Matériels étudiés durant ce stage.....	9
--	---

Introduction

La rade de Brest s'établit selon un continuum 'Terre-Mer' soumis à de nombreuses contraintes naturelles (géologie, hydrologie, bathymétrie et hydrodynamisme) et anthropiques (pressions par l'Homme nombreuses et conséquentes) et abrite une grande diversité d'écosystèmes terrestres (bassins versants) et marins (rade). Ce socio-écosystème se dégrade et affecte en retour les usages et activités humaines (ex : interdiction de pêche). Il est important de se questionner sur la trajectoire passée de ce socio-écosystème afin d'évaluer les facteurs de forçage qui ont pu mener à la dégradation contemporaine de la qualité de ses eaux côtières.

Des carottes de la rade de Brest ont d'ores et déjà permis de retracer des transformations environnementales majeures post-seconde guerre mondiale, et notamment des changements paysagers (Lambert et al., 2018) et des contaminations chimiques (Siano et al., 2021), permettant d'émettre des hypothèses sur les différentes étapes qui ont mené à modifier profondément les communautés protistes (Siano et al., 2021) et à voir croître de manière très spectaculaire des blooms d'algues toxiques tels que ceux des dinoflagellés *Scrippsiella donghaiensis* et *Alexandrium minutum* depuis les années 1980 (Klouch et al., 2016). Les dinoflagellés sont des micro-algues dont certaines espèces produisent des kystes (dinokystes), potentiellement fossilisables (dinokystes résistants), qui sont d'excellents marqueurs de la reconstitution des environnements et climats passés (Penaud et al., 2018). Cependant, malgré le fait que les blooms d'*A.minutum* sont toujours plus importants et que cette espèce produise des kystes, ces derniers ne sont pas observés sur les lames palynologiques servant de matériel d'étude communément utilisé pour reconstruire les assemblages en biostratigraphie, paléoécologie et paléocéanographie depuis des décennies (Penaud et al., 2018).

L'une des hypothèses émises pour expliquer l'absence de kystes d'*A.minutum* dans les sédiments récents serait le protocole palynologique utilisé. Celui habituellement mis en place est le protocole standardisé effectué au laboratoire EPOC à l'université de Bordeaux. Il fait appel à plusieurs attaques à l'acide chlorhydrique puis fluorhydrique, méthodes agressives qui pourraient, d'après l'hypothèse émise, possiblement détruire les microfossiles d'intérêt.

Le but premier de ce stage était de comparer le protocole palynologique habituellement utilisé avec le protocole de Bolch, utilisé pour séparer et concentrer les dinokystes vivants à partir des sédiments

marins (Bolch, 1997). Ce dernier consiste à séparer les phases minérogéniques et organiques par gradient de densité, avec l'utilisation du polytungstate de sodium et permet de réduire, qui plus est, le temps du protocole de 4 jours à 30 minutes.

L'objectif était ainsi d'effectuer les 2 protocoles en parallèle sur les mêmes échantillons de sédiments de la rade de Brest, et d'intercomparer les assemblages reconstruits afin de discuter les avantages et inconvénients des deux méthodes et de voir si les taxons toxiques sont bel et bien identifiés en l'absence d'attaques acides du sédiment brut.

Dans un second temps, le stage consistait à réaliser une analyse inédite de la succession temporelle des assemblages dinokystes à partir de 2 carottes prélevées au port de Brest, précédemment datées (carotte KS-03 : Delebecq et al., 2020 ; carotte KS-06 : Siano et al., 2021), et récemment étudiées vis-à-vis de leurs signatures ADN sédimentaire (carotte KS-06 : Siano et al., 2021) et chimique par ICP-AES (carottes KS-03 et KS-06 : stage L3-UBS de Loeiz Saguét, 2023).

Les nouvelles informations acquises durant ce stage : étude granulométrique et étude des assemblages dinokystes ont été couplées au jeu de données multi-proxies précédemment acquis afin de reconstruire les trajectoires de dernières décennies (depuis 1936) à résolution décennale en termes de sédimentation et d'évolution des données chimiques et microfossiles sous forçages climatiques et anthropiques.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ISblue « PACTE » (*PAst to Current land-sea Continuum : socio-ecosystem Trajectories derived from a regional pilot site* ; coord. Aurélie Penaud), et de la thèse de Clara Valero (2022-2025) « RETROSED » (*Etude rétrospective des socio-écosystèmes côtiers anthropocènes à partir des sédiments estuariens : application à la rade de Brest*) directement connectée à ce même projet, qui visent à comprendre l'ampleur des déséquilibres auxquels la rade de Brest est confrontée depuis 1800 en tenant compte des forçages climatiques et anthropiques (usages et pratiques humaines sur les bassins versants, notamment agricoles et industrielles).

I. Contexte

1. Cadre de l'étude

a) La rade de Brest

La rade de Brest se situe à l'extrême ouest de la Bretagne. Elle se situe dans la zone du cisaillement Nord-Armoricain, à la jonction de deux domaines géologiques du Massif Armoricain, héritages de l'orogénèse hercynienne (342-251 Ma), le domaine du Léon et le domaine centre Armoricaïn (Ballevre et al., 2013), séparés par la faille de l'Elorn d'orientation N70°E (Gregoire et al., 2016), qui se trouvent en prolongement du cisaillement Nord Armoricaïn. Au nord de la rade, le socle est constitué de granites et de schistes du Briovérien tandis qu'au Sud, le socle est constitué en grande majorité de schistes du Paléozoïque.

La rade est une grande baie semi fermée sous régime macrotidal, de 181 km², reliée à l'océan Atlantique par un passage de 6 km de long et 1,8 km de large, appelé le "goulet" (Figure 1).

Elle est alimentée par plusieurs rivières, principalement l'Aulne et l'Elorn, dont les bassins versants représentent 2 650 km². Elles contribuent à 85 % du débit total des cours d'eau se jetant dans la rade (Lambert et al., 2018) ; le débit de l'Aulne étant supérieur de 5 à 6 fois à celui de l'Elorn.

L'intérieur de la rade possède de nombreuses baies et anses bordant l'ensemble du littoral, dont la profondeur moyenne est de 8 m. La côte Nord de la rade est fortement anthropisée de par la présence de la ville de Brest.

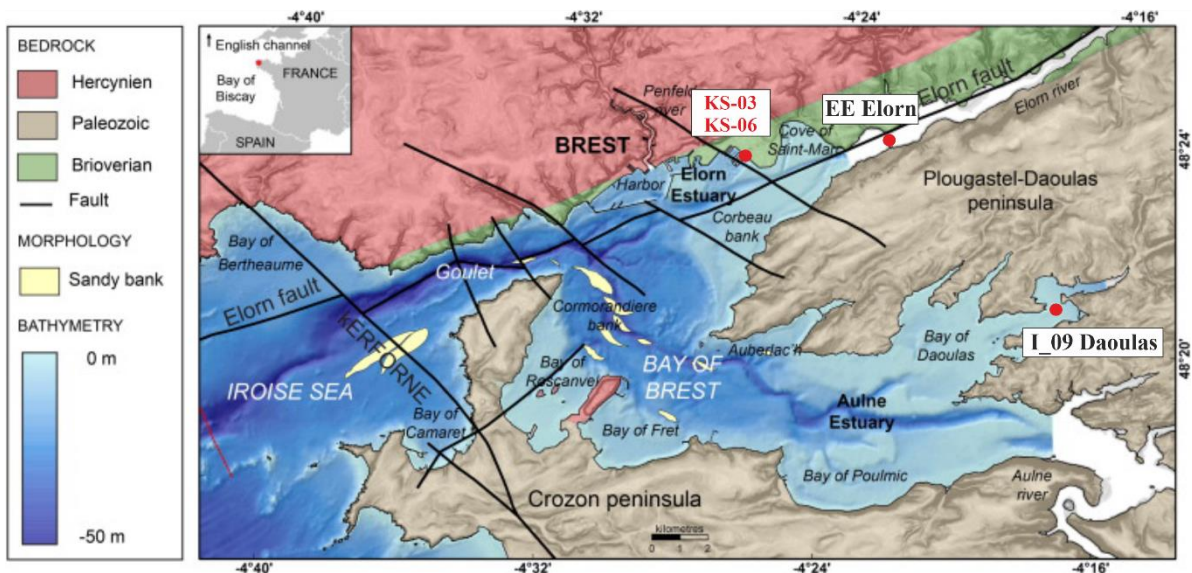


Figure 1 : Carte de localisation, bathymétrique et géologique de la baie de Brest et de la mer d'Iroise (Gregoire et al. 2017). Localisation des carottes utilisées dans cette étude : carottes étudiées durant ce stage (KS03 et KS-06) et comparées dans la discussion (EE et I-09).

La Bretagne possède, dû à sa position sur la frange littorale de l'Océan Atlantique Nord-Est, un régime climatique de type océanique tempéré. Cela se caractérise par des températures douces, une certaine humidité, des pluies abondantes et des vents soutenus (Belleguic et al., 2012). Les westerlies, des vents soufflant principalement d'Ouest en Est aux latitudes moyennes, véhiculent de l'air chaud et humide, ce qui induit de faibles amplitudes thermiques avec des moyennes annuelles de l'ordre de 10 °C. La Bretagne est soumise à un régime de pluies océaniques régulières, dont les valeurs de précipitations varient entre 600 mm et 16000 mm, précipitations principalement hivernales.

b) Contexte sédimentaire

La sédimentation en rade durant l'Holocène (i.e. notre période interglaciaire débutée à 11 700 ans BP) n'est pas uniforme mais s'est faite par étapes successives. En effet, la diminution de l'espace d'accommodation et le recul rapide du littoral ont parfois empêché la sédimentation dans certains secteurs et ont pu même provoquer l'érosion de précédents dépôts en d'autres zones (Gregoire et al., 2017). Ainsi, la sédimentation en rade est complexe, compartimentée et consiste en de nombreux dépôts d'âges différents sur les 10 000 dernières années, parfois caractérisés par des surfaces d'érosion majeures (Gregoire et al., 2017). La sédimentation peut être schématisée selon 3 grandes entités dominées par des régimes hydrodynamiques différents : externe (influence Atlantique à l'ouest du goulet), intermédiaire (représenté par le goulet et les paléochenaux de l'Aulne et de l'Elorn), interne (représenté par les baies et criques peu profondes) (Gregoire et al., 2016).

La répartition des sédiments dans la rade de Brest est répartie selon les courants : les sédiments grossiers se retrouvent principalement dans les zones profondes, bassin central et chenaux, alors que les zones latérales moins profondes présentent des dépôts hétérogènes avec une composante vaseuse plus marquée. Les silts sont surtout concentrés aux abords des estuaires et plus particulièrement ceux de l'Aulne et l'Elorn. Cette distribution sédimentaire s'explique par les composantes de la chenalisation des courants de marées, l'action de la marée et l'influence des colonies biogènes. Cette représentation de répartition sédimentaire est basée sur une dynamique estuarienne caractérisée par de forts courants de marées qui permet de maintenir une couverture peu mobile (Gregoire, 2016) (Figure 2).

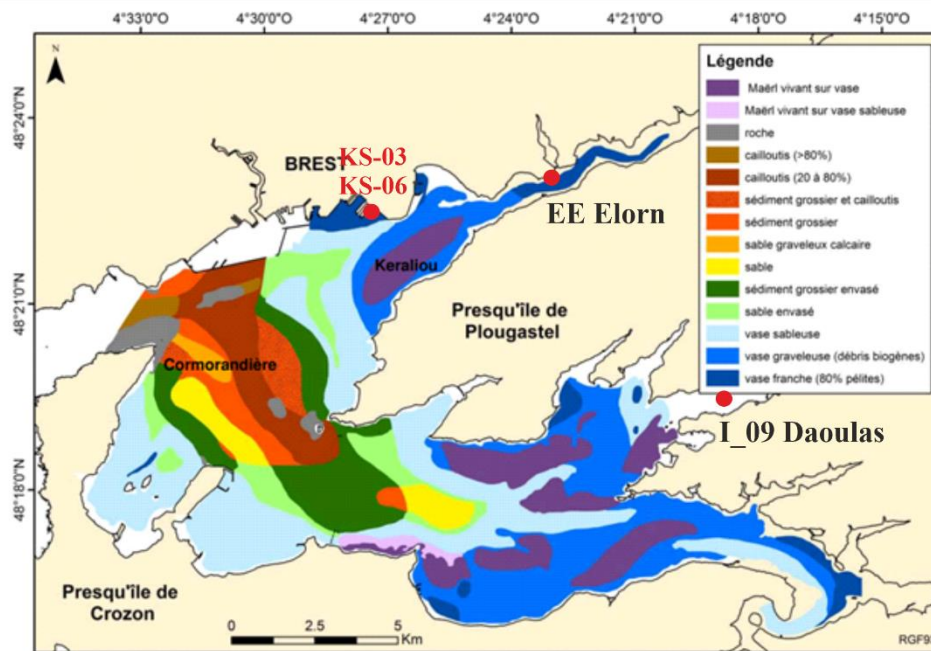


Figure 2 : Carte de la répartition sédimentaire en rade de Brest (d'après Fichaut, 1984 et Guérin, 2004).

Localisation des carottes utilisées dans cette étude : carottes étudiées durant ce stage (KS03 et KS-06) et comparées dans la discussion (EE et I-09).

2. Impact anthropique

Le Finistère est un des principaux départements agricoles en France avec 60 % de surfaces cultivées ou pâturées. Le département se caractérise par la plus grande étendue de haies recensée en Bretagne, soit environ 60 000 km. Les superficies agricoles représentent plus de 75,4% des bassins versants de la rade de Brest. Au 19^{ème} siècle, le paysage rural était essentiellement composé de parcelles cultivées avec une végétation relativement faible et peu d'arbres. A partir de la seconde moitié du siècle, entre 1850 et 1950, le réseau de haies s'est considérablement développé et a vu la fragmentation des terres agricoles en de nombreuses petites parcelles cultivées délimitées par des pentes et des haies composées de buissons et d'arbustes (Lambert et al. 2018).

Les pratiques agricoles, et en particulier les élevages, sont les facteurs principaux de l'augmentation des taux de phosphore et des concentrations élevées de nitrates dans les rivières bretonnes, dû à une très forte utilisation de fertilisants, composés des déchets des élevages, contenant du nitrogène et des acides phosphoriques. Les utilisations de fertilisant ont commencé à diminuer après un record des concentrations en nitrate dans l'eau atteint en 1996. Depuis, ces concentrations se sont vu diminuer de 35% dans les eaux de surface de la rade de Brest et de 26% dans les bassins versants. Les terres

agricoles ont décliné dans les années 2000-2010 au profit de l'urbanisation mais les taux de pollution restent élevés ; les engrais étant encore fortement utilisés (Lambert et al. 2018).

De plus, l'un des impacts anthropiques les plus importants de ces dernières années au niveau du port de Brest est la construction du polder, une étendue artificielle de terre gagnée sur la rade. Sa construction, débutée en 1856, se poursuit encore aujourd'hui. En 1978, cette infrastructure de 40 ha, appelée polder 124, s'étend de l'anse de St Marc jusqu'au niveau des jetées de la rade Abri. Plus récemment, en 2016, des travaux ont été lancés afin d'aménager 12 ha du polder 124 et, en 2018, une seconde étape a consisté en la stabilisation du nouveau polder et l'aménagement d'un deuxième quai sur la partie nord de cet espace (Gregoire, 2016).

Le secteur de l'Elorn n'a pas subi de changements majeurs en termes de dynamiques sédimentaires suite à la première phase de poldérisation, indiquant que la construction du polder n'aurait eu que des conséquences mineures (Fichaut, 1984). Toutefois, le projet PALMIRA (« Paléoécologie d'*Alexandrium Minutum* en rade de Brest », Ifremer, resp. R. Siano, 2016-2017) a été mené récemment suite à la seconde phase de poldérisation du port avec pour enjeu de déterminer si les travaux effectués sur le nouveau polder du port de Brest risquaient de favoriser des efflorescences d'algues toxiques. Cette étude a montré que les travaux présentaient effectivement un risque avéré de remettre en suspension des microalgues toxiques et qu'il était préférable d'effectuer les dragages en hiver, quand les conditions sont défavorables pour de telles efflorescences. En termes de recherche, le projet a permis de montrer la faisabilité et l'apport de la paléogénétique pour les études des écosystèmes côtiers à partir de longues carottes sédimentaires de 3 à 3,5 m de long. C'est dans ce contexte là que ce stage s'insère. Il s'agira pour nous de repartir de ce matériel prélevé au port (carottes KS-03 et KS-06 : [Figures 1 et 2](#)) et d'étudier les parties les plus récentes datées aux radionucléides pour compléter les données en ADN sédimentaires par des analyses sédimentologiques et palynologiques communément déployées dans les études paléoenvironnementales et de les mettre en perspective des données moléculaires précédemment acquises.

II. Matériels et méthodes

1. Carottes KS-03 et KS-06

Les deux carottes étudiées, KS-03 et KS-06, pendant ce stage ont été prélevées au port de Brest (cf. [Figures 1 et 2](#)). Les échantillons étudiés durant ce stage sont ceux prélevés aux sommets des carottes KS-03 et KS-06, les 35 premiers centimètres, correspondant à un âge allant de 1879 à 2008.

Carotte	ICP-AES (L.Saguet stage de L3)	Perte au Feu (L.Saguet stage de L3)	XRF	Traitements palynologiques (ce stage)	Assemblages dinokysts (ce stage)	Analyses granulométriques (ce stage)	Localisation	Coordonnées	Longueur	Profondeur	Mission	Typologie d'acquisition	Date d'acquisition	Valorisation antérieure
KS-03	X (11)	X (11)	---	X (11)	X (4)	X (11)	Port de Brest	48°22'57.60"N 04°26'49.80"W	332 cm	7.80 m	PALMIRA (IFREMER)	Carottage gravitaire	25 avril 2017	Delebecq et al. 2020
KS-06	X (6)	X (6)	---	X (1)	X (7 dont 6 déjà traités en 2017-2018)	X (4)		48°22'52.74"N 04°26'54.60"W	344 cm	7.10			26 avril 2017	Siano et al., (2021); Stage M2, Clara Valero (2022)
I-09 (Daoulas)	---	---	Lambert et al., (2018)	---	---	---	Embouchure du Daoulas	48°20, 777' N 4°17,6868' W	58 cm	3 m	SERABEQ I (IFREMER)	Carottage gravitaire	2014	Lambert et al. (2018); Klouch et al. (2016); Siano et al., (2021)

Tableau 1 : Matériel étudié durant ce stage (KS-03 et KS-06) ou mis en comparaison (I-09) et analyses réalisées sur chaque séquence dans le cadre de ce stage ou dans le cadre d'études antérieures

Les carottes KS-03 et KS-06 prélevées durant le projet PALMIRA ont été découpées à quai afin de congeler les échantillons immédiatement après récupération des carottes, en vue d'analyses paléogénétiques. Chacune des archives a été datée par le biais de datations radionucléides (cf. exemple du modèle d'âge publié dans Delebecq et al., 2020 pour la carotte KS-03 : [Annexe 5](#)) et c'est à partir de reliquats de sédiments bruts issus de ces prélèvements que les analyses sédimentologiques et palynologiques ont été menées.

Compte tenu de la proximité géographique des carottes KS-03 et KS-06 (100m de distance ; cf. [Figures 1 et 2](#)) et de leurs signatures chimiques semblables (stage L3, Loeiz Saguet, 2023, cf. [Annexe 6](#)), nous les avons réunies pour former une seule et même séquence composite pour le port de Brest (que nous nommerons KS-03-06 dans la suite de ce rapport). Ce composite permettra de discuter, *in fine*, une période de temps comprise entre 1879 et 2008, période qui sera mise au regard des données de Lambert et al. (2018) acquises sur une carotte prélevée en baie de Daoulas (1871 à 2013).

2. Analyses granulométriques

Des analyses granulométriques ont été réalisées sur 15 échantillons, 11 provenant de la carotte KS-03 et 4 provenant de la carotte KS-06 ([Tableau 1](#)). Deux séries d'échantillons ont été préparées l'une "Totale" et l'autre "Décarbonatée", la fraction dite décarbonatée ayant subi une attaque HCl 37% au préalable. Les analyses ont été réalisées avec un Granulomètre Malvern 2000 et le logiciel "Mastersizer 2000" a permis le calcul des différents paramètres : pourcentage volumétrique du sable, silt et argile, granulométrie médiane (D50) et 90e percentile (D90).

3. Protocole palynologique

a) Les Dinoflagellés

Les dinoflagellés sont des microalgues eucaryotes unicellulaires caractérisées par une paire de flagelles qui les aident à optimiser leur position dans la colonne d'eau. Ils représentent le seul groupe de protistes à avoir à la fois des taxons hétérotrophes, autotrophes et mixotrophes (Penaud et al., 2018). Ils jouent un rôle trophique primordial faisant partie du phytoplancton des eaux douces et marines, habitant les 50 premiers mètres de la colonne d'eau.

Environ 15 % des espèces connues de dinoflagellé produisent des kystes ou dinokystes qui sont les stades dormants de leur cycle de vie ([Figure 3](#)).

b) Protocoles palynologiques

Le 1er protocole utilisé pendant ce stage, fut le protocole standardisé d'extraction des grains de pollen et des dinokystes. Il consiste en une succession d'attaques chimique à l'acide chlorhydrique puis fluorhydrique (cf. [Annexe 1](#)). Au cours de la phase de traitements des échantillons sont ajoutés des spores de *Lycopodium* en nombre connu qui permettent d'estimer les concentrations absolues des dinokystes dénombrés en nombres de kystes/cm³. La formule est la suivante :

$$\text{Concentrations en dinokystes} = \frac{\text{Nombres de dinokystes}}{\text{Volume de l'échantillon}} \times \frac{\text{Nombres de lycopodes ajoutés}}{\text{Nombres de lycopodes comptés}}$$

Le 2ème protocole réalisé est basé sur la séparation des phases minérogéniques et biogéniques par gradient de densité. Nous (Clara Valero, Aurélie Penaud et moi-même) sommes allées à la station Ifremer de Concarneau (LER Bretagne Occidentale) où Kenneth Mertens nous a formé au protocole de Bolch le 2 mai 2023 en tout début de stage (cf. [Annexe 2](#)).



Figure 4 : Formation au protocole de Bolch par moi-même lors d'une journée à Concarneau.

L'intérêt de mettre en place ce protocole est de proposer une alternative moins agressive au protocole palynologique en place au laboratoire de l'IUEM.

Ainsi le protocole de Bolch (Bolch, 1997) ne nécessite pas l'utilisation d'acides (ce qui supprime le risque d'accident, dû notamment à la manipulation de l'HF sous hotte ventilée). De plus, il apporte un gain de temps considérable, prenant 30 minutes au lieu de 4 jours pour le protocole palynologique.

Le protocole de Bolch ne s'est pas avéré concluant, les dinokystes, déjà peu présents en rade de Brest, sont en nombre beaucoup trop faible, à peine quelques-uns, pour permettre un comptage efficace.

En effet pour un comptage correct il y a nécessité d'observer au moins 100, et au mieux 300, individus. Et, après vérification du culot, la séparation avait bien fonctionné ne montrant aucun dinokystes mal séparé par la technique utilisée. Le protocole n'est, en l'état, pas utilisable.

Si le protocole a, pour l'instant, été mis de côté, il sera probablement réemployé dans le futur. En effet des diatomées ont été observés en très bon état, laissant penser que ce protocole pourrait s'avérer approprié pour leur détermination et études d'assemblages fossiles. Intéressant car les assemblages diatomées sont envisagés dans le cadre de la thèse de Clara Valero.

La comparaison des résultats n'étant pas possible, le reste de cette étude s'est recentré sur une analyse palynologique "classique" avec une augmentation de la résolution prévue initialement (voir [Annexe 3](#)).

c) Analyses palynologiques : identifications et traitement des données

Les échantillons ont été analysés au microscope Leica DM 2500 au grossissement x630 avec huile à immersion. Ce fort grossissement permet une bonne visualisation des dinokystes, mettant en avant les caractéristiques et critères morphologiques permettant leur détermination (Rochon et al, 1999). Un comptage de 100 individus a tenté d'être atteint pour chaque échantillon analysé.

Le logiciel Leica Application Suite a été utilisé pour acquérir des images des dinokystes vues au microscope (cf. [Annexe 4](#)).

Pour la mise en forme des résultats ont été utilisés les logiciels :

- 1) **Psimpoll**, un programme utilisé pour représenter les assemblages reconstruits en proportionnelle et analyser les données sous forme de cluster contraint par la succession chronologique des échantillons afin de mettre en évidence des ruptures dans l'évolution des pourcentages des différents taxons (méthode CONISS),
- 2) **Past**, un outil d'analyse de données scientifiques qui calcule des indicateurs statistiques, générer des graphiques et de calculer différents indices de diversité,
- 3) et la suite graphique **CorelDRAW**, un logiciel, de dessin vectoriel.

Avec Past, les indices qui nous ont plus particulièrement intéressé sont :

1) l'**indice de Margalef** : $(S - 1) / \ln(n)$, un indice de diversité qui normalise le nombre de taxons différents dénombrés par le nombre d'individus total compté ;

2) l'**indice de dominance** : $D = \sum(n_i/n)^2$, il est compris entre 0 et 1, si l'indice est proche de 0 tous les taxons ont des abondances proches (assemblage équi-diversifié), s'il est proche de 1, il y a un taxon qui domine très fortement les autres (sur-représentation d'un taxon opportuniste, cosmopolite ou advection dans la communauté générant un déséquilibre dans les pourcentages).

III. Résultats

1. Analyses sédimentologiques

L'acquisition de données sédimentologiques nous a permis de mettre en évidence des variations granulométriques sur les données compilées KS-03-06 depuis 1936 (Figure 5). Pour la période 1879-1936, il ne restait pas suffisamment d'échantillon pour pouvoir réaliser les acquisitions.

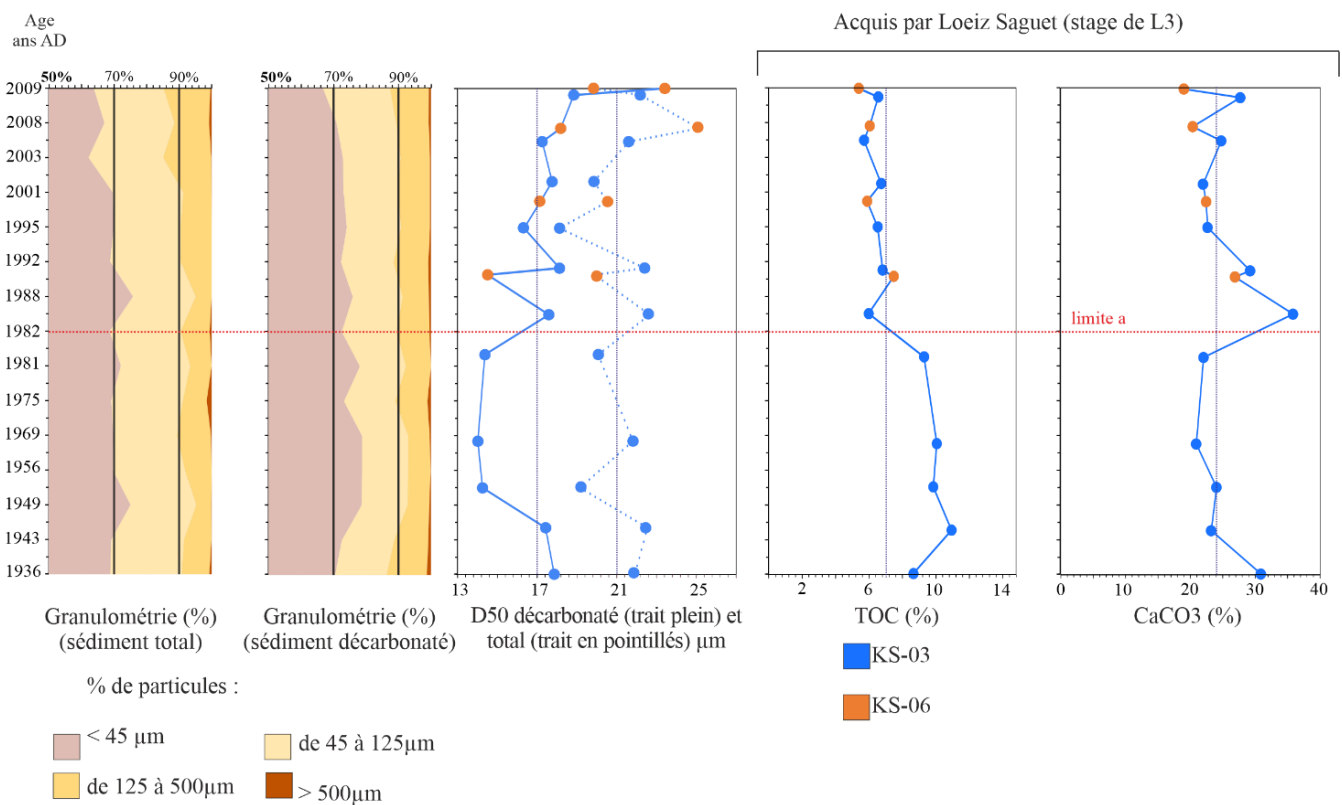


Figure 5 : Données sédimentologiques acquises sur la séquence composite réalisée à partir des carottes KS-03 (points bleu) et KS-06 (points orange), en âge. Les données granulométriques acquise durant ce stage sont représentées en parallèle des données de perte au feu (TOC et % CaCO₃) acquises par Loeiz Saguet durant son stage L3 (2023).

Les données sédimentologiques de chaque carotte présentent des observations cohérentes (points bleu et oranges sur la Figure 5), validant la compilation réalisée ici et destinée à augmenter la résolution temporelle de nos observations.

Les sédiments analysés sont argilo-silteux (pourcentages volumétriques les plus élevés compris entre 45 μm et 125 μm) tout le long du composite KS-03-06, avec des médianes (D50) sur sédiment total et décarbonaté de 21 et 17 μm , respectivement (Figure 5).

Une limite a été définie à l'année 1982, appelée "limite a", à partir de l'augmentation des données de D50 décarbonaté, i.e. correspondant à la phase détritique. Ainsi, avant 1982, la moyenne de D50 décarbonaté est de 15 μm et ; après 1982 ; cette moyenne est de 18 μm . La moyenne du D50 total reste, quant à elle, stable autour de 21 μm sur l'ensemble de la séquence. Cette limite est également visible à travers les valeurs de TOC et de CaCO_3 , leurs moyennes passant de 8 à 6% pour le TOC et de 22 à 26 % pour la calcimétrie, de part et d'autre de cette limite.

2. Analyses palynologiques

a) Diversité et concentration

Au total, 14 taxons différents ont été identifiés dans la séquence composite KS-03-06 avec une moyenne de 11 taxons différents par échantillon (Figure 6). L'indice de dominance, quant à lui, est compris entre 0.18 (minimum atteint en 1902) et 0.3 (maximum atteint en 1936) (Figure 6).

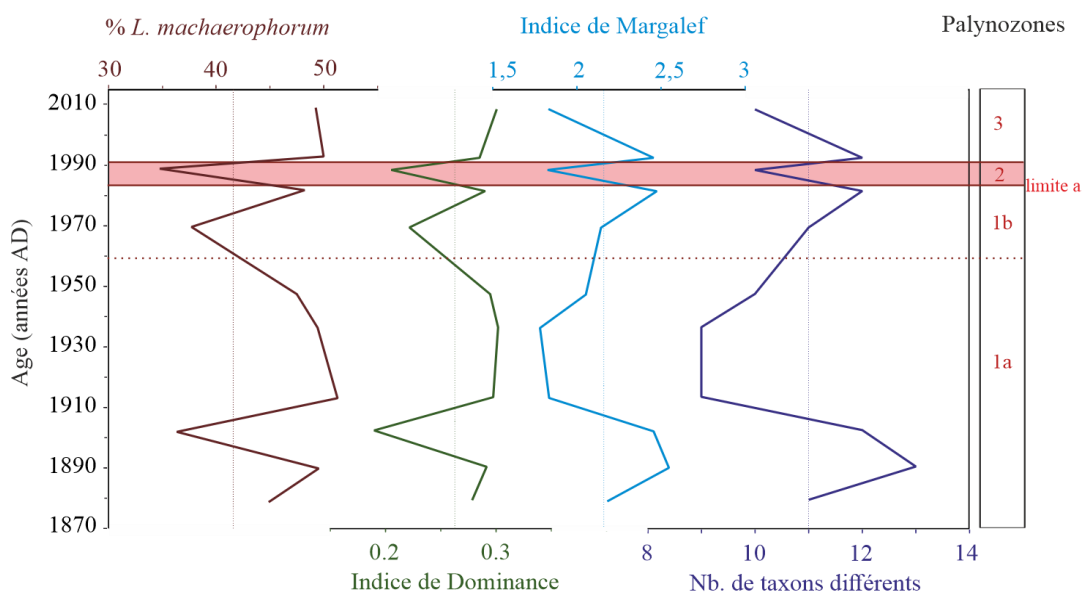


Figure 6 : Indices de diversité (dominance, Margalef, nombre de taxons différents) en parallèle avec les pourcentages de l'espèce dominante *L. machaerophorum* sur la séquence composite du Port (carottes KS-03 et KS-06). La limite a et les palynozones correspondent, respectivement, à un seuil sédimentologique discuté à partir de la Figure 5 et au cluster CONISS de la Figure 6.

Cet indice, toujours inférieur à 0,5 démontre ainsi un assemblage relativement équidiversifié sur l'ensemble des échantillons analysés. Pour autant, les faibles variations sont expliquées par la variation des pourcentages de l'espèce majeure identifiée dans nos assemblages, à savoir le taxon dinokyste *L.machaerophorum* (variant entre 40 et 50% en moyenne), une espèce typique des environnements estuariens. L'indice de Margalef (diversité normalisée par les comptages atteints) varie entre 1,7 (minimum atteint en 1936 avec n=9 taxons différents) et 2,5 (maximum atteint en 1890 avec n=14 taxons différents) avec une moyenne de 2,1.

b) Assemblages de dinokystes et palynozones

Les résultats des comptages de dinokystes dans les 11 échantillons analysés au total (pour un nombre total de 1201 dinokystes comptés au cours de ce stage) ont donc permis d'identifier 14 taxons différents au total (Figure 7). Le quinzième graphe sur la Figure 7 correspond au groupe *Spiniferites* spp. Il s'agit de taxons du genre *Spiniferites* qui n'ont pas pu être identifiés au niveau de l'espèce en raison de caractéristiques morphologiques mal observables et qui auraient pu être rapprochées des autres *Spiniferites* décrites dans nos observations et illustrées sur la Figure 7. Pour cette raison, ce groupe n'a pas été inclus dans le calcul de diversité.

Les assemblages de dinokystes de la séquence composite KS-03-06 sont dominés par 2 taxons autotrophes, *L. machaerophorum* et *S. membranaceus*, qui représentent à eux deux environ 60% des assemblages.

Les taxons observés ont été regroupés selon leur affinité environnementale en quatre groupe écologiques (Figure 7) :

- 1) Le groupe « Estuarien », représenté par *L. machaerophorum*,
- 2) Le groupe « Côtiers », représenté par les taxons : kystes de *P. daleii*, *S. bentorii*, *S. membranaceus*, *S. belerius* et *S. lazus*;
- 3) Le groupe « Mer Iroise », composé de *S. ramosus*, *O. centrocarpum*, *S. delicatus* et *S. mirabilis*;
- 4) Le groupe « Hétérotrophes », composé de *S. quanta*, kystes de *P. nudum* et *Echinidinium* spp.

Aussi, trois palynozones principales, nommées 1, 2 et 3 ont été déduites du cluster CONISS sous Psimpoll (Figure 7), la palynozone 1 ayant été subdivisée en 2 intervalles. Il est à noter que les valeurs de l'indice de dominance et de l'indice de Margalef sont globalement anti-corrélées, à l'exception de la palynozone 2 (Figure 6) où les 2 courbes présentent un même pic de diminution, attestant d'un assemblage atypique. En effet, en écologie, il est admis que, pour une communauté, si la dominance augmente (/diminue) alors la diversité est plus faible (/plus forte). Ainsi, la palynozone 2, qui ne

correspond qu'à un seul point, sera davantage considérée par la suite comme une zone de transition entre les palynozones 1 et 3 mais ne sera pas décrite indépendamment : on s'intéressera à la période avant 1982 (palynozone 1) et après 1992 (palynozone 3).

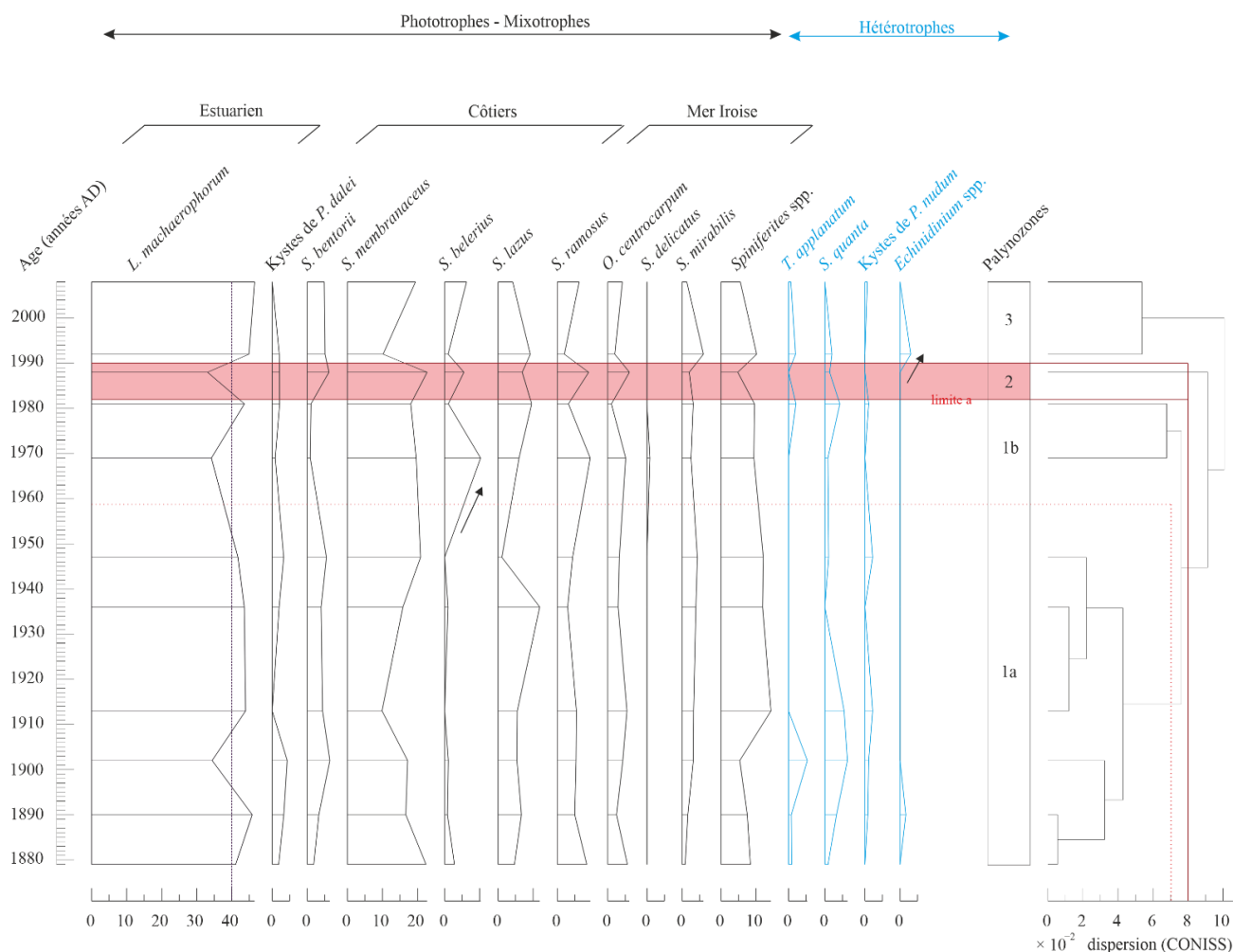


Figure 7 : Assemblages dinokystes (% des taxons) sur la séquence composite du Port (carottes KS-03 et KS-06) et cluster stratigraphiquement contraint (méthode CONISS) réalisé avec le logiciel Psimpoll. La limite a correspond à un seuil sédimentologique discuté à partir de la Figure 5.

La palynozone 1 (1879-1982) possède des assemblages présentant une dominance de *L. machaerophorum*, celui-ci représentant en moyenne 40% de l'assemblage. Les taxons hétérotrophes sont présents dans la sous-zone 1a. C'est leurs diminutions ainsi que l'augmentation de *S. beherius* qui définit la limite entre les sous-zones 1a et 1b. Ainsi, les dinokystes côtiers sont peu présents dans la sous-zone 1a mais leurs pourcentages augmentent dans la sous-zone 1b.

La palynozone 3 voit les pourcentages des groupes hétérotrophes, plus particulièrement *Echinidinium* spp. et des estuariens augmenter. Aussi, les pourcentages de *S. membranaceus* (groupe « côtiers ») augmentent à nouveau dans cette dernière palynozone.

IV. Discussion

1. Comparaison spatio-temporelle des assemblages entre le Port et la baie de Daoulas

Les assemblages dinokystes de la séquence composite KS-03-06 ont été mis en perspective avec les assemblages de la carotte I-09, prélevés en baie de Daoulas (Figure 8).

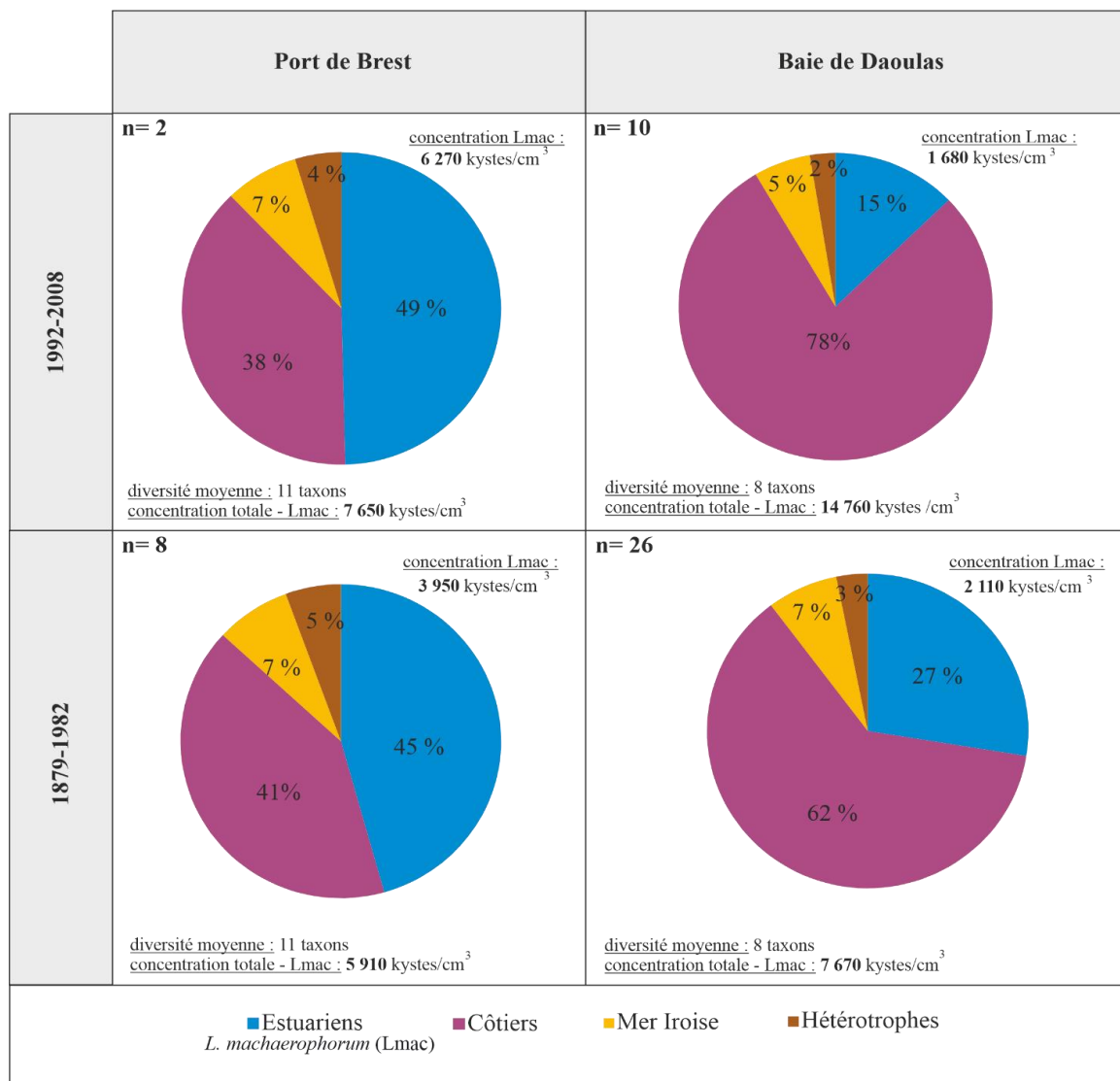


Figure 8 : Comparaison spatiale des assemblages dinokystes moyennés sur deux intervalles de temps sur la séquence composite du Port (carottes KS-03 et KS-06) et celle de la Baie de Daoulas (I-09 ; Lambert et al.2018).

Les carottes ont été séparées en 2 intervalles de temps définis par la limite sédimentologique « a » de 1982 (Figure 6) correspondant également à la transition entre les palynozones 1 et 3 (Figure 7). Ceci nous permet de mettre en perspective l'évolution spatio-temporelle des assemblages entre l'entrée (Port) et le fond (baie de Daoulas) de la rade de Brest.

a) Comparaison spatiale

La séquence composite du Port est dominée par les assemblages estuariens et côtiers et, plus précisément, par l'espèce estuarienne *L. machaerophorum* : 45 et 49 %, pour les intervalles 1879-1992 et 1992-2008, respectivement. La carotte I-09 est, quant à elle, largement dominée par le groupe des taxons dits « côtiers » : 62 et 78%, pour les intervalles 1879-1992 et 1992-2008, respectivement.

b) Comparaison Temporelle

Les assemblages de la séquence du Port sont plus stables dans le temps que ceux de la séquence de la baie de Daoulas, ces derniers étant caractérisés par une chute significative des pourcentages du taxon estuarien *L. machaerophorum*. De plus, il est à noter que les concentrations absolues en *L. machaerophorum*, augmentent fortement au Port (multipliées par 1,5) et diminuent en baie de Daoulas (d'un facteur 1,2), attestant bien que la chute des pourcentages de *L. machaerophorum* en fond de rade est bien le reflet d'une moindre production de ces kystes et n'est pas seulement la conséquence de l'augmentation des pourcentages de taxons dinokystes « côtiers ». Par ailleurs, les concentrations absolues calculées hors *L. machaerophorum* passent de ca. 8 000 à ca. 15 000 kystes/cm³ démontrant également une forte réactivité de la communauté dinoflagellé productrice des dinokystes dans les années 1980's. Au Port, c'est l'inverse, abondances et concentrations absolues de ce taxon estuarien augmentent et, essentiellement, vis-à-vis de ses concentrations absolues mais moins vis-à-vis de celles du reste de la communauté. Comment réconcilier ces observations ?

Le cycle de vie des dinoflagellés est très sensible aux variations de nitrates et de phosphores. Or, les apports en nutriments trouvent leur origine dans les intrants chimiques utilisés pour l'agriculture intensive. On sait, par ailleurs, que dans les années 1960-1970, le département détenait le record français d'utilisation d'engrais chimiques. Tous ces fertilisants ont fini par percoler jusqu'aux eaux côtières de la rade de Brest (Lambert et al., 2018), perturbant et modifiant les communautés protistes (Siano et al., 2021).

Par ailleurs, la baie de Daoulas, où les occurrences maximales de prolifération d'algues toxiques sont observées aujourd'hui dans la rade de Brest (Klouch et al., 2016), correspond également au site où les pourcentages de marqueurs polliniques d'agriculture et de décharges fluviales sont maximaux

quant on considère l'ensemble des sédiments modernes de la rade de Brest (Lambert et al., 2017). La baie de Daoulas représente ainsi un bassin singulier, semi-confiné, où les impacts des décharges fluviales seront plus critiques et impactantes sur les communautés reconstruites (Lambert et al. 2018).

Cette étude viendrait ainsi étayer une hypothèse récente quant à l'utilisation du bio-indicateur *L. machaerophorum* en tant que révélateur des perturbations anthropiques d'origine agricole (Penaud, HDR, 2021). Dans un bassin semi-confiné où les taux de nitrates sont très élevés et où le temps de résidence des eaux côtières est plus important, le dinoflagellé *L. polyedrum*, aujourd'hui très présent dans toutes les zones estuariennes (stratifiées) eutrophisées, producteur du dinokyste résistant *L. machaerophorum*, passerait par une autre stratégie de reproduction sexuée menant à la production de kystes temporaires non fossilisables (Figuerola et Bravo, 2005). A contrario, au Port de Brest, le cycle de vie (cycle de reproduction) de cette forme estuarienne serait moins perturbé (pourcentages plus stables de la communauté) car le brassage des eaux est plus important et les assemblages sont moins radicalement perturbés. Toutefois, l'expression de l'augmentation de la productivité pourrait ici se caractériser par un quasi doublement des kystes résistants *L. machaerophorum* dans les sédiments de la rade.

2. Dynamique temporelle des données sédimentologiques et paléoécologiques en rade de Brest

Les pourcentages des quatre groupes écologiques de la séquence composite KS-03-06 et de la carotte I-09 (Figure 9) ont été mis en regard de différentes données sédimentologiques et paléoécologiques acquises sur ces séquences, incluant également des données paléogénétiques (qPCR *Alexandrium minutum*, forme dinoflagellé toxique) acquises en baie de Daoulas et dans l'estuaire de l'Elorn (Klouch et al., 2016) ainsi qu'avec la courbe de l'évolution des concentrations en nitrates correspond à des données environnementales acquises à la station de Pont-Ar-Bled dans l'Elorn par les gestionnaires de Bassin Versant de l'Elorn (SBE) depuis les années 1970's (Figure 9).

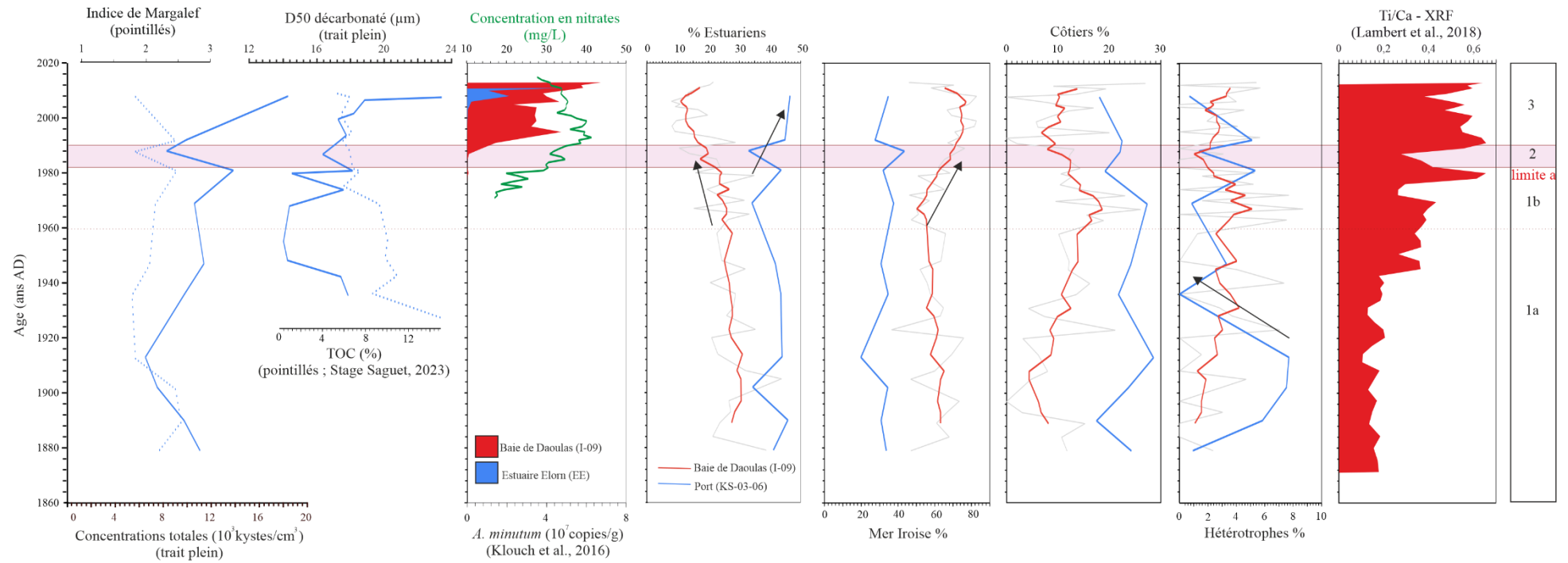


Figure 9 : Pourcentages dinokystes selon 4 groupes écologiques comparés sur les séquences du secteur Elorn (Port et Estuaire) et de la baie de Daoulas, mis en parallèle avec i) des données de concentrations totales, diversité, et sédimentologie (médiane et Total Organic Carbon – TOC) de la séquence composite du Port, ii) des données paléogénétiques (qPCR *Alexandrium minutum*) des deux secteurs, des données en nitrates d’Elorn (Klouch et al., 2016) et iii) le ratio Titane/Calcium (XRF ; Lambert et al., 2018).

Toutes les données en bleu (/rouge) correspondent au secteur Elorn (/baie de Daoulas). La limite a et les palynozones correspondent, respectivement, à un seuil sédimentologique discuté à partir de la Figure 5 et au cluster CONISS de la Figure 6.

a) Concentrations totales et diversité en dinokyste

On distingue deux périodes liant les courbes de concentrations totales et le D50 décarbonaté de la séquence composite KS-03-06. Avant les années 1980, les deux courbes semblent anti-corrélées, alors qu'aux alentours des années 2000, les concentrations totales en dinokystes augmentent, de même pour la granulométrie devient plus grossière.

La granulométrie grossière est corrélée à une diminution en concentration des palynomorphes.

Ce qui explique l'anti-corrélation entre la concentration en dinokystes et le D50 décarbonaté, observée avant les années 1980. Quand ce dernier est plus élevé, la granulométrie est plus grossière et les dinokystes sont moins concentrés.

L'inversion de ce schéma, observé à partir des années 2000, où l'on voit la granulométrie être de plus en plus grossière et la concentration en dinokystes augmenter également, pourrait ainsi s'expliquer par une augmentation de productivité, le plus grand nombre de dinokystes produits compensant le potentiel effet de dilution dans une matrice détritique plus grossière.

Cette augmentation de productivité confirmerait nos observations faites dans la première partie de la discussion. Ceci est également appuyé par l'augmentation des concentrations totales également observées en baie de Daoulas (Figure 8).

b) Données paléogénétiques

Durant l'intervalle 1982-1990, une augmentation en pourcentage des dinokystes du groupe « mer d'Iroise » est observée dans la carotte I-09 et le groupe « estuarien » augmente dans le composite KS-03-06 tout en diminuant dans la carotte I-09.

On remarque également que la courbe des nitrates est corrélée avec nos observations et modifications d'assemblages que ce soit au niveau du Port ou de la baie de Daoulas, mettant en évidence le forçage direct très probablement représenté par les pratiques agricoles sur nos observations, et notamment à partir des années 1980's.

Également, c'est à partir des années 1985 que l'on commence à quantifier *A. minutum*, dans les sédiments de la baie de Daoulas (courbe rouge sur la Figure 9). *A. minutum* est également quantifié dans l'Elorn à partir des années 2010 (courbe bleue sur la Figure 9).

Ces observations peuvent directement être mises en parallèle avec la courbe des concentrations en nitrates, passant de 20 mg/L dans les années 1970 à 40 mg/L dans les années 1990. La quantification d'*A. minutum* commence peu après et les courbes d'Elorn et de la baie de Daoulas semblent bien corrélées. Les nitrates joueraient un rôle crucial dans l'explosion des blooms d'*A. minutum* en rade de Brest.

c) Données Titane et Calcium

La baie de Daoulas, à l'embouchure de la Rivière de Daoulas, est un environnement semi-confiné où les études paléoécologiques (palynologiques : Lambert et al., 2018, et moléculaires : Klouch et al., 2016) ont mis en évidence l'impact du remembrement sur les flux sédimentaires et les changements en termes de communautés protistes de manière plus générale (Siano et al., 2021). En effet, comme le montre le signal de Titane (Ti) pour la carotte I-09, une accélération des apports terrigènes est notée à partir de 1945 (Lambert et al., 2018), s'intensifiant ensuite dans les années 1960 puis dans les années 1980. Cela est dû à la destruction des haies bocagères et à l'agrandissement des parcelles agricoles ainsi qu'à la canalisation des cours d'eau. Cela a induit une baisse de la rétention et d'absorption de l'eau par les sols bretons et donc à une augmentation de l'altération, de l'érosion et du transfert des sédiments vers les eaux de la baie. Cette dynamique s'accroît d'années en années mais, de manière intéressante, cette augmentation du signal terrigène n'est pas détectée de manière identique sur les carottes KS et EE (Elorn) par l'évolution du signal Ti reconstruit dans le cadre du stage de Loeiz Saguet en concentrations absolues.

On sait que les valeurs Ti/Ca plus faibles sont bien corrélées aux valeurs plus faibles des débits fluviaux et des précipitations, ce qui donne de la force au signal Ti/Ca comme indicateur indirect des changements de ruissellement au fil du temps (Lambert et al. 2018). Les valeurs de Ti/Ca, présentées ici, montrent une augmentation conséquente à partir des années 1980. Cela indiquerait de plus importants débits fluviaux à partir de cette période. A partir de ce signal XRF Ti/Ca et palynologiques, combinées à des données instrumentales récentes, trois grandes périodes d'augmentation du ruissellement et donc des apports fluviaux ont pu être mises en évidence au niveau de Daoulas, d'abord après la Seconde Guerre mondiale, puis après 1965, et enfin après 1985 (Lambert et al. 2018). Cette troisième période est corrélée avec les données palynologiques acquises durant ce stage sur la séquence composite du Port ([Figure 9](#)), celle-ci indiquant également une transition au niveau des années 1982-1985 dans nos reconstructions sédimentologiques et paléoécologiques.

Cependant, le contexte de réchauffement et l'augmentation des précipitations décrites précédemment ne sont pas les seuls paramètres à prendre en compte. Superposés à ces tendances climatiques, d'autres mécanismes peuvent intervenir à partir de 1945. En effet, les débits plus élevés ont été accentués par l'augmentation des surfaces agricoles artificielles dans les bassins versants de la rade de Brest. Après la Seconde Guerre mondiale, la mise en œuvre d'une nouvelle politique agricole a conduit à la réunification des exploitations agricoles. La destruction des haies a ensuite modifié l'érosion des sols et a contribué de façon significative à l'augmentation du ruissellement dans les bassins versants de la rade de Brest en raison de l'absence de remblais. Cette limite est également

clairement perceptible sur la signature XRF Ti/Ca qui augmente évidemment vers 1945 (Lambert et al. 2018).

Enfin, il est important de noter que le port de Brest a connu une augmentation des échanges commerciaux de 60% entre 1991 et 2007 qui peut aussi être une des causes de l'augmentation des formes planctoniques toxiques, causé indirectement via un rejet accidentel de formes toxiques via des eaux de ballast. C'est généralement de cette manière que sont introduites les formes toxiques dans les écosystèmes côtiers à travers le monde.

V. Conclusion et perspectives

La rade de Brest est un socio-écosystème complexe, sous l'influence de dynamiques macrotidales et d'apports fluviaux drainant des bassins versants caractérisés par des pratiques agricoles qui ont sensiblement modifié les flux détritiques sur les deux derniers siècles, et notamment après la seconde guerre mondiale.

L'Homme, de par ses activités industrielles, portuaires, agricoles, touristiques etc... à un fort impact sur son environnement et les capacités de résilience des écosystèmes face à cet impact est une question sociétale majeure, nécessitant également de travailler de manière rétrospective sur les trajectoires de ces environnements, la dynamique des transformations et la réactivité de ces systèmes en termes sédimentologiques et écologiques afin de co-construire des scénarios plus durables d'aménagement du territoire qui soient en adéquation avec la durabilité de ces environnements.

Dans ce contexte, l'étude des paléo-environnements anthropocènes permet de comprendre les différents facteurs de forçage qui ont rythmé les trajectoires qui mènent aux observations présentes et à la projection des actions à mener dans un futur proche.

L'étude des dinokystes de la rade de Brest nous a permis à la fois de caractériser les environnements du Port de Brest depuis 1890 mais également de mettre en perspective ces résultats avec ceux du fond de la rade. Le forçage agricole lié au pratique intensive apparaît comme le moteur principal des seuils observés.

Il est à noter que le temps imparti à l'acquisition et à l'interprétation des données n'a pas permis encore de remettre en perspective les observations de la séquence composite du Port en regard de l'historique des aménagements lié aux travaux de poldérisation. Ceci constitue des perspectives de travail dans le cadre du projet PACTE et de la thèse de Clara Valero : augmentation de résolution temporelle des analyses et remise en perspective des données historiques (thèse de Lucas Baosseboeuf en cours co-encadrée par le LEMAR et le CRBC).

Références

Ballevre, M., Bosse, V., Dabard, M.-P., Fourcade, S., Paquette, J.-L., Peucat, J., Pitra, P. 2013. Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. Bull. Soc. géol. minéral. Bretagne, 2012-2013, (D), 10-11, 5-96

Belleguic, K., Conseil, C., Eveno, T., Lorge, S., Baraer, F. 2012. “Le Changement Climatique En Bretagne”. Météo France.

Bolch, C. 1997. The use of sodium polytungstate for the separation and concentration of living dinoflagellate cysts from marine sediment.

Bravo, I., & Figueroa, R.I. 2014 Towards an ecological understanding of dinoflagellate cyst functions. Microorganisms, 2(1), 11-32.

Delbecq, G., Schmidt, S., Ehrhold, A., Latimer, M. 2020. Revival of ancient marine dinoflagellates using molecular biostimulation. Journal of Phycology.

Fichaut, B. 1984. Réactualisation de la sédimentation de la rade de Brest Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale, Brest.

Fröhlich, L., Siebert, V., Huang, Q., Thébault, J., Jochum, K.P., Schöne, B.R., 2022. Deciphering the potential of Ba/Ca, Mo/Ca and Li/Ca profiles in the bivalve shell *Pecten maximus* as proxies for the reconstruction of phytoplankton dynamics. Ecological Indicators 141, 109121.

Gregoire, G. 2016. Dynamique sédimentaire et évolution holocène d'un système macrotidal semi-fermé : l'exemple de la rade de Brest. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale, Brest.

Gregoire, G., Ehrhold, A., Le Roy, P., Jouet, G., Garlan, T. 2016. Modern morpho-sedimentological patterns in a tide-dominated estuary system : the Bay of Brest. Journal of Maps, 12 :5, 1152-1159, DOI : 10.1080/17445647.2016.1139514

Gregoire, G., Le Roy, P., Ehrhold, A., Jouet, G., Garlan, T. 2017. Control factors of Holocene sedimentary infilling in a semi-closed tidal estuarine-like system: the bay of Brest (France). *Marine Geology*, 385, 84-100.

Klouch, K.Z., Schmidt, S., Andrieux-Loyer, F., Le Gac, M., Hervio-Heath, D., Qui-Minet, Z.N., Quéré, J., Bigeard, E., Guillou, L., Siano, R. 2016. Historical records from dated sediment cores reveal the multidecadal dynamic of the toxic dinoflagellate *Alexandrium minutum* in the Bay of Brest (France). *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, Vol 92, No.7. doi: [10.1093/femsec/fiw101](https://doi.org/10.1093/femsec/fiw101)

Lambert, C. 2017. Signature paléoenvironnementale des séquences holocènes en Rade de Brest : forçages climatiques et anthropiques. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Occidentale.

Lambert, C., Penaud, A., Vidal, M., Klouch, K., Gregoire, G., Ehrhold, A., Eynaud, F., Schmidt, S., Ragueneau, O., Siano, R. Human-induced river runoff overlapping natural climate variability over the last 150 years: Palynological evidence (Bay of Brest, NW France). 2018. *Global and Planetary Change*. 160, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.11.004>

Penaud, A., Hardy, W., Lambert C., Marret, F., Masure, E., Servais, T., Siano, R., Wary, M., et Neil Mertens, K. 2018. Dinoflagellate Fossils: Geological and Biological Applications. *Revue de Micropaléontologie*, 60ème Anniversaire, 61, n° 3 ,1 décembre 2018 : 235 54. <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2018.09.003>

Penaud, A., Ganne, A., Eynaud, F., Lambert, C., Coste, P.O., Herledan, M., Vidal, M., Goslin, J., Stephan, P., Charria, G., Pailler, Y., Durand, M., Zumaque, J. et Mojtahid, M. 2020. Oceanic versus continental influences over the last 7 kyrs from a midshelf record in the northern Bay of Biscay (NE Atlantic). *Quaternary science review*.

Rochon, A., De Vernal, A., Turon, J-L., Matthiessen, J., Head, M.J. 1999. Distribution of recent dinoflagellate in surface sediments from the North Atlantic ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. *AASP. Contribution Series number 35*.

Annexes

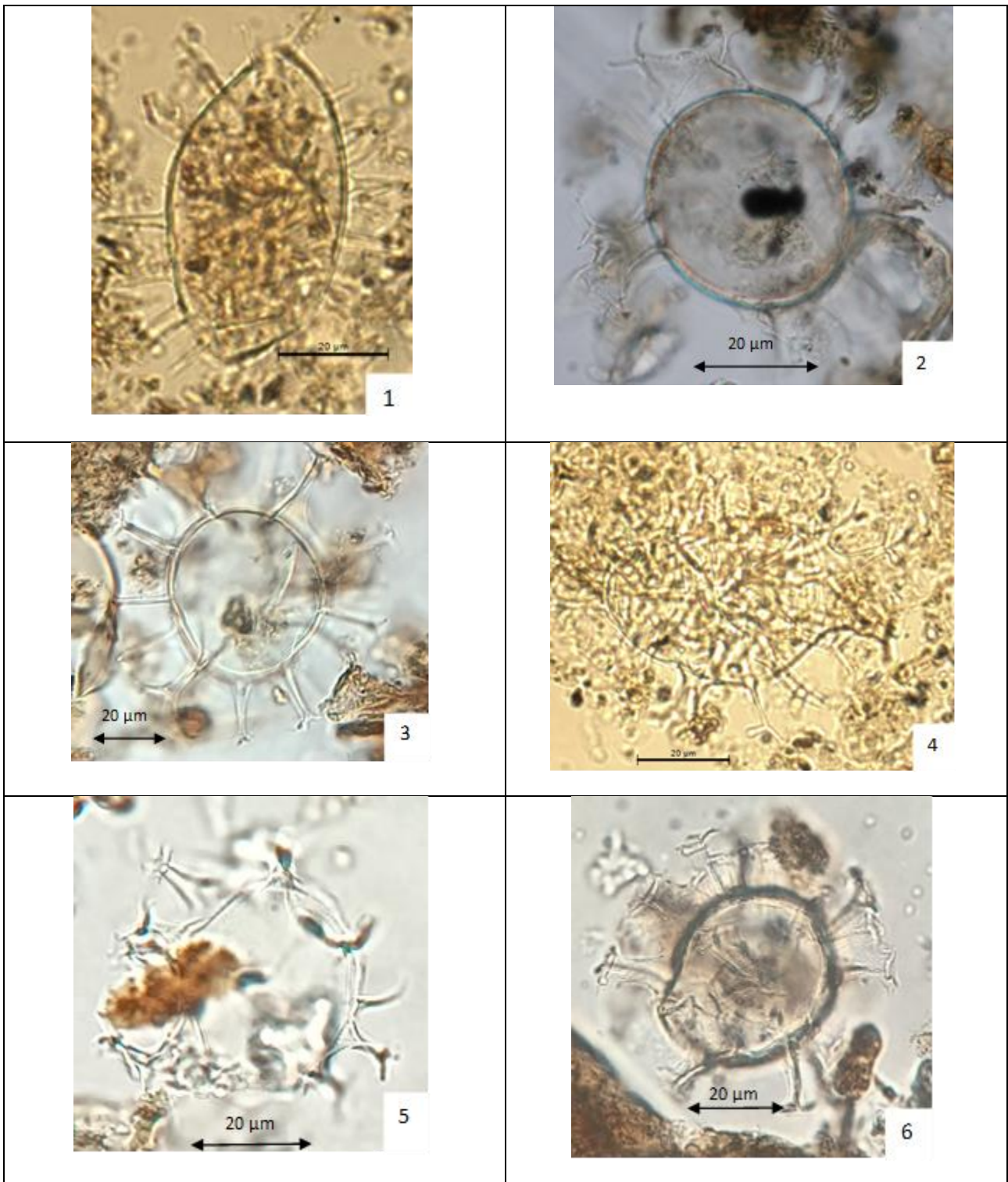
Annexe 1 : Protocole palynologique.

- Dans une éprouvette contenant 15 ml d'eau distillée posée sur une balance est ajouté 2 ml de sédiment, le volume est noté de même que la masse.
- Tamiser à 150 μm pour éliminer les plus gros éléments. On laisse décanter la fraction inférieure pendant 48h.
- Ajout de 2 pastilles de *Lycopodium* dans l'échantillon.
- Pour retirer les éléments carbonates, on effectue une attaque à l'acide chlorhydrique (HCL), on met environ 100 ml d'HCL à 37%. On centrifuge à 2500 rpm les échantillons puis on élimine le surnageant.
- Pour retirer les éléments siliceux, on effectue une première attaque à l'acide fluorhydrique (HF) à 48 % sous agitation mécanique pendant 4h, puis une seconde à 62% qu'on laisse agir pendant 48h.
- Deux traitements à l'HCL sont réalisés à nouveau pour retirer les fluorosilicates potentiellement formés. On centrifuge les échantillons puis on élimine le surnageant.
- On effectue deux rinçages à l'eau distillés pour éliminer toute trace d'acide. On centrifuge les échantillons puis on élimine le surnageant.
- Un tamisage à 10 μm est effectué pour éliminer un maximum d'éléments argileux.
- Montage en lame mobile avec une goutte d'échantillon.

Annexe 2 : Protocole de Bolch.

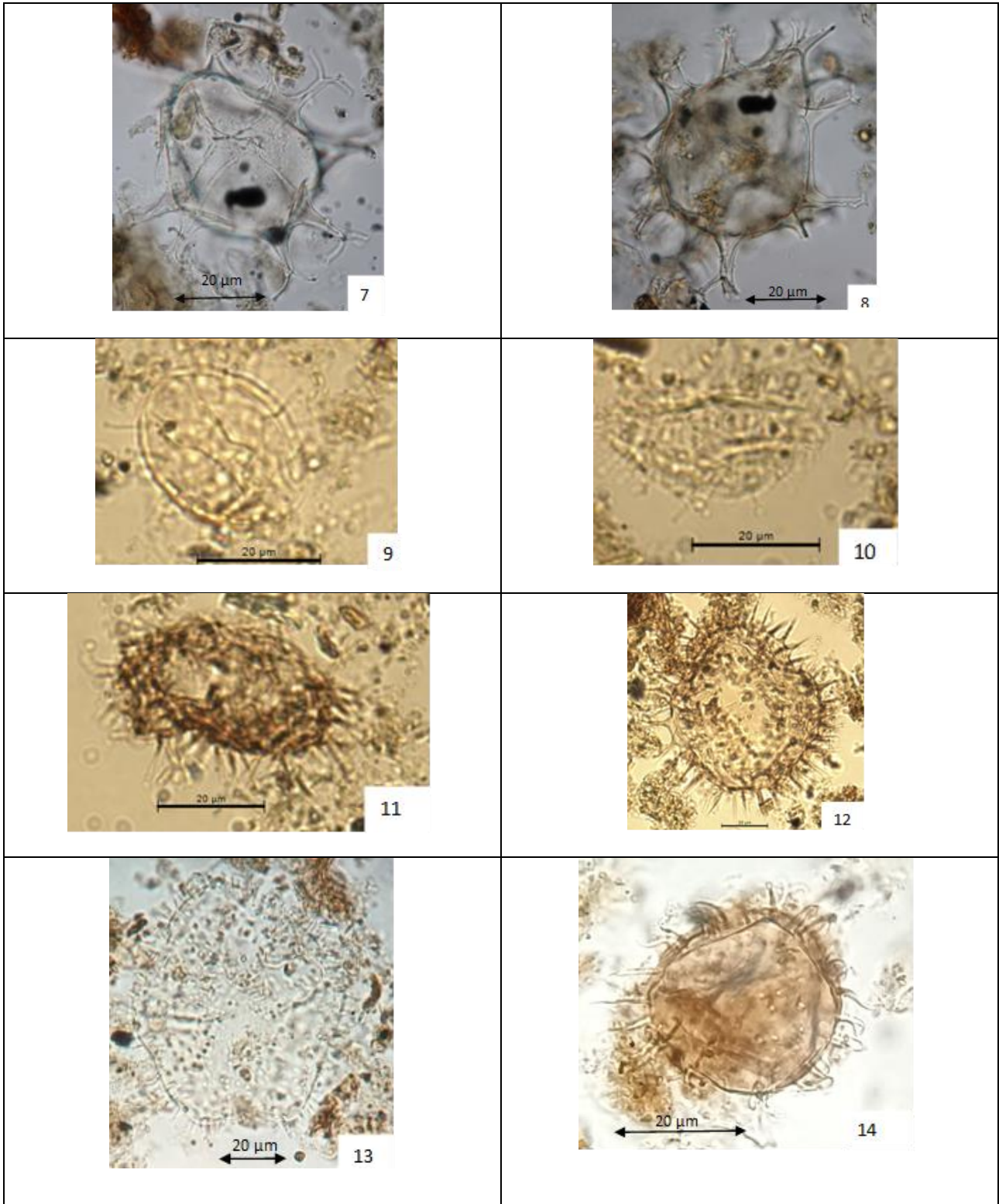
- Dans une éprouvette mettre 90 ml d'eau distillée.
- 51g de polytungstate de sodium (SPT) est ajoutée dans un bécher de 200 ml.
- Verser le contenu de l'éprouvette dans le bécher contenant le SPT et mélanger jusqu'à dissolution totale.
- Tarer une éprouvette. Verser la solution SPT dans cette éprouvette et noter la masse et le volume. Calculer la densité $\rho = m/V$, la densité de départ doit être retrouvé, ici 2,40 g/ml.
- Pour réduire la densité, ajouter de l'eau distillée, pour augmenter la densité, chauffer la solution pour réduire le volume ou ajouter plus de SPT solide et ce jusqu'à retrouver la densité de départ, si cela est nécessaire.
- Stocker dans un contenant en verre.
- Mettre le sédiment humide dans un bécher préalablement posé sur une balance.
- Faire un bain à ultrasons avec de l'eau de mer filtrée pendant 5 minutes, afin de séparer les particules agglomérées.
- Mettre 3mL de SPT dans un tube à centrifuger de 15 ml. Mettre 7ml de sédiments après avoir filtré avec des tamis 125 μm et 20 μm .
- Passer à la centrifugeuse à 3000 rpm pendant 10 minutes.
- Récupérer la phase haute à la pipette.
- Centrifuger à 2000 rpm pendant 2 minutes.
- Montage en lame mobile avec une goutte d'échantillon.

Annexe 3 : Tableau récapitulatif de comptage des dinokystes.



1. *Lingulodinium machaerophorum*
 3. *Spiniferites ramosus*
 5. *Spiniferites belerius*

2. *Spiniferites membranaceus*
 4. *Spiniferites mirabilis*
 6. *Spiniferites delicatus*



7. *Spiniferites lazus*

9. *Operculodinium centrocarpum*

11. *Protoperidinium nudum*

13. *Trinovantedinium applanatum*

8. *Spiniferites bentorii*

10. *Pentapharsodinium dalei*

12. *Selenopemphix quanta*

14. *Echinidinium* spp.

Annexe 5 : Modèle d'âge publié dans Delebecq et al., 2020 pour la carotte KS-03.

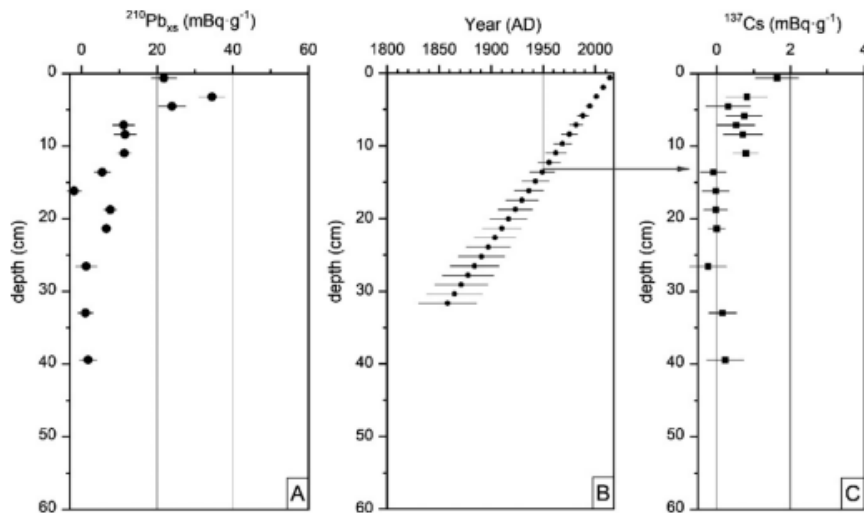


FIG. 1. $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (A) and ^{137}Cs (C) profiles in the core KS03. Core chronology (B) based on $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ dating and associated age model uncertainty at ± 1 SD. The arrow underlines the expected onset in the early 1950s of artificial ^{137}Cs

Annexe 6 : Boxplots des éléments des carottes EE, KS-03, KS-06 et C. (a) et (b) éléments majeurs et (c) et (d) éléments mineurs, avec (a) et (c) Boxplots complets (b) et (d) zoom sur les éléments moins représentés (Loeiz Saguet, stage de L3).

