

Projet Seine-Aval 6 **SARTRE**

« Seine Amont : Réseaux Trophiques Estuariens »

ANNEXE 3 : Etude de l'effet des clapages en Seine

Coordination : Michèle Tackx et Evelyne Buffan-Dubau

Co-Auteurs : F. Azémar, A. Bernard, E. Bou,
P. Claquin, S. Das, A. Huguet, J. Legendre, E. Parlanti, S. Souissi.

Juillet 2023



TABLE DES MATIERES

RESUME EXECUTIF	3
REMERCIEMENTS	8
SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET	8
INTRODUCTION	10
1.1. Rappel du contexte opérationnel et scientifique	10
1.2. Objectifs, présentation du rapport et des annexes	10
2. MATERIEL ET METHODES	11
2.1. Les suivis <i>in situ</i>	11
2.2. Les expériences en laboratoire	12
3. RESULTATS ET DISCUSSION	14
3.1. Suivis de clapages <i>in situ</i>	14
3.1.1. Informations logistiques	14
3.1.2. Les facteurs environnementaux	16
3.1.3. Les Matières Particulaire en Suspension (MES)	21
3.1.4. Les Matières Organiques Particulaires (MOP)	24
3.1.4.1. Proportion de matière organique dans la MES	24
3.1.4.2. Caractérisation des MOP par isotopes stables et indices géochimiques	26
3.1.5. Les Matières Organiques Dissoutes (MOD)	29
3.1.6. Le phytoplancton	37
3.2. Résultats des expériences en laboratoire	44
3.2.1. Expériences avec le phytoplancton	44
3.2.2. Expériences avec le zooplancton	51
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	57
5. LISTE DES ILLUSTRATIONS	59
6. GLOSSAIRE	63
7. BIBLIOGRAPHIE	64

RESUME EXECUTIF

⇒ Objectifs du projet

Dans le cadre des perspectives de HAROPA d'augmenter le volume des sédiments clapés au niveau du secteur de la Pâturage-aux-rats (entre les PK 282 et 283,5) de la Seine, ainsi qu'au niveau de la zone dite d'extension (entre les PK 283,5 et 285) en 2020 et 2021, plusieurs facteurs sédimentologiques et écologiques de ces clapages sont évalués (Port de Rouen and HAROPA, 2021).

Dans la colonne d'eau, l'effet des sédiments clapés est spécifiquement suivi sur les communautés dominantes, le phyto- et le zooplancton, ainsi que sur le fonctionnement biogéochimique de ce système pélagique.

⇒ Principaux résultats

L'évaluation de l'impact des clapages sur le fonctionnement écologique dans la colonne d'eau s'est faite en deux volets : des suivis des clapages in situ et des expériences en laboratoire.

- ***Suivis in situ***

L'évolution de plusieurs facteurs physico-chimiques, des concentrations en Matières En Suspension (MES), du phytoplancton, de la production primaire, d'indicateurs de composition des Matières Organiques Particulaires (MOP) et de l'activité détecté dans les Matières Organiques Dissoutes (MOD) a été suivie pendant les clapages à des intervalles de temps identifiés comme, par exemple, T-10, T0 et T+40 pour indiquer 10 minutes avant clapage, le moment du clapage et quarante minutes après le clapage..

Six opérations de clapage ont été suivies. Suite aux premiers suivis, le protocole a été adapté/modifié pour répondre aux fortes contraintes techniques liées à la problématique. En effet, la variabilité spatio-temporelle naturelle des concentrations en MES compliquent le suivi des effets directs des clapages in situ. Cette variabilité, qui peut être causée par les courants naturels ainsi que les courants générés par le passage des bateaux est difficile à prendre en compte. Les manœuvres de la drague avant, pendant et après les clapages peuvent aussi modifier les quantités et la composition des MES. Malgré, l'ajout d'un bateau témoin, en plus du bateau de suivi dès le 3ième suivi, la quantification des concentrations des matières en suspension induites par les clapages n'est pas nettement discernable des variations naturelles des MES dans l'eau. Par ailleurs, la sédimentation potentiellement très rapide et "en bloc" des sédiments clapés est conditionnée par leur densité/consolidation directement liée aux modes opératoires de l'opération de dragage/clapage. Cet aspect n'a pas été étudié spécifiquement dans le projet.

Les principales observations sont résumées ci-dessous.

Les six suivis n'ont pas montré de changement en température et conductivité liée clairement aux clapages. La concentration en oxygène diminue légèrement autour du T0 du clapage, et revient à des valeurs autour de celles observées avant clapage après une dizaine de minutes.

Parmi les suivis réalisés, certains (environ la moitié) montrent une augmentation des concentrations en MES près du fond pendant une dizaine de minutes. Certains suivis ne mettent aucune variation significative en évidence. Les suivis jusqu'à 60 à 90 minutes ne montrent pas de différences entre les concentrations avant et après clapage.

L'évolution du pourcentage des Matière Organique Particulaire dans les MES est différente entre les clapages, probablement en relation avec la composition des matières clapées.

Pendant les clapages 1 et 2, la concentration en Chla (estimation de la biomasse de phytoplancton) a tendance à augmenter pendant les 10 minutes après le clapage, indiquant des sédiments riches en phytoplancton. Des concentrations importantes en diatomées sont notamment observées en surface et fond pendant les suivis des clapage 1 et 2. Mais des concentrations très élevées de phytoplancton ($> 100 \mu\text{g Chla L}^{-1}$) ne sont pas observées pendant les clapages 3 à 6 et les variations autour du T0 de ces suivis sont moins claires à interpréter. La production primaire est également la plus élevée pendant les deux premiers clapages. Elle augmente généralement après clapage, jusqu'à T+60. L'index d'état physiologique descend généralement au moment du T0, pour remonter à des valeurs comparables à celles observées avant clapages, et la productivité (production primaire standardisée par biomasse) ne montre pas d'effet des clapages.

Les signatures isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$) de la matière organique et l'indice BIT, permettant d'estimer les apports de MES d'origine terrestre (issue des sols) en milieu aquatique, et les pourcentages de phytostérols (molécules permettant de tracer la contribution de matériel d'origine terrestre) et de brassicastérol (molécules permettant de tracer la contribution de matériel d'origine aquatique) confirment la présence d'une plus forte proportion de matière phytoplanctonique dans les sédiments clapés au cours des deux premiers clapages que pendant les suivants. Le changement des caractéristiques du matériel organique au début du clapage par rapport à l'avant-clapage indique une sédimentation plus rapide du matériel d'origine terrestre que phytoplanctonique. A plus de 10 minutes après le clapage, les caractéristiques des MOP déterminées au travers des analyses isotopiques et moléculaires sont plus difficiles à interpréter, en lien avec la variabilité naturelle du signal organique.

Les indices basés sur les propriétés optiques des MOD révèlent des différences d'origine et de composition des sédiments (plutôt d'origine terrestre, plutôt formée récemment in situ) entre les clapages. Par contre, ils ne permettent pas de détecter de changements des caractéristiques des MOD pendant les clapages.

- ***Expérimentations en laboratoire***

Les expériences en laboratoire avec du phytoplancton ont consisté à incuber de l'eau naturelle de la Seine, contenant donc la communauté phytoplanctonique naturelle, et soumis à une gamme de concentration de 200 à 1 200 mg L⁻¹ de sédiments en provenance du site de dragage. Il est important de noter que ces concentrations étaient préparées en termes de poids frais des sédiments, ce qui représente à peu près le double des poids MES, qui sont, dans les expériences comme dans la littérature, quantifiés en poids sec. Les résultats montrent également la présence de concentrations importantes de phytoplancton dans les sédiments clapés des deux premiers clapages. Il s'agit essentiellement de diatomées, en bonne condition physiologique, capables de production primaire. Ces résultats inattendus sont intéressants



dans le sens où ils suggèrent, pendant certaines périodes, l'existence de communautés phytoplanctoniques vivantes sur les fonds des sites dragués, pourtant dépourvus de lumière.

D'autre part, les concentrations très élevées de phytoplancton dans les sédiments ajoutés, surtout au cours de la première incubation, ont rendu impossible d'interpréter correctement l'effet des sédiments de clapage sur la concentration du phytoplancton naturel dans l'eau de la Seine, son état physiologique et la production primaire réalisée.

Les expériences avec du zooplancton ont été réalisées avec une culture du copépode *Eurytemora affinis*, espèce dominante dans la Seine entre l'embouchure le pont de Normandie et Val-des-Leux (Devreker et al., 2010; SARTRE, Tackx and Buffan-Dubau (coord) et al., 2023), donc également aux alentours du site de clapage.

Le protocole était essentiellement le même que pour les expériences avec du phytoplancton. Dans les deux expériences effectuées, la mortalité des copépodes dans des incubations avec sédiments était significativement plus élevée que celle dans les contrôles (eau naturelle de la Seine) à partir de plus de 24 heures d'incubation, dans les béciers à des concentrations en MES de 200 mg L⁻¹. Cette combinaison peut donc être considérée comme le seuil des concentrations/durée à ne pas dépasser pendant les clapages. Pendant les suivis de clapage in situ, les concentrations maximales observées étaient de 350 et de 1 000 mg L⁻¹ en surface et au fond respectivement ; après 10 à 20 minutes, ces valeurs sont descendues en dessous de 200 mg L⁻¹. Si on ajoute à cela que l'effet incubation, clairement présent dans les expériences, ne joue pas in situ, il semble qu'il n'y ait pas d'effet à court terme des clapages sur le zooplancton in situ.

Les mesures des pigments phytoplanctoniques contenu dans les intestins des copépodes, qui représentent l'ingestion de phytoplancton par ces crustacés, ont montré trop de variabilité entre les réplicas pour permettre des conclusions précises sur l'état de nutrition des copépodes.

Les indices géochimiques des MOD montrent, aussi bien dans les expériences avec le phyto qu'avec le zooplancton, des changements au cours des incubations, mais ces changements semblent plutôt liés à un effet incubation qu'à un effet concentration en MES.

En conclusion, pendant les suivis de clapage, des concentrations plus élevées en MES peuvent apparaître à travers plusieurs facteurs mesurés, surtout en profondeur. Ces effets restent de faible intensité, transitoires et disparaissent après une dizaine de minutes. Ces signaux sont difficilement interprétables à cause de l'interférence avec les marées et les activités de navigation. Les variations mesurées sont de courtes durées et souvent proches de la variabilité naturelle observée dans le milieu estuarien par les suivis haute-fréquence SYNAPSES.

Les expériences avec le phytoplancton ont montré la présence de concentrations élevées de phytoplancton productif dans les sédiments clapés, mais n'ont, justement à cause de la présence de ce phytoplancton en concentrations plus importantes que le phytoplancton naturel de la Seine, pas permis de détecter clairement un effet des MES sur les communautés phytoplanctoniques en Seine.

Les expériences avec du zooplancton ont montré que la mortalité des copépodes utilisés (*Eurytemora affinis*) augmente avec le temps d'incubation et la concentration en MES. Il n'est à l'instant pas possible de distinguer si cette mortalité est due aux

concentrations en MES telles quelles ou à une toxicité des sédiments clapés. Le seuil de tolérance de 200 mg L-1 pendant 24 heures, déduit de ces expériences, n'a pas été dépassé pendant les clapages suivis dans le cadre du projet.

En résumé, aux échelles spatio-temporelles des mesures réalisées il ne semble pas possible d'identifier et de quantifier les effets des immersions prises individuellement en raison de la complexité et des variabilités des processus naturels et anthropiques considérées. En effet, ces mesures ne mettent pas en évidence un signal explicitement et directement corrélable à l'immersion des sédiments.

Par ailleurs, il est à noter que les travaux réalisés ne permettent pas de se prononcer sur les effets à moyen et long terme d'immersions récurrentes sur l'environnement estuarien pélagique et benthique.

⇒ Principales perspectives

Malgré des variations des concentrations en MES observés, les travaux réalisés mettent en évidence la complexité de réaliser un suivi permettant de discerner les variations des concentrations en MES induites par les clapages dans un environnement aussi dynamique que celui de l'estuaire de la Seine. Le protocole mis en oeuvre pourrait être discuté et re-travaillé pour faire face à ces difficultés techniques et améliorer l'identification des effets directs des immersions sur la qualité de l'eau. Il serait par exemple possible de prendre en compte, les variabilités naturelles mesurées via une station de mesure HF installée à proximité du site d'immersion, mais également les caractéristiques des sédiments prélevés sur les sites de dragage et leurs caractéristiques après le transport dans la drague.

Au regard des résultats acquis, il semble prioritaire de développer une stratégie d'évaluation des effets de cette pratique récurrente à moyen- long terme sur le physiotope et par conséquent sur le fonctionnement écologique du secteur concerné. Les suivis spécifiques devraient être mis en regard des suivis pérennes sur l'estuaire (ex : SYNAPSES) pour tenter d'identifier le poids de cette pratique dans les évolutions du fonctionnement de l'estuaire.

L'estuaire de la Seine fonctionne en effet comme un système intégré, avec des échanges biogéochimiques continus entre l'amont et l'aval, entre le lit mineur et le lit majeur mais surtout entre le compartiment pélagique et benthique. L'évaluation des effets potentiels à court ou long terme des clapages en estuaire nécessitera donc une approche intégrée, multidisciplinaire, avec échange fréquent des résultats entre les différentes disciplines.

Une connaissance de la composition des sédiments clapés permettra aussi d'évaluer si des effets mesurés dans des expériences en laboratoire sont dus à l'augmentation de la concentration en MES ou à des substances associées.

Un tel suivi interdisciplinaire régulier des sédiments en provenance des sites de dragage pourrait inclure les analyses suivantes :

- granulométrie
- composition des matières particulaires organiques et inorganiques, caractérisation des molécules (ex : phytostérols ,brassicastérol)
- composition des matières dissoutes

- phytoplancton : signature spectrale in situ, diversité cytométrique (analyse biomasse en composition par HPLC), production primaire, état physiologique
- bactéries, micro-faune (boucle microbienne, ex : ciliés..)
- microphytobenthos, meiobenthos, macrobenthos
- contaminants (liste exigée par l'étude d'impact).
- potentiel écotoxique (bioessais).

Etant donné les importantes communautés phytoplanctoniques détectées lors des premiers suivis effectués, **il serait intéressant d'étudier si des enrichissements occasionnels en phytoplancton par les clapages ne sont pas à la base de réseaux trophiques sur les sites de clapage**. Des communautés benthiques assez abondantes et riches au niveau de la zone impactée par les clapages, mais incluant plusieurs espèces introduites ont effectivement été rapportées (Port de Rouen and HAROPA, 2021). Ces inventaires pourront être mis en relation avec les données obtenues sur les caractéristiques des sédiments clapés

Des expériences spécifiques en laboratoire pourront élucider certaines questions issues des suivis.

REMERCIEMENTS

Cette étude, financée par HAROPA par l'intermédiaire du GIP Seine-Aval, a été confrontée à plusieurs problèmes d'ordre organisationnel, logistique et sanitaire. Elle n'aurait pas pu se réaliser sans le soutien du personnel de HAROPA, et particulièrement Patrick Tournier, qui a su trouver des solutions à chaque défi, et Olivier Bideau, qui a su faire face aux aléas logistiques de dernière minute. Nous remercions aussi les capitaines du *Jean-Ango* et de la *Gambe d'Amfard* pour leur collaboration ainsi que les équipages du Monod de M2C, du Celtic Warrior de STO Logistique et du lamaneur d'HAROPA grâce auxquels les échantillons ont pu être collectés.

Merci également à C. Monier pour la relecture du texte.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

Equipe 1

Laboratoire : Laboratoire Ecologie fonctionnelle et Environnement (EcoLab, changé à LEFE depuis 2021), UMR 5245 (CNRS-UPS-INPT)

1. Coordinateur scientifique : Michèle Tackx (michele.tackx@univ-tlse3.fr) et Evelyne Buffan-Dubau (evelyne.buffan-dubau@univ-tlse3.fr)
2. techniciens/ingénieurs : Frédéric Azémar (IGR Univ. Toulouse 3) ; Elisa Bou (IGE CDD), Anaëlle Bernard (IGE CDD) ; Claudine Sossou (IGE CDD) ; Julien Ovaert (IGE CDD) ;
3. autres étudiants, stagiaires : Jeanne Legendre (M2) ; Céleste Mouth (M2) ; Léa LERAY (L3, M1, IGE CDD)

Pour certains aspects du projet SARTRE, LEFE et EPOC ont collaboré avec le Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) UMR 8187 CNRS-Lille 1-ULCO (<http://log.univ-littoral.fr>). Notamment les tests de tolérance d'*E. affinis* en laboratoire dans le cadre de la partie 'Clapage' (cf. Annexe II) ont été réalisés par l'équipe du Pr. Sami Souissi du LOG.

Equipe 2

Laboratoire : Biology of Aquatic Organisms and Ecosystems (BOREA), Université de CAEN - Basse Normandie, Institut de Biologie Fondamentale et Appliquée

1. Coordinateur scientifique : Claquin Pascal (pascal.claquin@unicaen.fr)
2. doctorants : Léon Serre-Fredj
3. techniciens : Oriane Jolly (IGE CREC) ; Léo Chasselin (IGE,CDD, T CREC)

Equipe 3

Laboratoire : UMR « Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols » (METIS), Sorbonne Université, Paris, France

1. Coordinateur scientifique : Arnaud Huguet (arnaud.huguet@sorbonne-universite.fr)
2. doctorants : Zhe-Xuan Zhang (en collaboration avec EPOC)

3. techniciens : Christelle Anquetil (IGE CNRS) ; Emmanuel Aubry (AI Sorbonne Université)

Equipe 4

Laboratoire : « Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux » (EPOC), UMR 5805 CNRS, Université de Bordeaux.

1. Coordinateur scientifique : Edith Parlanti (edith.parlanti@u-bordeaux.fr)
2. doctorants : Zhe-Xuan Zhang (en collaboration avec METIS)
3. techniciens /ingénieurs : Mahaut Sourzac (T Université de Bordeaux) ; Zoé Hayet (T Université de Bordeaux)

Equipe 5

Laboratoire : Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) UMR 8187 CNRS-Lille 1-ULCO (<http://log.univ-littoral.fr>)

1. Coordinateur scientifique : Sami Souissi (sami.souissi@univ-lille.fr)
2. chercheurs (ou équivalents) contractuels : Shagnika Das (IGE CDD)
3. techniciens/ingénieurs : Capucine Bialais (IGE CDD)



INTRODUCTION

1.1. Rappel du contexte opérationnel et scientifique

Dans le cadre des perspectives de HAROPA d'augmenter le volume des sédiments clapés dans le secteur de la Pâturage-aux-rats (entre les PK 282 et 283,5) de la Seine, ainsi qu'au niveau de la zone dite d'extension (entre les PK 283,5 et 285) en 2020 et 2021, plusieurs facteurs sédimentologiques et écologiques de ces clapages sont évalués (Port de Rouen and HAROPA, 2021).

D'après Boutin (1999), en l'absence de courant, les sédiments clapés tombent rapidement au fond en y générant des courants de densité autour de la zone d'impact. Le milieu pélagique est alors peu impacté. En revanche, la présence d'un courant d'eau pendant les opérations de clapage a deux conséquences principales : (1) il décale le nuage de sédiments largués par la drague par rapport à la verticale du point de clapage, et (2) il étire le nuage d'autant plus que ce courant est fort et que la densité des sédiments est faible. De plus, au cours de leur descente, une ségrégation des particules s'opère d'autant plus que le courant est fort, laissant les particules les plus fines dériver sous forme d'un nuage plus ou moins persistant alors que les particules les plus lourdes sédimentent rapidement (Boutin, 1999). Le fort hydrodynamisme de l'estuaire de la Seine est donc susceptible de produire des conditions favorables à une persistance relativement prolongée des matières en suspension, notamment les plus fines, dans la colonne d'eau pouvant avoir un impact sur les organismes qui s'y trouvent. L'effet des sédiments clapés y a été suivi spécifiquement sur les communautés dominantes, le phytoplancton et le zooplancton, ainsi que sur le fonctionnement biogéochimique de ce système pélagique. La présence de concentrations importantes de particules autres que le phytoplancton peut en effet influencer négativement ces communautés et le fonctionnement du système, par la limitation de la luminosité pour la production primaire, la consommation d'O₂, la gêne dans la sélection de nourriture de bonne qualité (le phytoplancton) par le zooplancton.

Le site de clapage des boues en provenance de la zone d'évitage du port de Rouen se trouvant au milieu des stations du projet 'Seine amont : Réseaux Trophiques Estuariens' (SARTRE, Tackx and Buffan-Dubau (coord) et al., 2023), le projet d'évaluation des impacts des clapages en estuaire a été associé à SARTRE, en collaboration avec HAROPA port.

Ce rapport traite les résultats des 6 suivis de clapages effectués entre septembre 2019 et septembre 2022 et des deux expériences en laboratoire concernant l'effet des boues de dragage sur le phytoplancton et le zooplancton.

1.2. Objectifs, présentation du rapport et des annexes

L'objectif de l'étude est d'évaluer les effets de l'augmentation en concentration des MES, MOD créée par le clapage de sédiments de dragage sur l'état écologique du domaine pélagique (la colonne d'eau). Une attention particulière est portée sur les communautés vivantes : le phytoplancton et le zooplancton. Dans ce but, les changements de la concentration et composition des MES, ainsi que des facteurs environnementaux et des indices de fonctionnement biologiques sont étudiés le plus proche possible de la situation *in situ*.

L'évaluation de l'impact des clapages sur le fonctionnement de la colonne d'eau se fait en deux volets : des suivis des clapages *in situ* et des expériences en laboratoire.

La section 'matériel et méthodes' du rapport explique la stratégie de l'étude et les aspects spécifiques à ces deux volets. Pour les protocoles détaillés des mesures faites, le lecteur est référé à l'ANNEXE I du Rapport SARTRE.

Les résultats des 6 suivis de clapage sont présentés. Les ajustements faits au protocole suite aux résultats obtenus notamment à l'issue de la première campagne (clapages 1 et 2) sont explicités.

Les résultats des expériences avec le phyto-et le zooplancton sont rapportés en totalité par la suite.

Tous les résultats sont réunis dans une banque de données (BD) disponible sur un *Google Drive*. Cette BD sera également fournie avec le rapport.

Comme pour le rapport SARTRE, les légendes des figures sont en Anglais. Un glossaire des termes spécifiques, indiquant les abréviations en français et en anglais, est fourni en fin du rapport.

MATERIEL ET METHODES

2.1. Les suivis *in situ*

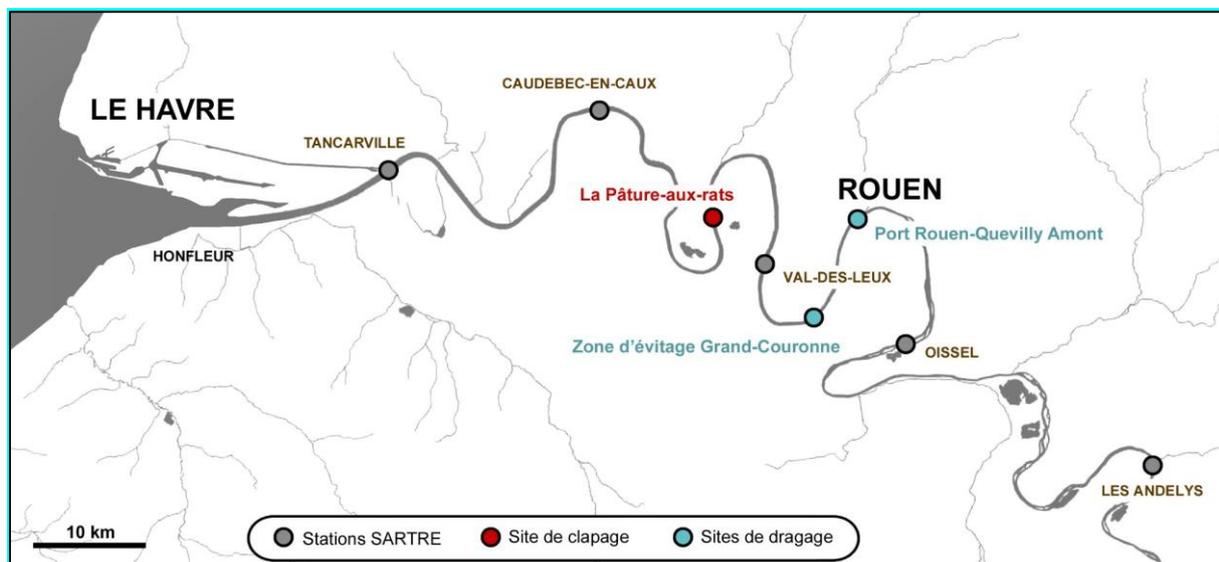
La Figure 2.1 montre la position des deux sites de dragage des sédiments et du site de clapage, parmi les stations suivies par le projet SARTRE.

Les suivis de clapages *in situ* consistent à échantillonner en point fixe avant chaque clapage à proximité du point d'immersion, puis en dérive dans le nuage de sédiments pendant et après les clapages. Les 8 temps d'échantillonnage, qui ont été affinés au cours des campagnes successives en fonction des résultats obtenus (ANNEXE III Tableau 3.1), sont compris entre T-60 minutes et T+90 minutes par rapport au moment du clapage (T0) (voir 3.1.1 pour les détails de chaque clapage). Le bateau de suivi (MONOD) est positionné derrière la drague, donc en aval de la drague si le clapage se fait pendant le jusant ou en amont si le clapage a lieu pendant le flot (Fig. 2.2).

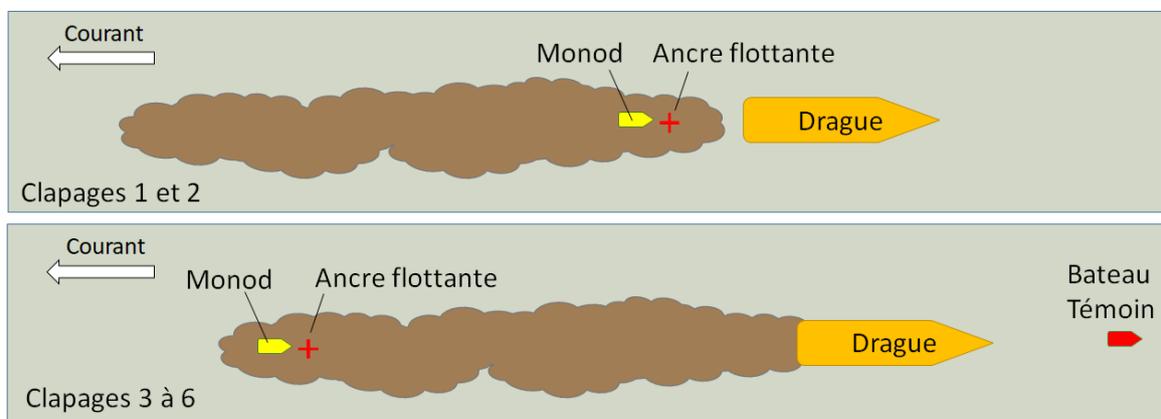
Les caractéristiques mesurées dans la zone pélagique sont la température, la conductivité, l'oxygène, la concentration et la composition des MES, des MOP et des MOD. Au niveau du phytoplancton, des mesures de Chla et pigments marqueurs de certains groupes d'algues ainsi qu'un suivi en continu d'indices de la biomasse, de l'état physiologique et de la production primaire sont effectués. D'autres facteurs caractérisent l'état du milieu, comme la concentration en O₂ ou en nutriments. La biomasse et la production primaire du phytoplancton sont également mesurées pendant les clapages.

On s'attend à voir des changements de ces caractéristiques de la zone pélagique, au moment du clapage et durant un certain temps après (ANNEXE III Figure 2.2 :3). En plus des échantillonnages à certains moments en surface et près du fond, un nombre de

caractéristiques sont suivis en subsurface à l'aide d'un 'Fast Repetition Rate Fluorometer + Algae Online Analyser'.



ANNEXE III Figure 2.1: Carte de l'estuaire de la Seine avec localisation des stations des campagnes communes du projet SARTRE ainsi que des sites de clapage et de dragage concernés durant cette étude.

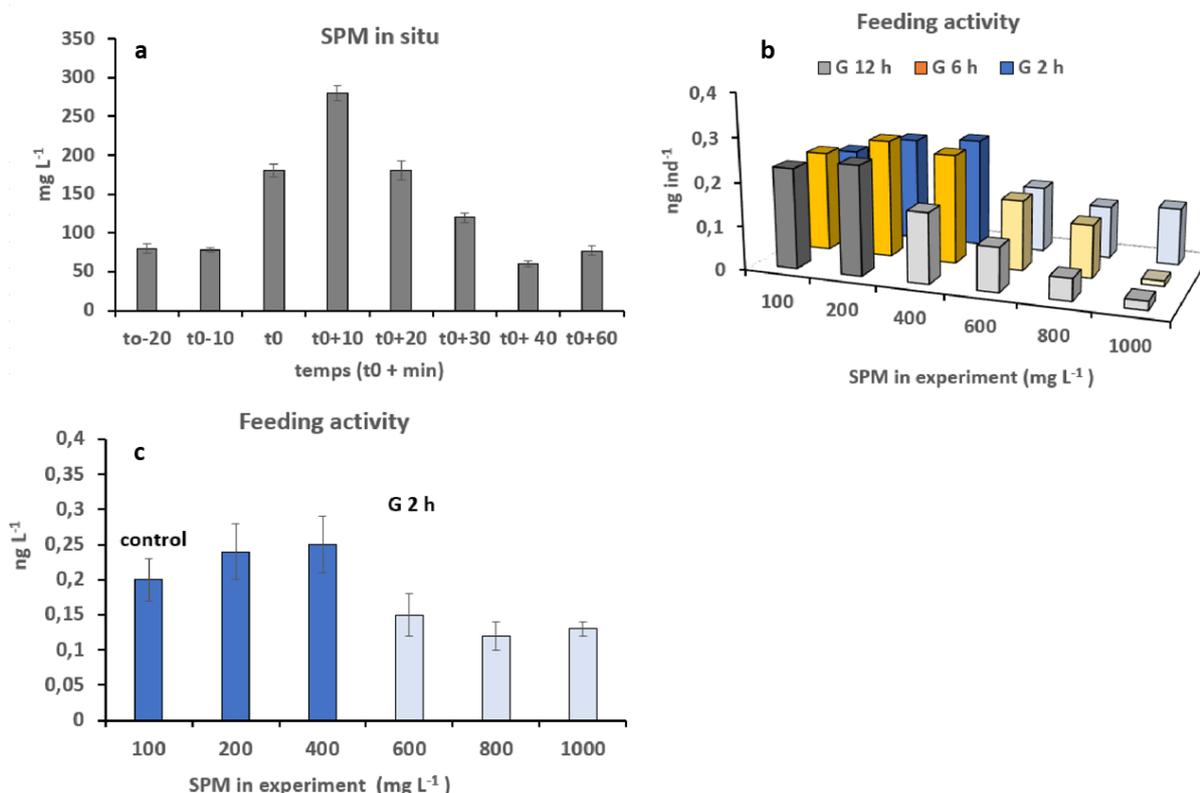


ANNEXE III Figure 2.2 : Schéma du suivi *in situ* des clapages. Zone brune : nuage de MES issu du clapage. Monod : bateau de suivi (M2C). L'ancre flottante permet de suivre la masse d'eau utilisée pour la mesure ; elle est mise en place en fin de clapage lors des campagnes 1 et 2, puis en début de clapage lors des suivantes. Lors des clapages 3 à 6, un bateau témoin est positionné en point fixe à l'avant de la drague.

2.2. Les expériences en laboratoire

Des expériences en laboratoire servent à mieux interpréter les résultats des observations *in situ*. Afin de permettre l'extrapolation des résultats obtenus pendant les suivis

de clapage, des courbes de calibration sont réalisées en laboratoire pour le phytoplancton et le zooplancton. En incubant les organismes dans une gamme de concentration en MES, on cherche à connaître la concentration maximale et la durée maximale d'exposition qui n'ont pas d'effet sur l'abondance et l'activité des organismes. A partir de l'eau naturelle de la Seine prise sur le site de clapage, qui sert de contrôle, nous créons une série croissante de concentrations en MES en ajoutant de la boue en provenance du site de dragage (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.3**). En mesurant les mêmes caractéristiques que pendant le suivi de clapage, à différents temps d'incubation, nous pouvons interpréter si une concentration de tel ou tel facteur observée *in situ* pendant un certain temps a un effet sur, par exemple, la biomasse ou l'état physiologique du phytoplancton ou d'organismes zooplanctoniques.



ANNEXE III Figure 2.3 : Principe des suivis de concentration en MES lors de clapage (a) et des incubations de zooplancton en laboratoire (b et c). Exemple théorique des effets d'une gamme de concentration en MES sur l'activité de nutrition du zooplancton.

Dans l'exemple théorique présenté en (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.3.a, b, c**) des concentrations en MES > 100 mg L⁻¹ sont observées à partir du T0 du clapage, jusqu'à 30 minutes après le T0, avec une concentration maximale en MES de 280 mg L⁻¹.

Le zooplancton, exposé à une gamme de concentration entre 100 et 1000 mg L⁻¹, avec des échantillonnages à 2, 4 et 6 h, ne montre une diminution d'activité de nutrition qu'à une concentration de MES de 600 mg L⁻¹ après 2 h. En utilisant plusieurs temps d'incubation, nous observons qu'après 12 h, une diminution de l'activité de nutrition a déjà lieu à une concentration de 400 mg L⁻¹ de MES. Ceci indiquerait donc, qu'avec les quantités clapées

durant le suivi *in situ*, il n'y a pas d'effet mesurable sur le zooplancton, et que les quantités clapées peuvent être augmentées à condition de ne pas dépasser des concentrations en MES de 600 mg L⁻¹ pendant plus de 4 h.

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Suivis de clapages *in situ*

3.1.1. Informations logistiques

Suite à la première campagne de clapages, le protocole d'échantillonnage a été adaptée afin d'améliorer les campagnes suivantes. Ainsi, lors des deux premiers clapages, des échantillons ont été prélevés à T-60 et T-30 minutes pour caractériser le milieu naturel avant clapage. Comme plusieurs facteurs montraient des valeurs très différentes entre T-60 et T-30, l'échantillonnage avant clapage a été intensifié entre T0 et T-30 en abandonnant donc T-60 ; T+90 min a aussi été supprimé lors des clapages 3-6 (ANNEXE III Tableau 3.1) en raison de la difficulté à suivre le panache au-delà d'une heure de façon représentative. Toutefois, des expériences de sédimentation montrent que les MES de petite taille peuvent se maintenir longtemps dans l'eau avant de sédimenter. Or, les sédiments dragués dans la Seine sont composés en grande majorité, d'argiles et de limons (90%), de taille inférieure à 65 µm, et de sables (10%) (Port de Rouen, HAROPA, 2021). Abdelhaq (2003) a montré qu'en milieu non turbulent, des particules de quartz sédimentent d'autant plus lentement qu'elles sont de petite taille. Par exemple, les sphères de quartz de 64 µm, 22 µm et 4 µm, sédimentent respectivement à la vitesse de 16 cm min⁻¹, 2 cm min⁻¹ et 0.07 cm min⁻¹. Dans un milieu aussi brassé que l'estuaire, on peut s'attendre à ce que la vitesse de sédimentation soit fortement augmentée, nous conduisant à suivre le panache pendant au moins une heure.

Lors des clapages 1 et 2, le bateau de suivi (Monod) était positionné derrière la drague, en attente du signal de vidage complet de la drague pour déclencher le T0 ; ainsi, le T0 servant de référence temporelle pour les différentes mesures se situait en fin de clapage, longtemps après son début. Cet écart ayant été jugé trop long (plus de 20 minutes) lors de cette première campagne, l'échantillonnage T0 a par la suite été fait en début de clapage, dès lors que le bateau de suivi se trouvait dans le nuage de sédiments visible en surface, lors des clapages 3 à 6. Lors de l'ouverture du clapet du puit de la drague, les sédiments les plus denses chutent rapidement au fond ; les matériaux les moins denses sont ensuite évacués par des opérations de lavage du puit. En conséquence, le suivi du nuage des clapages 1 et 2 a été fait sur ces rejets peu denses alors que les clapages 3 à 6 ont pu prendre en compte les particules plus denses.

Les clapages réalisés lors des jusants ont concerné des sédiments dragués la veille, et ayant sédimenter dans le puit, alors que ceux durant les flots ont été dragués juste avant. Ce facteur, avec le pourcentage d'eau qui a aussi varié, influencent certainement la dynamique de chute des matériaux lors des clapages.

Lors de toutes les campagnes, le Monod a suivi la dérive du nuage de sédiment au moyen d'une ancre flottante mise en place à T0.

Afin de mieux prendre en compte la masse d'eau impactée par les clapages, la profondeur de l'échantillonnage dit de surface a été modifiée à l'issue de la première campagne, le vidage de la drague étant fait sous la coque. Ainsi les prélèvements de surface ont été réalisés à 50 cm de profondeur lors des clapages 1 et 2, puis à 2.5 m lors des clapages suivants. De plus, un bateau témoin est positionné en point fixe en avant de la drague pour échantillonner l'eau naturelle, non impactée par le clapage. Compte tenu de l'hétérogénéité de la distribution horizontale des MES dans la masse d'eau, l'alignement des deux bateaux de suivi avec la drague a été recherché afin que les trois navires soient dans le même courant d'eau. Malgré cela des différences notables peuvent apparaître dans les mesures faites sur les deux navires de suivi avant le T0.

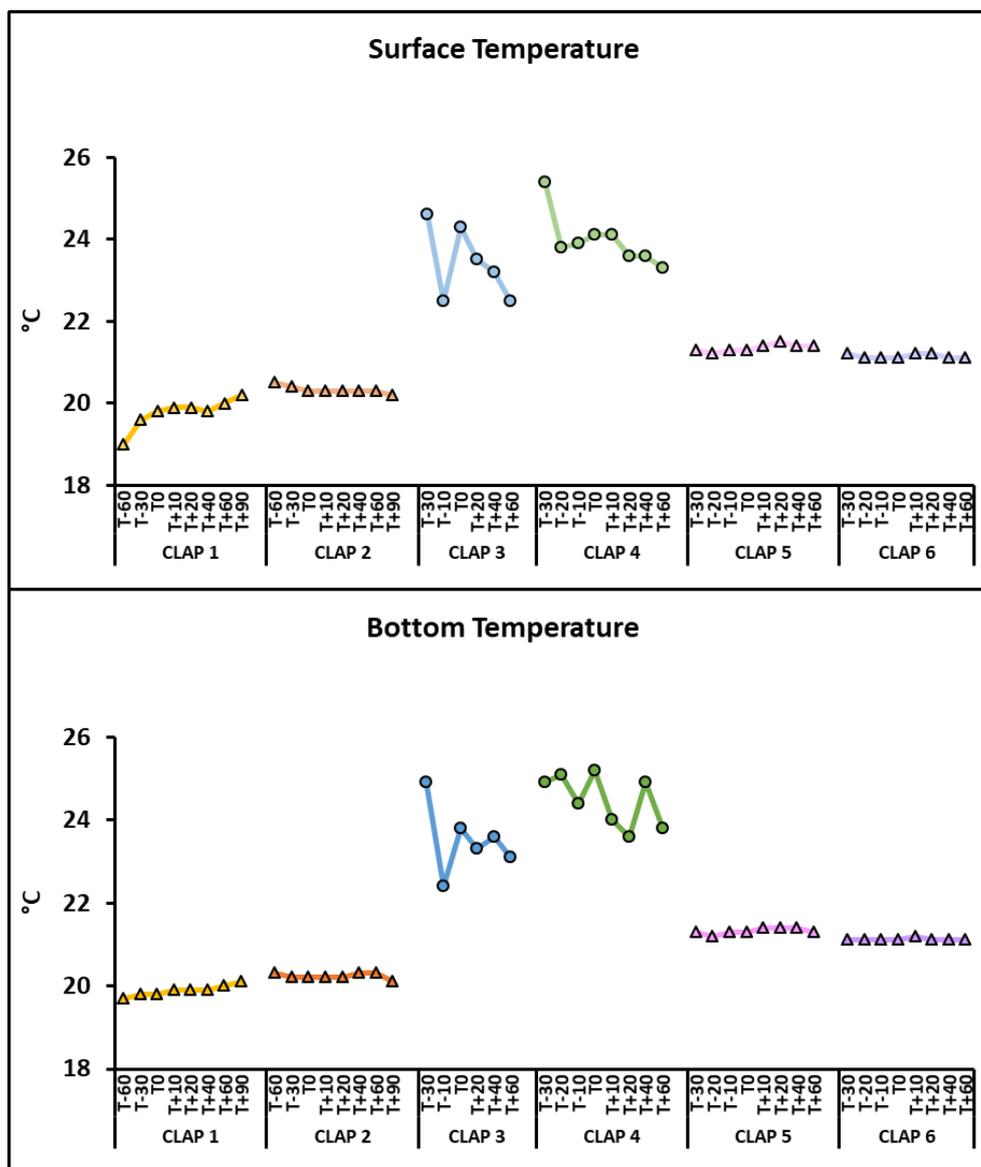
Les déplacements et les manœuvres de la drague sur le site de clapage sont susceptibles de remettre en suspension les sédiments de la Seine perturbant notre échantillonnage. Lors du jusant, la drague chargée venant de Rouen s'est positionné sur le site de clapage en virant pour se placer face au courant. Elle y reste en point fixe pendant 60 ou 30 minutes, jusqu'au clapage. Dans ce cas, les échantillonnages peuvent être perturbés par les sédiments soulevés lors du trajet et lors du virage. Lors du flot, la drague arrivant sur site face au courant de marée peut se positionner directement sur site, sans virage avant le clapage. Par contre, une fois le clapage terminé, la drague fait demi-tour et rentre à Rouen, ce qui peut aussi impacter nos échantillons. Toutefois, le site de clapage étant décalé par rapport au chenal de navigation, les perturbations liées aux déplacements aller et retour sont probablement minimales. Les manœuvres de la drague peuvent être la cause d'une partie de l'hétérogénéité de nos résultats.

Le ANNEXE III Tableau 3.1 résume les dates, heures, phases de marée et conditions spécifiques de chaque suivi de clapage.

ANNEXE III Tableau 3.1 Résumé des informations logistiques et techniques des suivis des six clapages suivis sur le site de la Pâture-aux-Rats.

N° de suivi. Date (Unité)	Site de dragage	Drague	Volumes immergés (m ³)	Densité (T m ³)	Remarques	Basse mer à Duclair (Heure de Paris)	Haute mer à Duclair (Heure de Paris)	Phase de marée	Echantillonnages										
									T-60	T-30	T-20	T-10	T0	T+10	T+20	T+40	T+60	T+90	
									Minutes avant ou après T0										
1. 09/09/2020	Zone d'évitage Grand-Courone	Jean Ango	1790	1.11	TO = fin de Point surface à la prof. 50 cm	13:51	18:42	Jusant	09:10	09:40	x	x	10:26	10:38	10:49	11:08	11:28	11:58	
2. 09/09/2020	Zone d'évitage Grand-Courone	Jean Ango	1798	1.12	TO = fin de Point surface à la prof. 50 cm	02:12	07:03	Flot	14:55	15:26	x	x	16:13	16:23	16:33	16:53	17:15	17:45	
3. 15/06/2021	Zone d'évitage Grand-Courone	Jean Ango	1783	1.14	Bateau témoin; TO = début de clapage; Point surface à la prof. 2.5 m	13:48	18:34	Jusant	x	11:10	x	11:30	11:40	x	12:00	12:20	12:40	x	
4. 15/06/2021	Zone d'évitage Grand-Courone	Jean Ango	1778	1.13	Bateau témoin; TO = début de clapage; Point surface à la prof. 2.5 m	02:06	06:52	Flot	x	15:30	15:40	15:50	16:00	16:10	16:20	16:40	17:00	x	
5. 14/09/2022	Port Rouen- Quevilly Amont	Gambe d'Amfard	655	1.37	Bateau témoin; TO = début de clapage; Point surface à la prof. 2.5 m	01:30	06:16	Jusant	x	09:25	09:35	09:45	09:55	10:06	10:16	10:36	10:56	x	
6. 15/09/2022	Port Rouen- Quevilly Amont	Jean Ango	1743	1.18	Bateau témoin; TO = début de clapage; Point surface à la prof. 2.5 m	02:11	06:57	Flot	x	15:14	15:24	15:34	15:44	15:54	16:04	16:24	16:44	x	

3.1.2. Les facteurs environnementaux

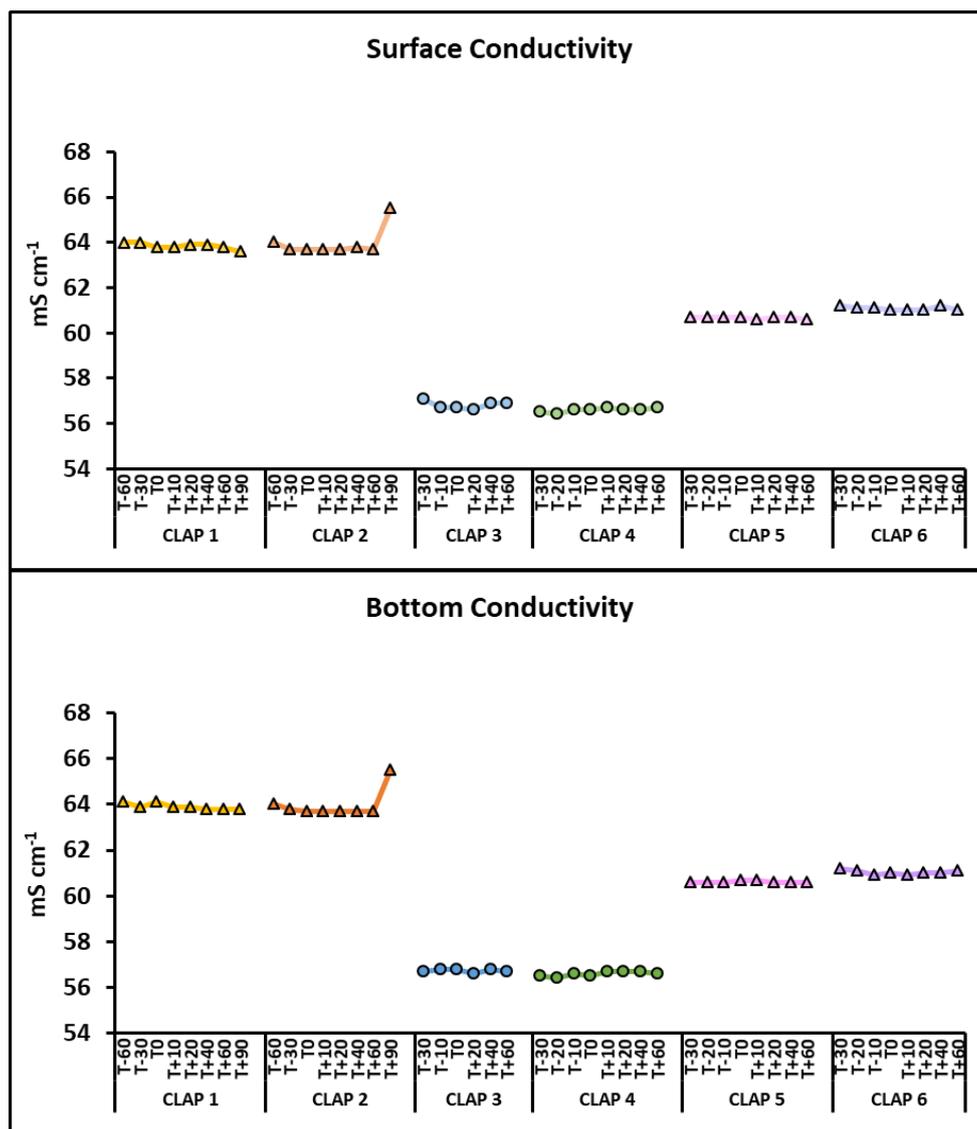


ANNEXE III Figure 3.1 : Températures en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.

Considérée sur la totalité des séries par clapage, la température est légèrement, mais significativement, plus élevée en surface qu'au fond pendant le deuxième clapage **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**1). Pendant le premier et le cinquième clapage, en surface, on observe une augmentation significative de la température au cours de tout le suivi entre T-30 et T+90, et une diminution pendant le deuxième clapage. Au fond, une augmentation n'est observée que pendant le premier clapage. Ces changements sont difficiles à expliquer par les marées, comme les campagnes SARTRE n'ont pas montré de différences significatives entre la température à l'amont et l'aval de la zone entre Tancarville et Oissel (SARTRE, Tackx and

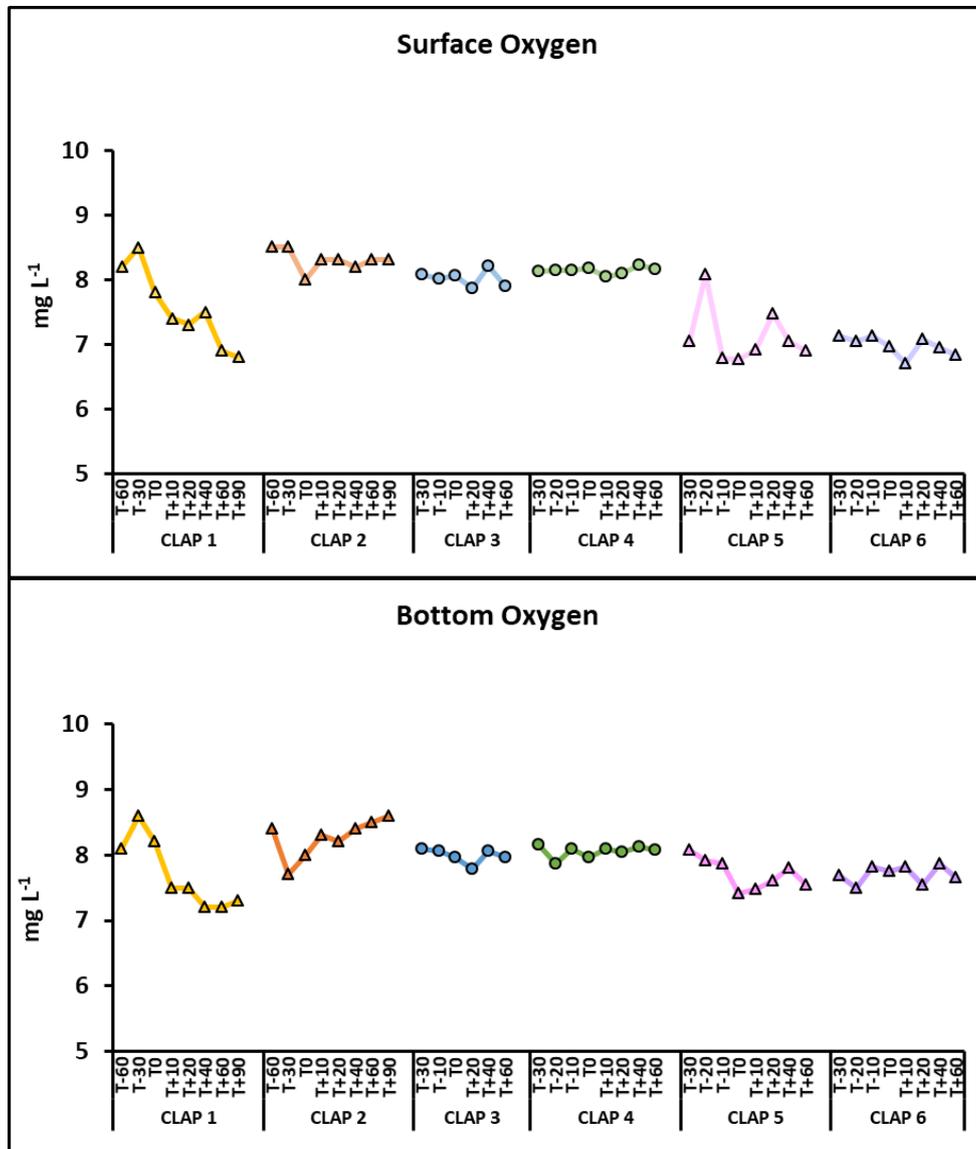
Buffan-Dubau (coord) et al., 2023). Il n'est pas clair dans quelle mesure le clapage pourrait influencer la température.

La conductivité montre une baisse à partir de T-30 en surface et au fond, pendant le clapage 1 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**2). On n'observe pas d'autres tendances significatives.



ANNEXE III Figure 3.2 : Conductivité en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.

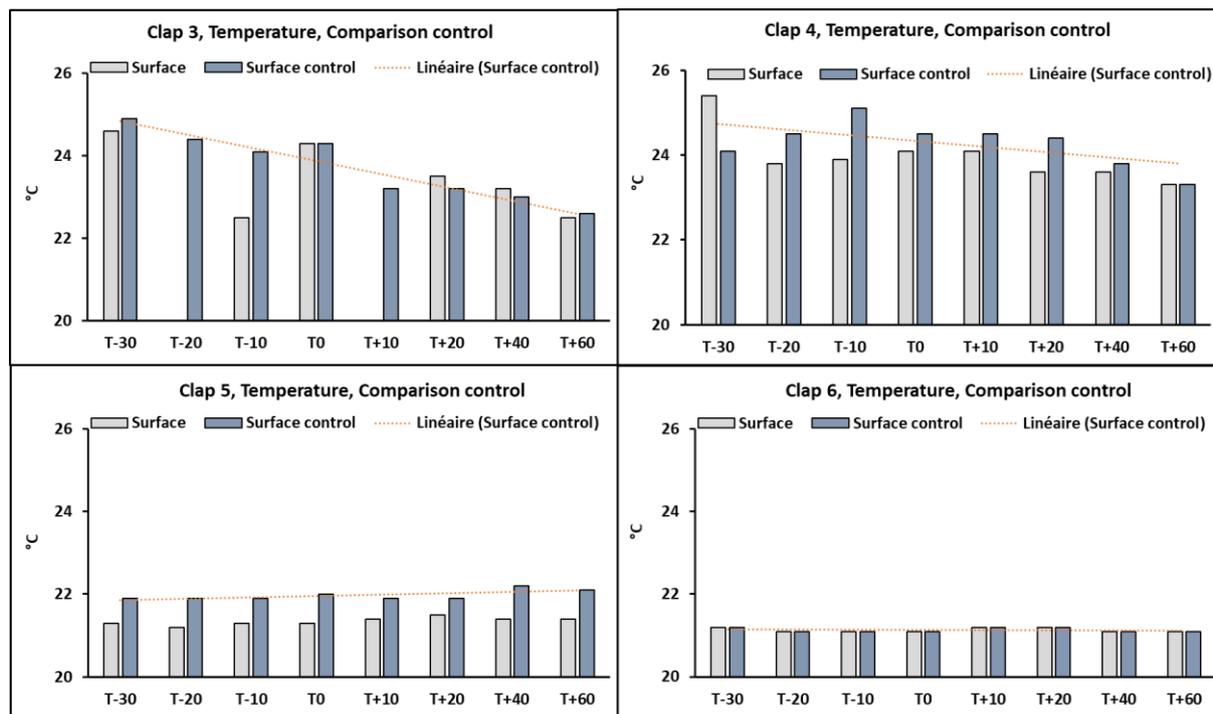
La concentration en oxygène diminue entre T-30 et T+60 aussi bien en surface qu'au fond pendant le premier clapage **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**3). Pendant les autres clapages, on observe une brève diminution autour de T0, suivie d'une remontée de la concentration, en O₂ qui atteint environ les mêmes niveaux qu'à T-30 ou T-10.



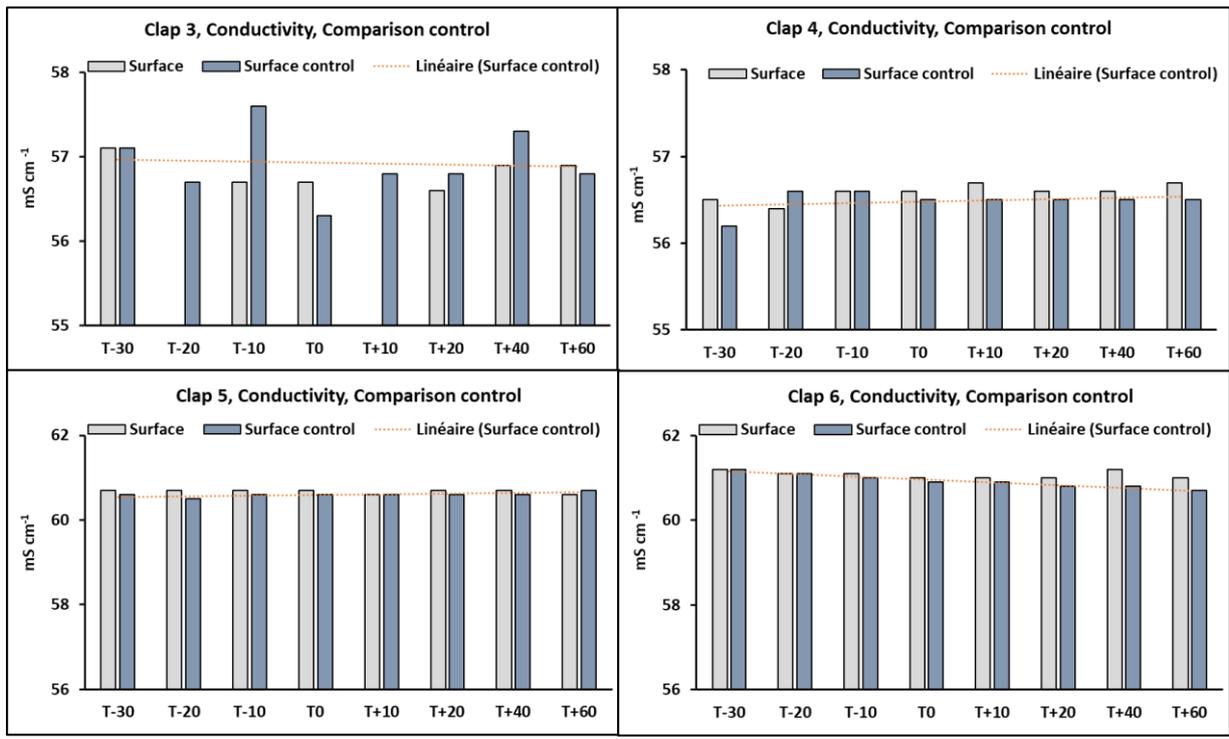
ANNEXE III Figure 3.3 : Concentration en oxygène en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.

La comparaison des températures (Fig. 3.4), conductivités (Fig. 3.5) et concentrations en oxygène (Fig. 3.6) mesurées sur le bateau de suivi et le bateau contrôle lors de clapages 3 à 6 montre des différences aléatoires avant même le T0 des clapages, en particulier lors des clapages 3 et 4.

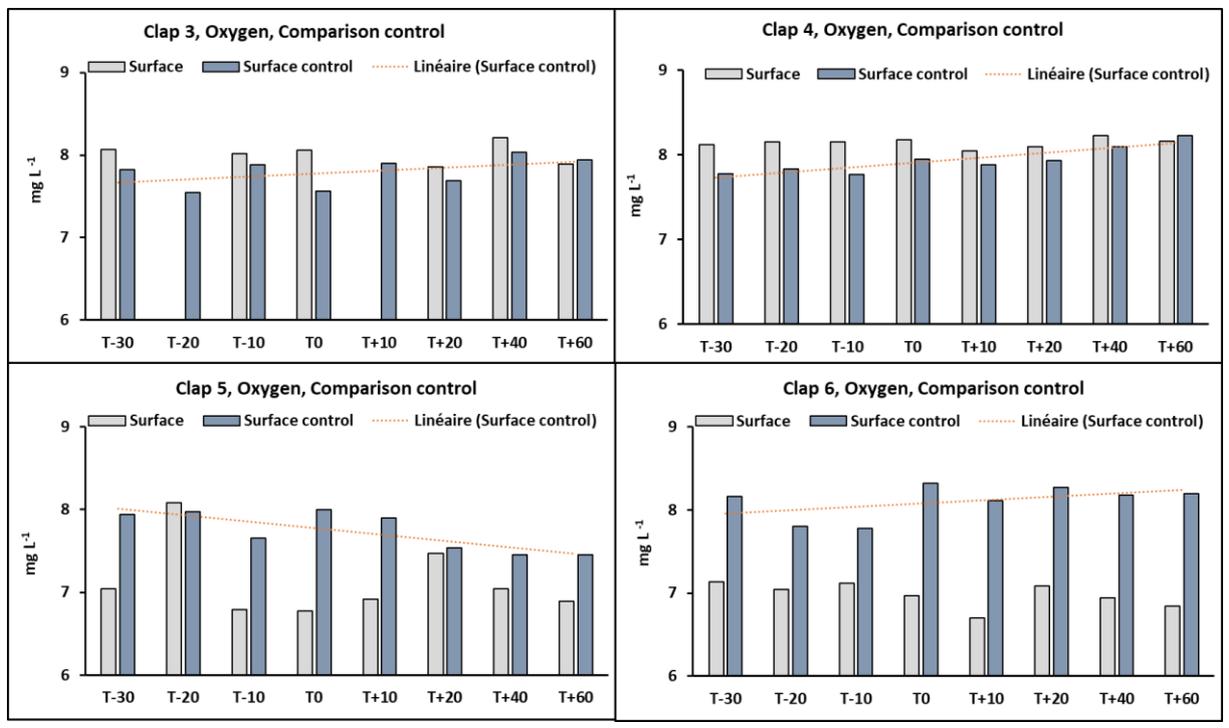
Les causes de ces écarts peuvent être multifactorielles : positionnement des bateaux dans des veines d'eau différentes, décalage de calibration des sondes (par exemple, Fig. 3.4 Clap 5), incertitudes de mesures, etc...



ANNEXE III Figure 3.4 : Comparaison entre la température du bateau de suivi et celle du bateau témoin.



ANNEXE III Figure 3.5 : Comparaison entre la conductivité du bateau de suivi et celle du bateau témoin.



ANNEXE III Figure 3.6 : Comparaison entre la concentration en oxygène du bateau de suivi et celle du bateau témoin.

3.1.3. Les Matières Particulaire en Suspension (MES)

Les MES ont été quantifiées par leur poids sec (mg) par litre d'eau. En surface, les concentrations en MES sont significativement plus élevées à partir de T0 par rapport à T-30 ou T-10 jusqu'à la fin du suivi pour les clapages 1, 2, 5 et 6 ANNEXE III Figure 3.7). Pour le clapage 3, il n'y a une concentration plus élevée qu'à T+40, pour le clapage 4, il n'y a pas de différence observée en concentration en MES avant et après clapage. Tandis que la concentration augmente de façon continue pendant le suivi du clapage 1, on observe des variations irrégulières pendant les clapages 2, 5 et 6. Ceci rend difficile la détermination précise du temps pendant lequel le nuage des matières clapées reste en suspension.

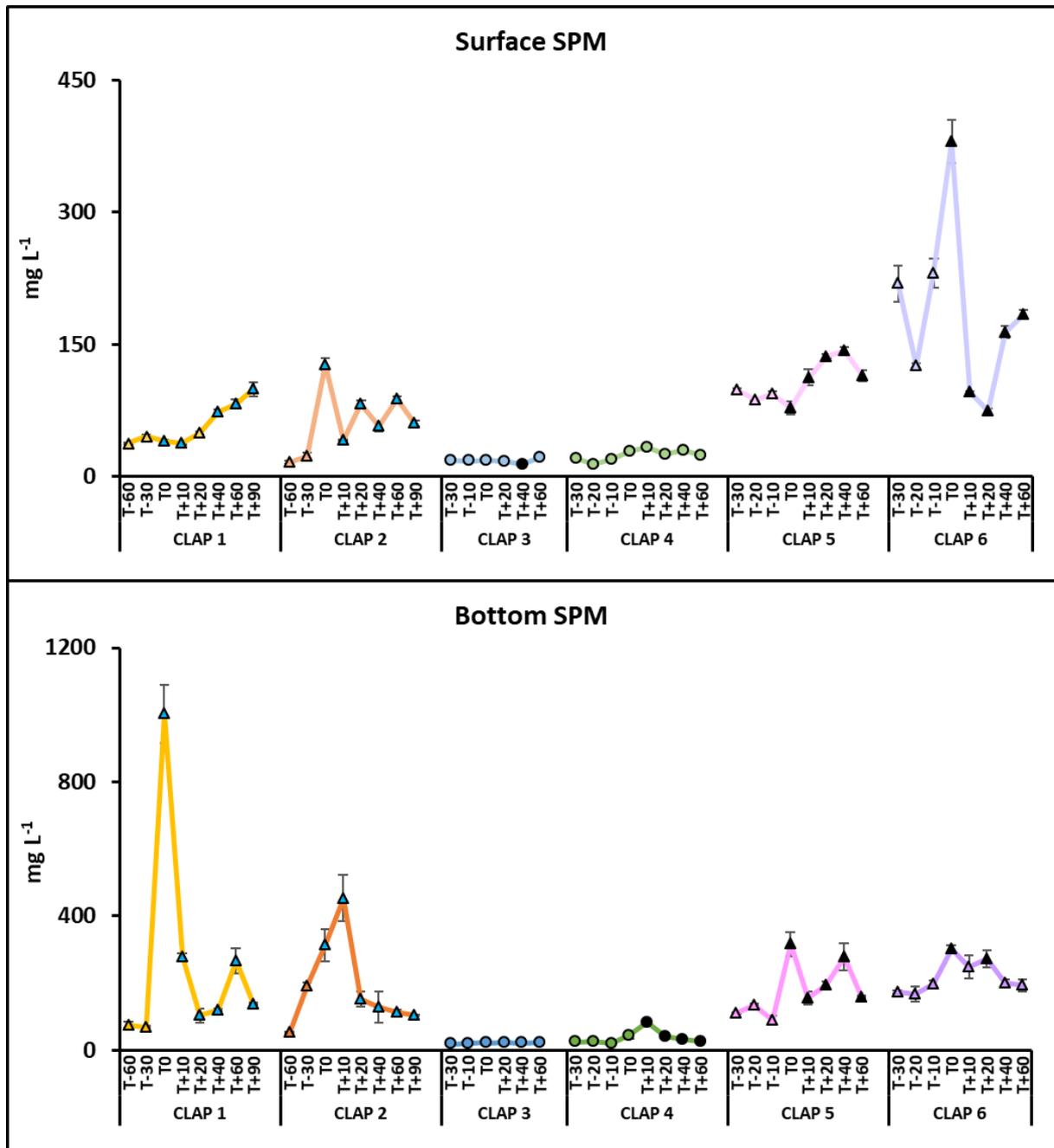
Afin de pouvoir prendre en compte des changements de concentration des éléments suivis dus à la marée un bateau "témoin" a été ajouté à partir du suivi du clapage 3. Ce bateau suivi est positionné en point fixe en amont de la drague pendant les suivis durant le jusant, et en aval de la drague pendant les suivis en phase de flot ANNEXE III Figure 2.2 :2). Alors que la distance entre le bateau témoin et le bateau suivi ne faisait pas plus de 100 m, nous nous attendions à échantillonner la même masse d'eau naturelle avant le clapage sur les deux bateaux. Durant les clapages 3 et 4, uniquement les facteurs environnementaux, les MES et les MOP ont été mesurés à bord du bateau témoin. Pour le clapage 5 et 6, plus de facteurs ont pu être quantifiés. Dans tous les cas, les mesures sur le bateau témoin n'ont été faites qu'en surface.

Sur le fond, pendant le clapage 1, une forte augmentation (de 70 à 1 002 mg L⁻¹) est observée entre T-30 et T0, suivie d'une baisse vers des concentrations entre 120 et 278 mg L⁻¹, toutes significativement plus élevées que celle à T-30. Des évolutions de concentration en MES similaires sont observées pendant les clapages 2, 4, 5 et 6. Dans plusieurs cas, on observe une augmentation de la concentration en MES à T0 et/ou T+10, suivi d'une baisse, et des petites hausses vers T+20 et/ ou après. Pendant le clapage 3, on n'observe pas de différence en concentration des MES entre avant et après clapage.

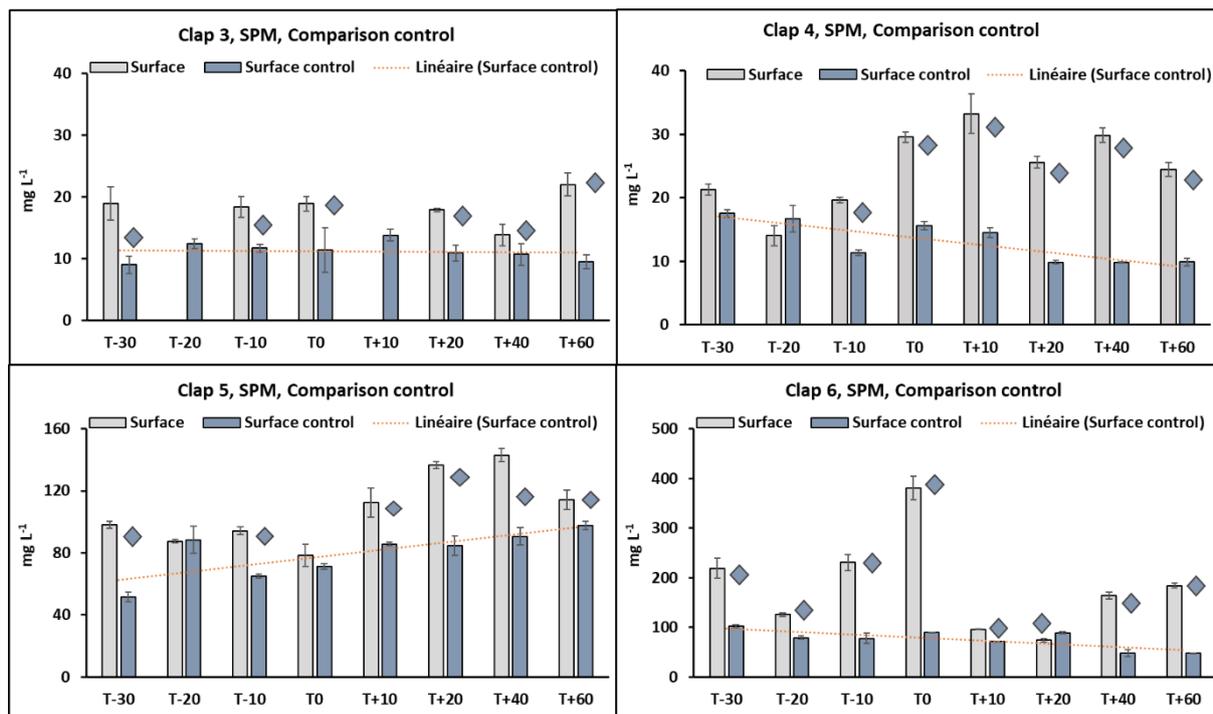
La comparaison des concentrations en MES sur le bateau de suivi et le bateau témoin montre que, dans la grande majorité des observations, la concentration sur le bateau témoin est significativement inférieure à celle du bateau suivi ANNEXE III Figure 3.8). Mais ceci est toujours déjà le cas avant le T0 du clapage. Donc il est difficile d'utiliser cette comparaison afin d'expliquer quantitativement les changements irréguliers observés après clapage par rapport à avant clapage. Il est néanmoins possible de dire que les eaux moins chargées en MES apportées par la marée ont dans tous les cas, indépendamment de la phase de clapage, pu diluer l'effet de clapage sur la concentration en MES. Des pics en concentrations de MES après T0/T+10 sont donc plutôt à expliquer par le vidage de la cuve de la drague que par des apports de MES par la marée. Le départ de la drague, dès le clapage terminé, peut également créer une remise en suspension de MES avant la fin du suivi.

Comme des différences en concentrations MES étaient déjà apparentes entre les deux bateaux avant le début du clapage, il n'est pas non plus à exclure que les deux bateaux ont échantillonné des masses d'eau différentes. Comme le montre la photo aérienne en ANNEXE III Figure 3.9, il existe des veines de différentes turbidités en parallèle dans l'estuaire, et un petit décalage à gauche/droite entre des bateaux peut donc les placer dans une autre veine.

Pour les clapages 5 et 6, une attention particulière a été apportée à l'alignement des deux bateaux.



ANNEXE III Figure 3.7 : Concentration des MES, (Suspended Particulate Matter, SPM) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnage de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.



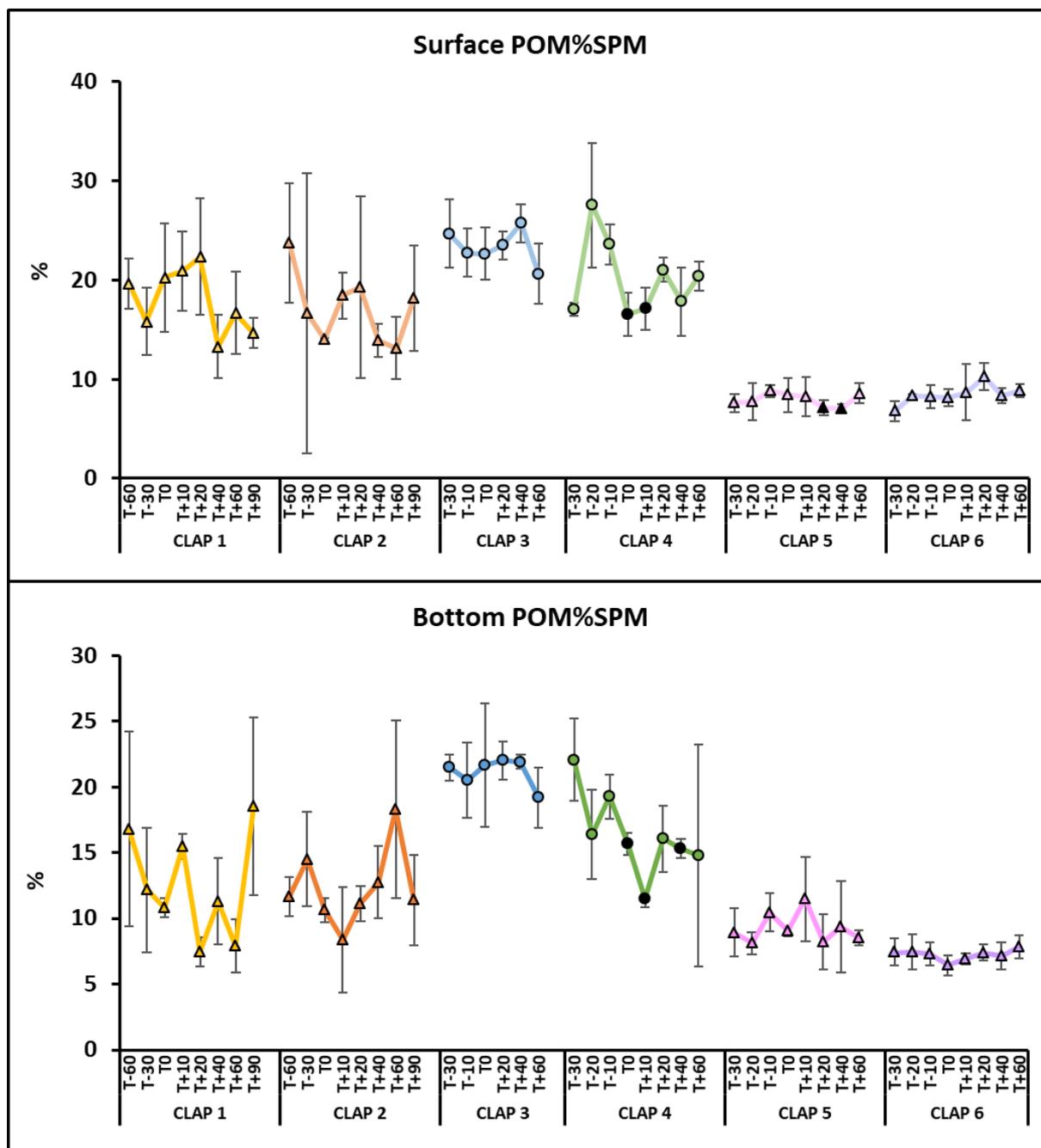
ANNEXE III Figure 3.8 : Comparaison entre la concentration en SPM du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative entre les deux concentrations (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliques, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.



ANNEXE III Figure 3.9 : Photo aérienne de la surface de l'eau de l'estuaire de la Seine à la Pâturage-aux-Rats montrant des veines de différentes turbidité. Source : Google Earth.

3.1.4. Les Matières Organiques Particulaires (MOP)

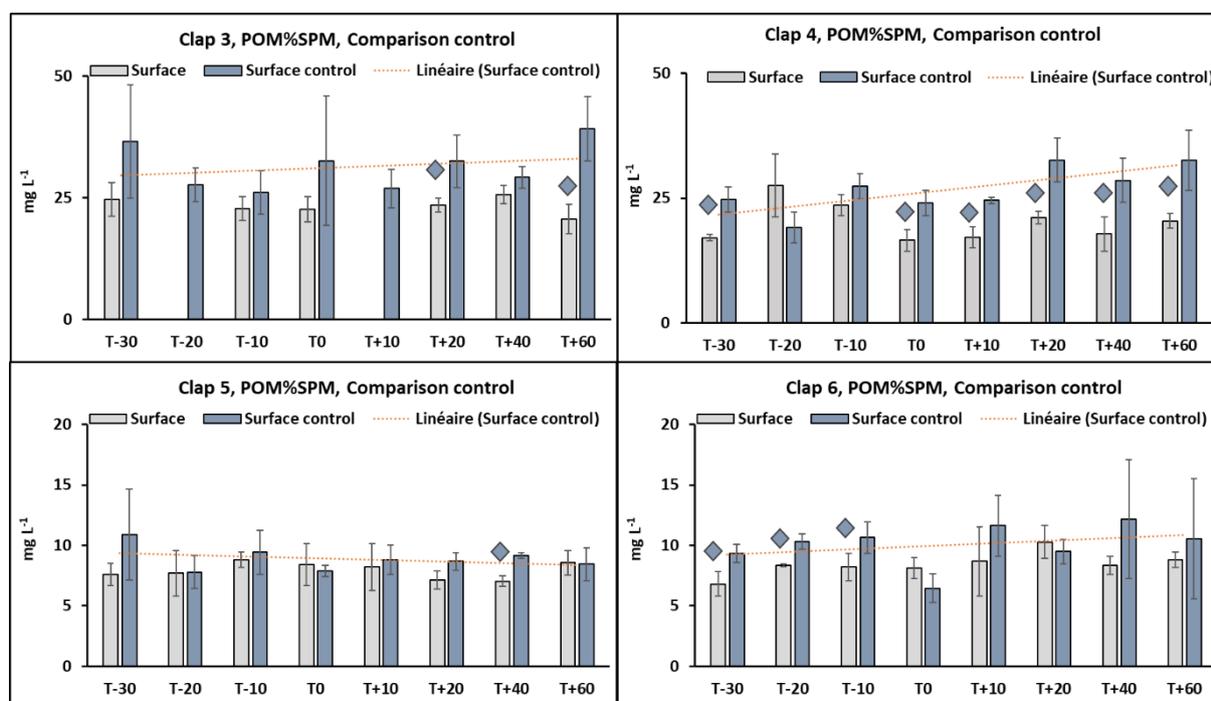
3.1.4.1. Proportion de matière organique dans la MES



ANNEXE III Figure 3.10 : Pourcentage des MOP (Particulate Organic Matter, POM) par rapport aux MES en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

Les MOP exprimées en pourcentage des MES, montrent des variabilités entre les réplicas par échantillonnages plus importantes que les MES, ce qui rend difficile de détecter des différences avant-après clapage ANNEXE III Figure 3.100). Pendant les clapages 1,2 et 3, les MOP (exprimées en % des MES) augmentent après clapage alors qu'elles diminuent pendant les clapages 4 et 5 et restent stables pendant le clapage 6. En surface, le % de MOP augmente de façon continue pendant le clapage 1, et au moment du T0 pendant les clapages 2 et 6. Comme pour les MES, on observe une diminution de la concentration en MOP après T0 pendant les clapage 2 et 6, suivie de variations irrégulières. Sur le fond, la même tendance est observée pour la concentration en MES et le % de MOP. Il est donc probable que le comportement sédimentaire des MES et des MOP diffère selon la composition du matériel clapé.

Le pourcentage des MOP dans le MES est généralement plus élevé sur le bateau témoin que sur le bateau de suivi ANNEXE III Figure 3.111). Ceci peut expliquer en partie les remontées de pourcentage observées après clapage en surface sur le bateau de suivi ANNEXE III Figure 3.100).



ANNEXE III Figure 3.11 : Comparaison entre la concentration en MOP du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative entre les deux concentrations (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.

3.1.4.2. *Caractérisation des MOP par isotopes stables et indices géochimiques*

La signature $\delta^{13}\text{C}$ des MOP continentales, arrivant dans l'estuaire par la Seine fluviale résulte de la signature des débris terrestres, proche de celle des plantes C3 (-26 ‰ à -27 ‰) et de celle du matériel aquatique (phytoplanctonique) variant entre -30 ‰ et -40 ‰ (Middelburg and Herman, 2007; SARTRE, Tackx and Buffan-Dubau (coord) et al., 2023).

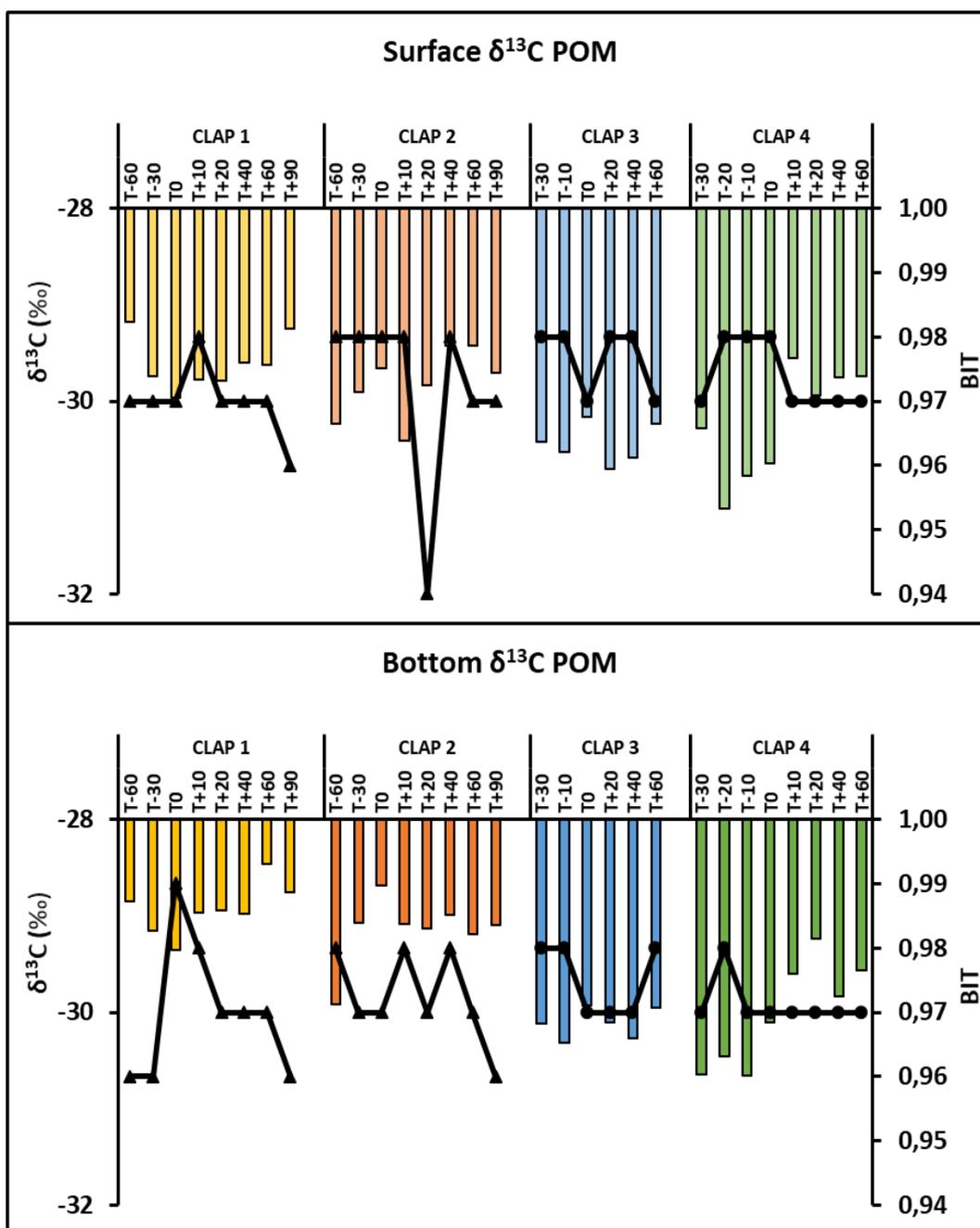
À l'exception du premier clapage, en surface, on observe des signatures en $\delta^{13}\text{C}$ organique qui deviennent moins négatives au moment T0 du clapage, ce qui suggère donc l'apport de matériel d'origine terrestre (ANNEXE III Figure 3.122). La signature en $\delta^{13}\text{C}$ plus négative observée pendant le premier clapage, s'explique par le fait que, pendant cette campagne, les sédiments clapés étaient très riches en matériel d'origine phytoplanctonique (cf 3.0). Les signatures $\delta^{13}\text{C}$ de la MO après T0 montrent une forte variabilité. Pendant les clapages 1 et 4, les signatures restent globalement moins négatives qu'à T-30 ou T-10, alors que pendant le clapage 3, elles deviennent plus négatives, suggérant un apport en matériel phytoplanctonique. Cette variabilité est probablement liée aux changements naturels des caractéristiques des MO au cours des cycles de marée. Au fond de la colonne d'eau, on observe les mêmes tendances qu'en surface, donc un enrichissement en $\delta^{13}\text{C}$ des MOP indiquant le caractère terrigène plus marqué des sédiments clapés par rapport au matériel présent dans la colonne d'eau avant le clapage. Il faut souligner qu'après le T0 la signature en $\delta^{13}\text{C}$ de la MOP reste moins négative qu'à T-10 ou T-30 pour tous les clapages. Le $\delta^{13}\text{C}$ de la MOP présente par ailleurs globalement des valeurs plus négatives en surface qu'au fond de la colonne d'eau. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les débris terrestres, qui ont une densité plus élevée que le phytoplancton, se concentrent plus vite au fond que les apports phytoplanctoniques.

Un suivi des MOP à l'échelle moléculaire a également été réalisé. L'indice BIT, calculé à partir de molécules d'origine microbienne (tetraéthers de glycérol), trace les apports de MO provenant des sols. Il varie entre 0 et 1, les plus fortes valeurs correspondant à un matériel majoritairement terrestre et les plus faibles valeurs à un matériel principalement aquatique (phytoplanctonique ou microbienne).

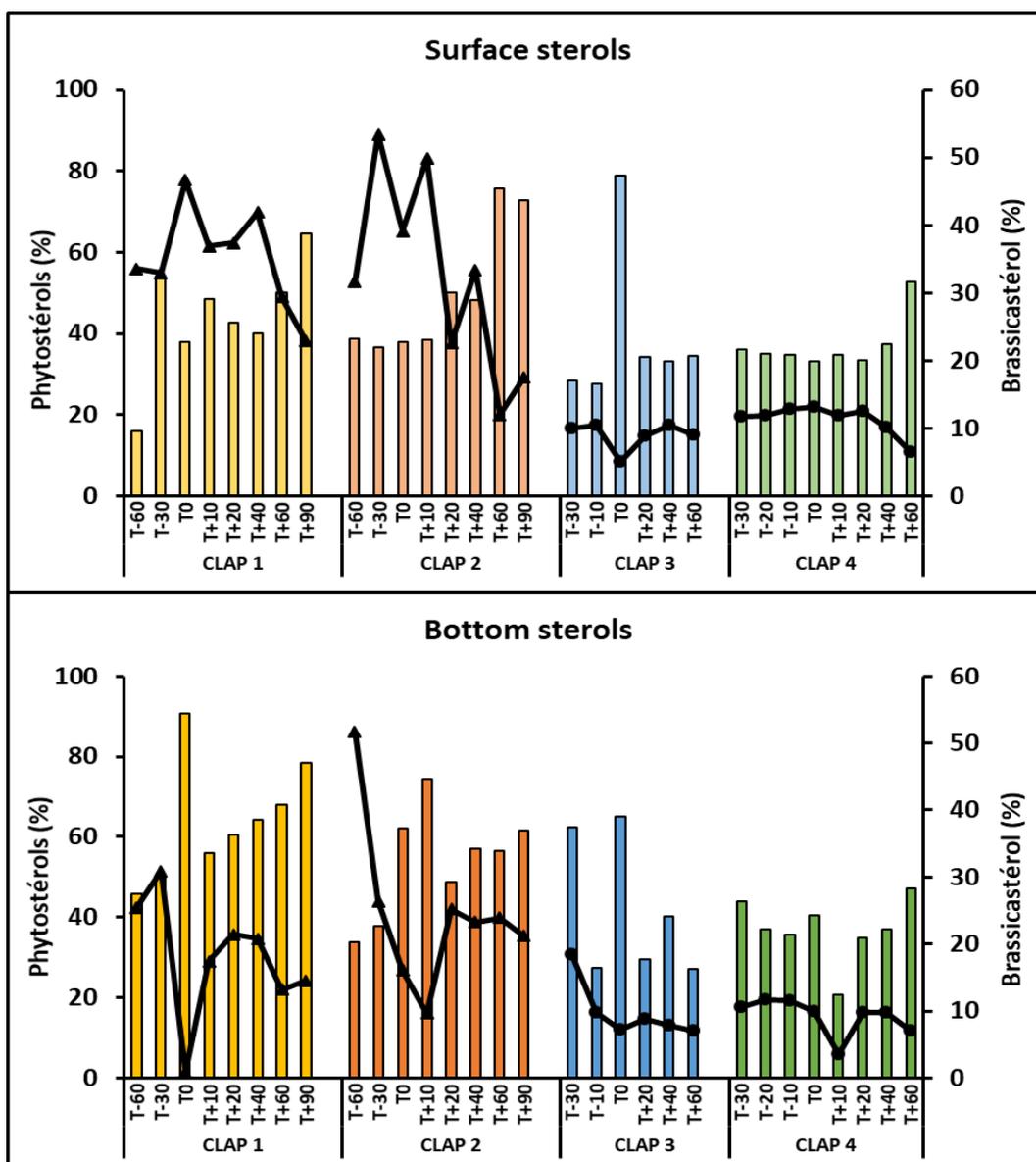
En surface, l'indice BIT présente globalement des valeurs comparables avant (référence à T-10 ou T-30) et après clapage pour les expériences 1, 2 et 3 ANNEXE III Figure 3.122). Le BIT présente une variation nette au moment du clapage ou juste après ce dernier (T +10 à T+20) avant de retrouver les mêmes valeurs par la suite. Sur l'ensemble des expériences, les variations du BIT sont globalement opposées à celles du $\delta^{13}\text{C}$ de la MOP comme observé dans l'ensemble de l'estuaire (cf. SARTRE, Tackx and Buffan-Dubau (coord) et al., 2023). Cela reflète l'apport de matériel terrigène avec le clapage, qui disparaît rapidement (> 10 min) après clapage.

Au fond de la colonne d'eau ANNEXE III Figure 3.122), le BIT varie nettement à T0. On observe par ailleurs une plus forte variabilité du BIT après le clapage au fond qu'en surface de la colonne d'eau. Il est difficile d'interpréter ces variations, qui sont probablement dues à l'influence naturelle des marées.





ANNEXE III Figure 3.12 : Variations de la composition isotopique en carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}$, barres) des matières organiques particulières et de l'indice BIT (triangles et ligne) en surface et au fond de la colonne d'eau lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.



ANNEXE III Figure 3.13 : Variations du pourcentage de phytostérols (composés provenant des végétaux terrestres, barres) et de brassicastérol (composé d'origine algale, ligne) ; en surface et au fond de la colonne d'eau lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.

D'autres traceurs moléculaires peuvent être utilisés pour mettre en évidence les variations des apports des MOP provenant des végétaux terrestres (phytostérols) vs. les MOP d'origine aquatique (brassicastérol).

La ANNEXE III Figure 3.13 met en évidence une proportion relative de brassicastérol (d'origine aquatique) nettement plus élevée durant les clapages 1 et 2 par rapport aux clapages 3 et 4, reflétant la nature phytoplanctonique prédominante du matériel organique présent au sein des sédiments dragués pendant les deux premiers clapages. L'abondance

relative en phytostérols (provenant des végétaux terrestres) durant les clapages 3 à 4 est quant à elle inférieure ou égale à celle observée durant les deux premiers clapages. Cette différence reflète une plus forte proportion d'autres stérols que le brassicastérol et les phytostérols au cours des clapages 3 et 4, comme le cholestérol, molécule ubiquiste. Cela montre la variabilité de la qualité du matériel dragué au cours des différents clapages. Comme observé pour les autres traceurs, la variation des proportions des différents stérols après le T0 diffère d'un clapage à l'autre. Au fond de la colonne d'eau, on observe globalement les mêmes variations de proportions des phytostérols qu'en surface après le T0 des différents clapages. Les augmentations très nettes du pourcentage de phytostérol au fond de la colonne d'eau aux alentours du T0 confirment les observations réalisées à partir du $\delta^{13}\text{C}$ de la MOP, *ie.* le fait que le phytoplancton ne sédimente pas aussi vite que les MOP terrestres, essentiellement composé de détrit.

3.1.5. Les Matières Organiques Dissoutes (MOD)

Les résultats présentés ici portent sur les analyses des propriétés optiques (absorbance UV-Visible et fluorescence 3D) des MOD des échantillons d'eau. Ces analyses renseignent sur les propriétés générales des MOD et donnent des informations globales sur leurs sources, composition chimique, état de dégradation et réactivité (Parlanti et al., 2000; McKnight et al., 2001; Ejarque et al., 2017).

L'indice d'humification HIX (Zsolnay et al., 1999) estime le degré de maturation des MOD (plus HIX augmente, plus le degré d'aromaticité et donc le degré de maturation augmente).

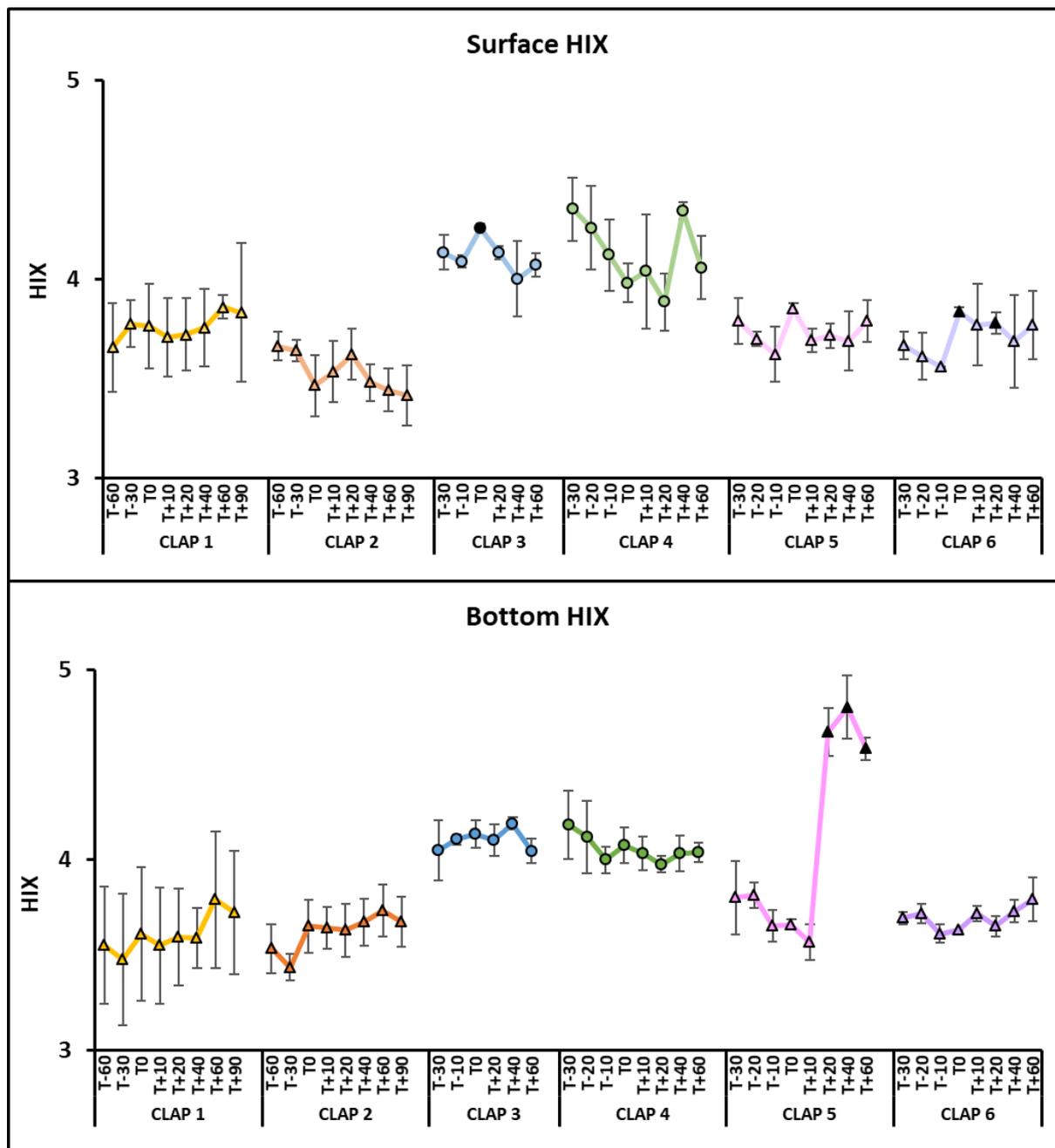
L'indice d'activité biologique (BIX) caractérise la production autochtone des MOD en milieu aquatique (Vacher, 2004; Huguet et al., 2009) et permet d'estimer la présence de matière organique fraîchement produite dans le milieu (une valeur supérieure à 0,8 indique des MOD produites récemment et d'origine autochtone, c'est à dire produite par le phyto ou le bactérioplancton dans l'eau) et plus cette valeur se rapproche de 0,5 plus la part de matériel frais est faible).

L'indice FI permet de différencier les MOD issues des végétaux supérieurs (FI = 1,3) ou d'origine aquatique/microbienne (FI = 1,9) (McKnight et al., 2001; Cory et al., 2010).

Le rapport d'intensités γ/α reflète la contribution de matières protéiques résultant de l'activité biologique/bactérienne dans les MOD.

L'évolution de ces indices pendant les suivis de clapages est présentée ci-dessous (ANNEXE III Figure 3.144).





ANNEXE III Figure 3.14 : HIX (indice d'humification) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test < 0,05 ; $N=3$). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliques, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

En surface, les valeurs du HIX au cours des clapages montrent une variabilité entre les réplicas assez élevée, et des évolutions difficilement interprétables en fonction du T0 du clapage. Uniquement pendant les clapages 3 et 6, la valeur du HIX est significativement plus élevée à T0 qu'avant clapage.

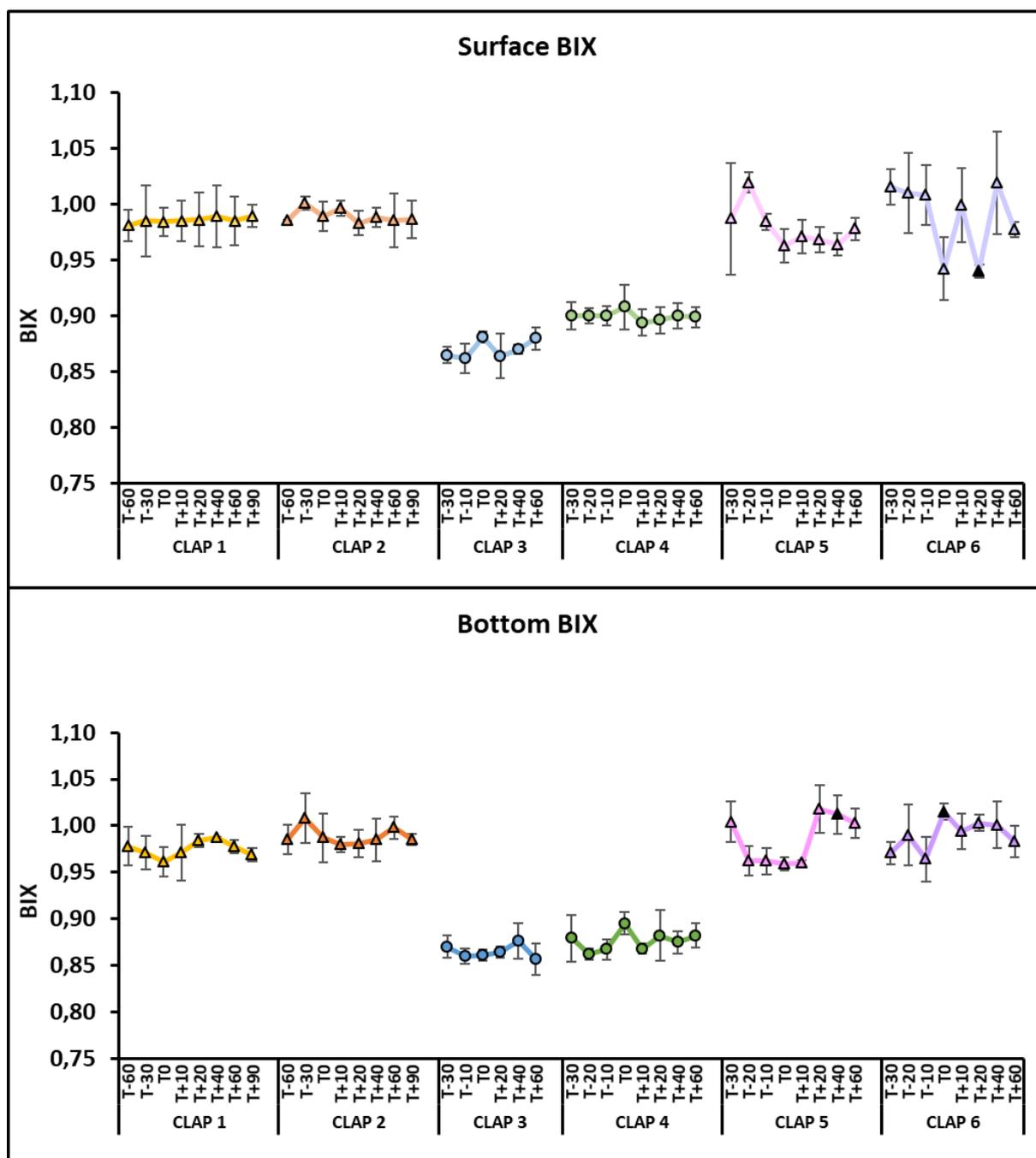
Sur le fond, les valeurs de HIX après clapage augmentent en continu jusqu'à T+60 pendant les clapages 1, 2 et 3. Elles sont beaucoup plus élevées qu'avant clapage pendant les T+20, T+40 et T+60 du clapage 5. Les valeurs pendant les clapages 4 et 6 ne montrent que peu de changements au cours du suivi.

Les valeurs du BIX en surface sont élevées (> 0.90) pendant les clapages 1, 2, 5 et 6, indiquant une activité biologique dans les eaux analysées, aussi bien avant qu'après clapage (ANNEXE III Figure 3.145). Pendant les clapages 3 et 4, les indices BIX sont également $> 0,80$, indiquant donc toujours une forte activité récente, mais moindre que pendant les clapages 1, 2, 5 et 6. On note que les BIX montrent la distribution inverse des HIX selon les clapages : les HIX sont les plus élevés pendant les clapages 3 et 4 (ANNEXE III Figure 3.144).

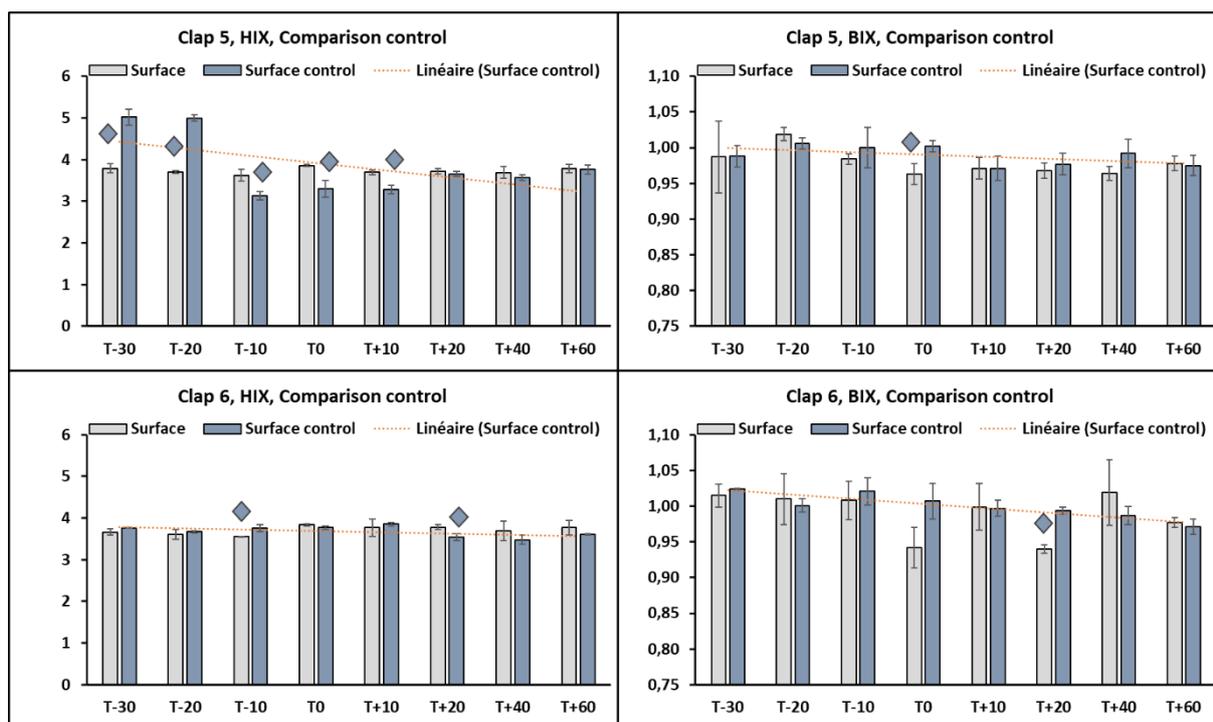
On observe peu de changements dans les valeurs de BIX au cours des clapages. En surface, il y a une baisse à T0 pendant les clapages 5 et 6, mais pas de tendance significative par la suite.

Sur le fond, on observe également pendant le clapage 5 des valeurs BIX plus basses, entre T-20 et T+20, mais qui sont donc difficiles à lier au clapage, comme déjà présentes à T-20. À part une valeur plus élevée qu'à T-10 observée à T0 pendant le clapage 6, il n'y a pas de changements en BIX observés au cours des suivis.





ANNEXE III Figure 3.15 : BIX (indice d'activité biologique) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (*t-test* ou *wilcox.test* < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

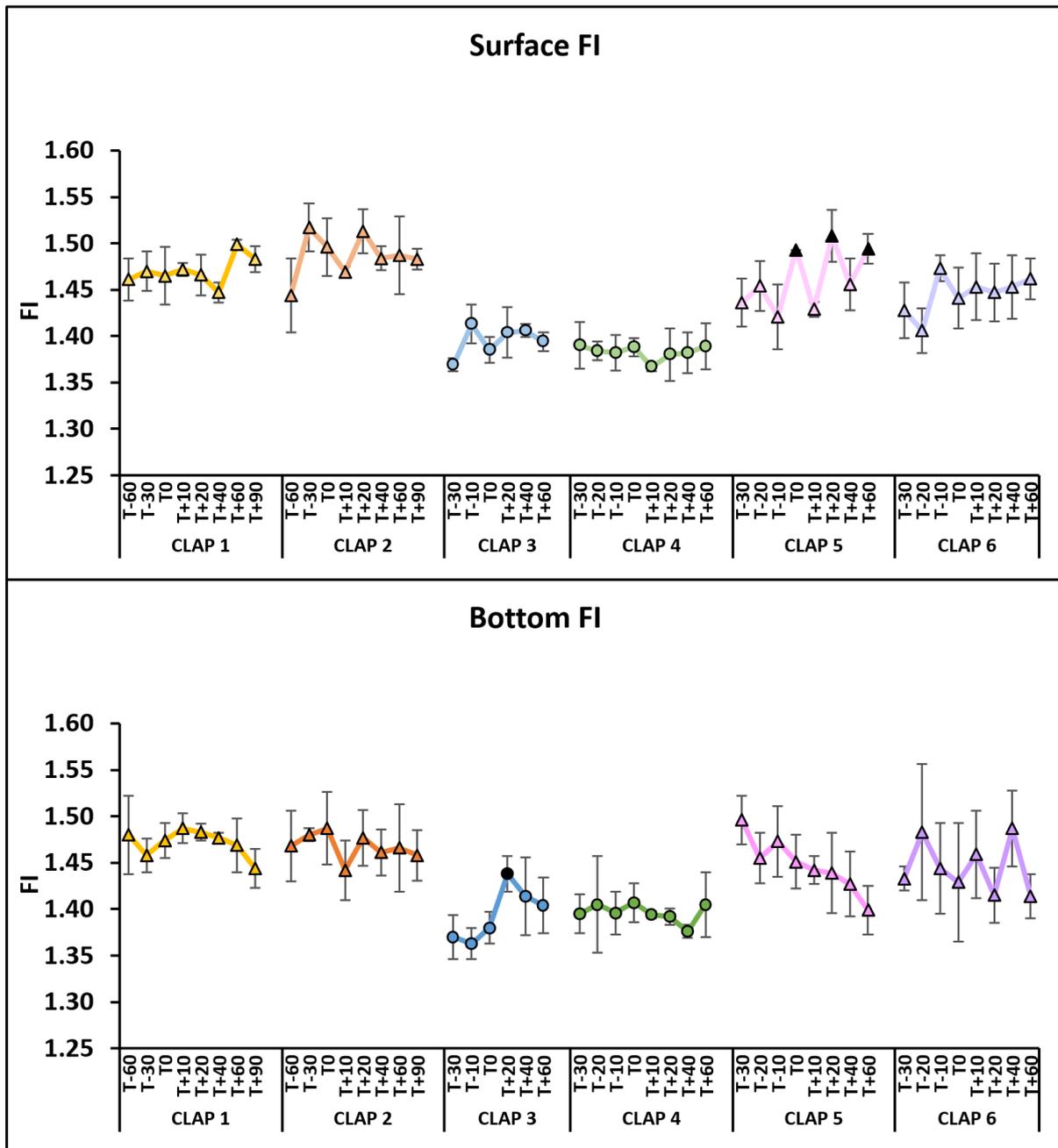


ANNEXE III Figure 3.16 : Comparaison des indices HIX et BIX calculés pour les échantillons prélevés à partir du bateau de suivi et du bateau témoin pour les clapages 5, 6. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative avec le témoin (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

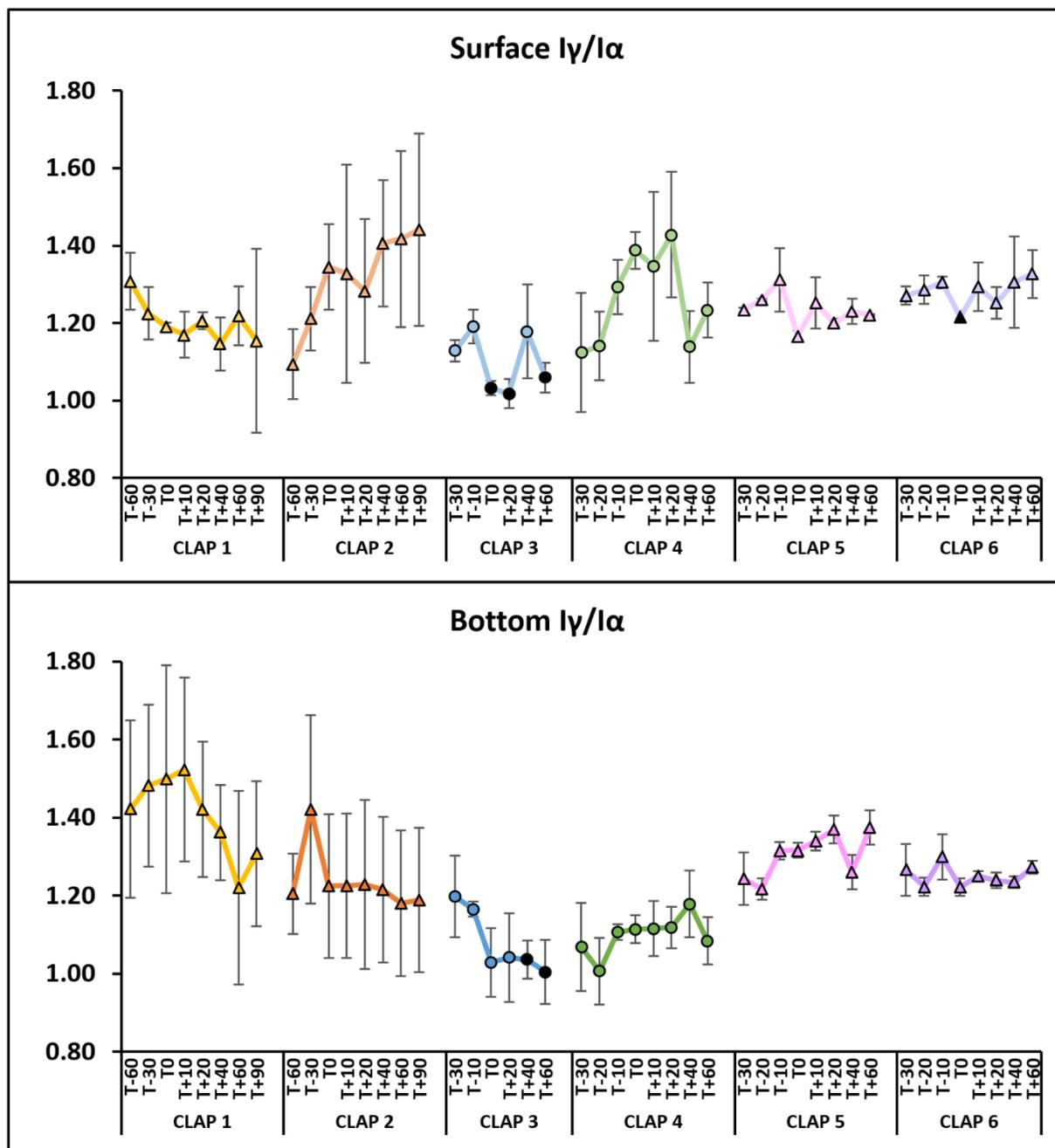
Pendant le clapage 5, les valeurs HIX en surface sont supérieures sur le bateau témoin à celles du bateau suivi avant clapage, et inférieures entre T-10 et T+10, tandis qu'elles restent stables tout le long du suivi sur le bateau de suivi ANNEXE III Figure 3.166). C'est donc plutôt la masse d'eau arrivant avec la marée qui change en composition de matières matures. Les valeurs de BIX au fond ne diffèrent significativement entre les deux bateaux qu'à T0 du clapage 6 avec une valeur plus élevée sur le bateau témoin.

Pendant le clapage 6, les valeurs HIX restent stables et ne sont différentes entre les deux bateaux qu'à T-10 et T+20. La même tendance est observée pour l'indice BIX, uniquement différent entre les deux bateaux à T+20, bien qu'on observe une valeur moindre sur le bateau suivi que sur le témoin à T0, comme pendant le clapage 5 ANNEXE III Figure 3.166).

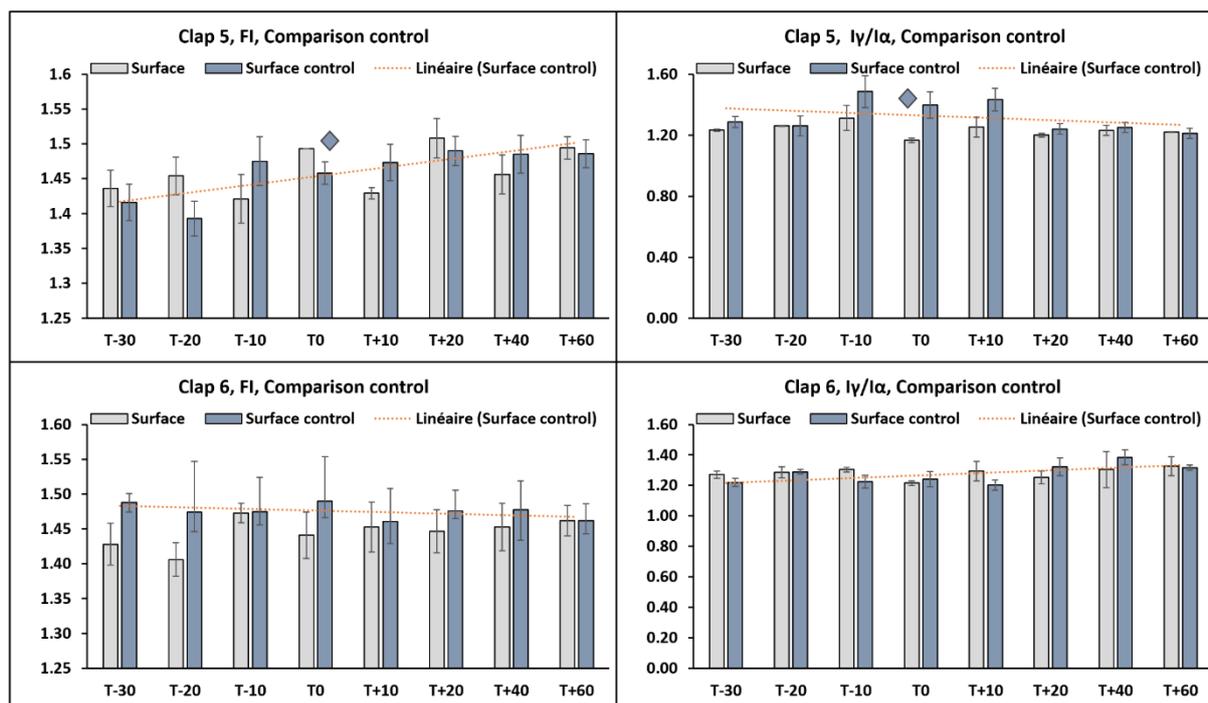
L'indice FI et le rapport γ/α montrent, comme pour les indices HIX et BIX, des différences entre les clapages ANNEXE III Figure 3.177 et ANNEXE III Figure 3.188) mais la très grande variabilité des valeurs obtenues ne permet pas de déterminer de tendances ou d'effets particuliers au cours d'un même clapage, ni entre le bateau témoin et le bateau de suivi ANNEXE III Figure 3.1919).



ANNEXE III Figure 3.17 : FI (indicateur de matériel issu de végétaux terrestres ou d'origine microbienne) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.



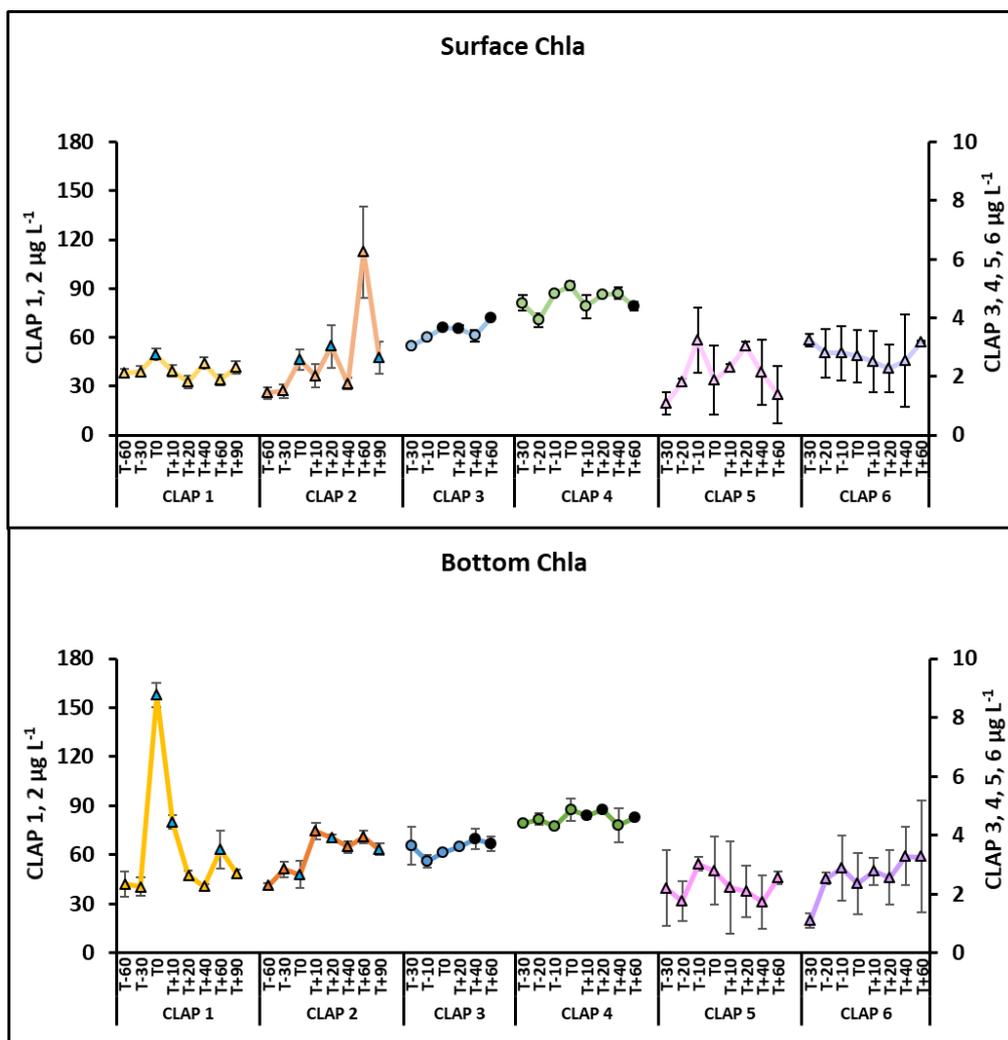
ANNEXE III Figure 3.18 : γ/α (indice d'activité bactérienne) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (*t*-test ou *wilcox.test* < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliques, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.



ANNEXE III Figure 3.19 : Comparaison des indices FI et γ/α calculés pour les échantillons prélevés à partir du bateau de suivi et du bateau témoin pour les clapages 5, 6. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative avec le témoin (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

Les indices basés sur les propriétés optiques des MOD indiquent des caractéristiques différentes de l'origine et de la composition (plutôt d'origine terrestre, plutôt formée récemment *in situ*) entre les clapages. Par contre, ils ne permettent pas de détecter de changements des caractéristiques des MOD pendant les clapages. La technique d'analyse des propriétés optiques permet de déterminer plusieurs autres indices concernant l'origine, la composition et la réactivité des MOD, qu'il pourrait être intéressant d'exploiter.

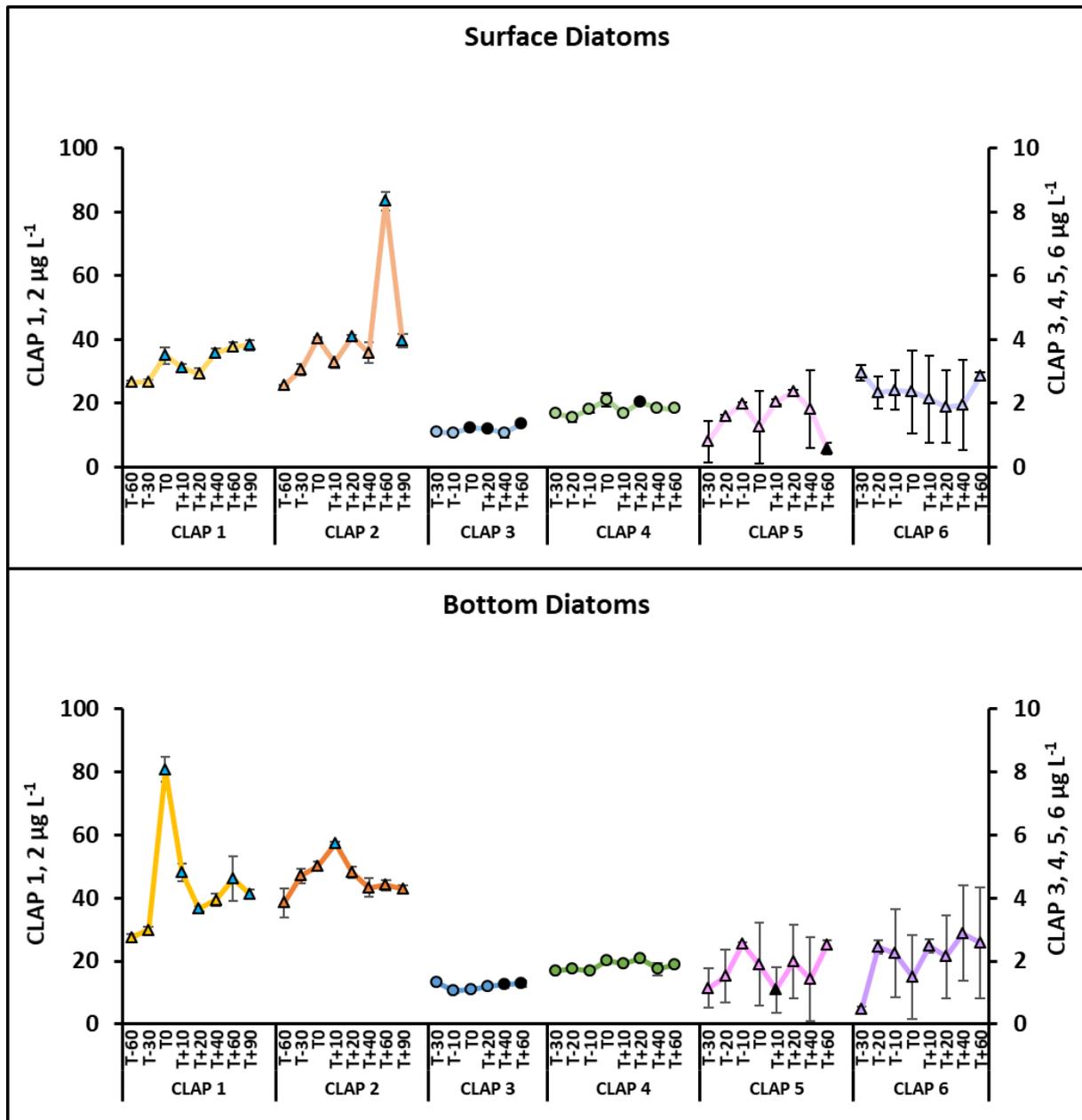
3.1.6. Le phytoplancton



ANNEXE III Figure 3.20 : Concentration en Chla en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. A noter que les concentrations pendant les deux premiers clapages sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliquas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

Les concentrations en Chla en surface et au fond étaient beaucoup plus élevées pendant les clapages 1 et 2 que pendant les suivants ANNEXE III Figure 3.200). Pendant les clapages 1, 2 et 3, en surface, on observe une augmentation significative de la concentration en Chla (mesure de la biomasse du phytoplancton) entre la concentration à T0 et la concentration en Chla de la population phytoplanctonique naturelle dans l'eau à T-30. A partir de T+20, les concentrations en Chla fluctuent. On observe une valeur très élevée à T+60 du clapage 2.

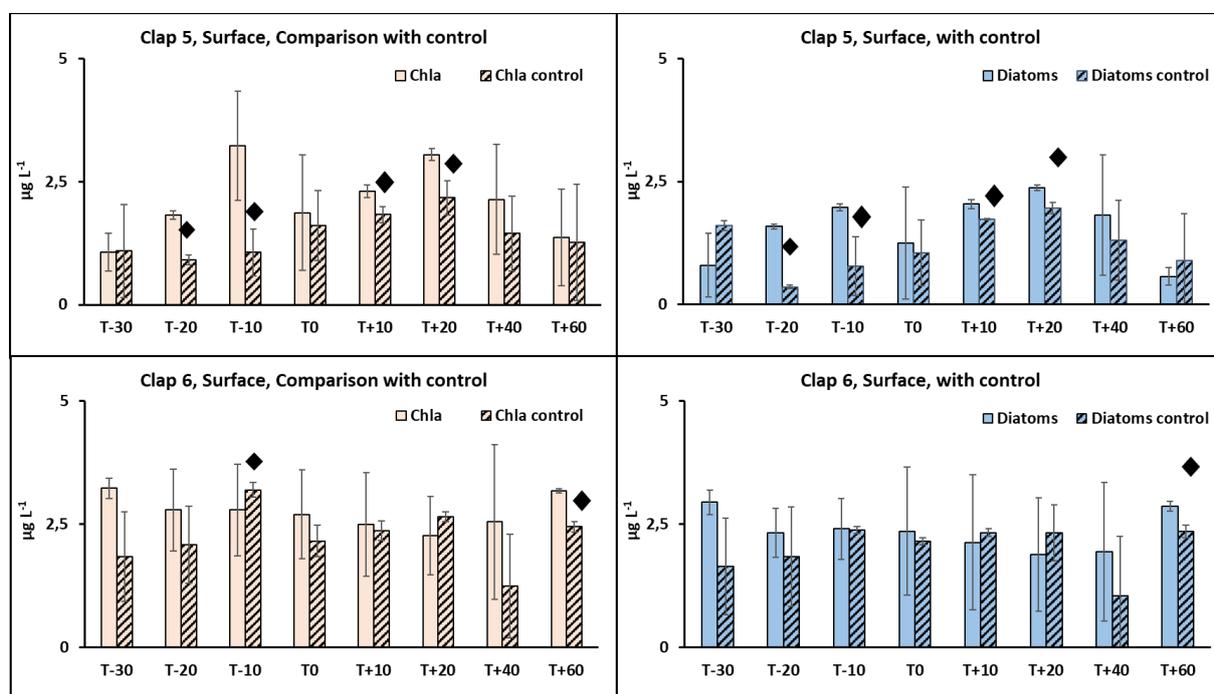
Pendant les clapages 4, 5 et 6, les concentrations en Chla fluctuent tout au long des observations, sans changements significatifs par rapport à T-10, sauf à T+60 du clapage 4.



ANNEXE III Figure 3.21 : Concentration en diatomées (Diatoms) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. A noter que les concentrations pendant les deux premiers clapage sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliques, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.

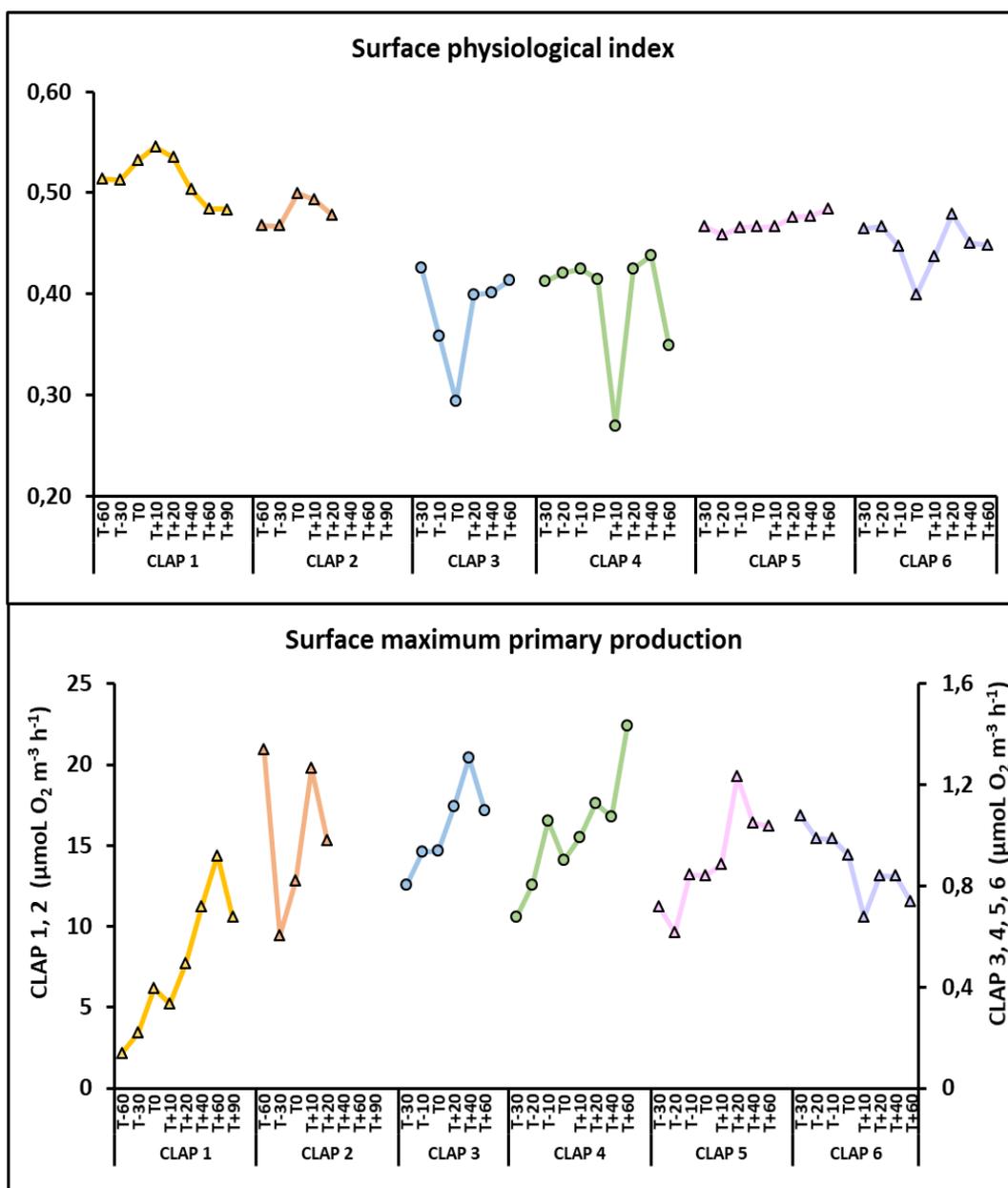
Sur le fond, l'augmentation de la concentration en Chla à T0 est très forte pendant le clapage 1 (jusqu'à $160 \mu\text{g L}^{-1}$) et s'observe aussi clairement pendant le clapage 2. Pendant tous les autres clapages, les variations des concentrations ne montrent pas de différence claire entre avant et après clapage ANNEXE III Figure 3.200). La présence d'importantes concentrations de phytoplancton dans les sédiments clapés explique l'augmentation du pourcentage de MOP dans les MES rapporté en ANNEXE III Figure 3.100).

Les concentrations en diatomées suivent en grande partie les concentrations en Chla, et sont également plus élevées pendant le clapage 1 et 2 que pendant les autres (ANNEXE III Figure 2.2 : ANNEXE III Figure 3.211). Sur le fond, pendant le clapage 1, les concentrations en diatomées restent plus élevées à tous les échantillonnages après clapage qu'avant.



ANNEXE III Figure 3.22 : Comparaison entre la concentration en Chla et en pigments marqueurs des diatomées du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges noirs représentent une différence significative entre les deux concentrations (t -test ou wilcox.test $< 0,05$; $N=3$). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 répliques.

La concentration en Chla mesurée sur le bateau de suivi est significativement supérieure à celle du bateau contrôle entre T-20 et T+20 (sauf à T0) du clapage 5, ce qui indique un échantillonnage dans deux masses d'eau différentes. Pendant le clapage 6, il n'y a une concentration en Chla plus élevée sur le bateau témoin uniquement à T-10, tandis que les concentrations en MES étaient différentes la plupart du temps (ANNEXE III Figure 3.222). Les concentrations en marqueurs diatomées sont également plus homogènes entre les deux bateaux pendant le clapage 6 que 5.



ANNEXE III Figure 3.23 : Indice physiologique (F_v/F_m) du phytoplancton et production primaire maximale ($GOPIIm$) en surface lors des différents temps d'échantillonnage de tous les clapages. A noter que les productions primaires pendant les deux premiers clapage sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.

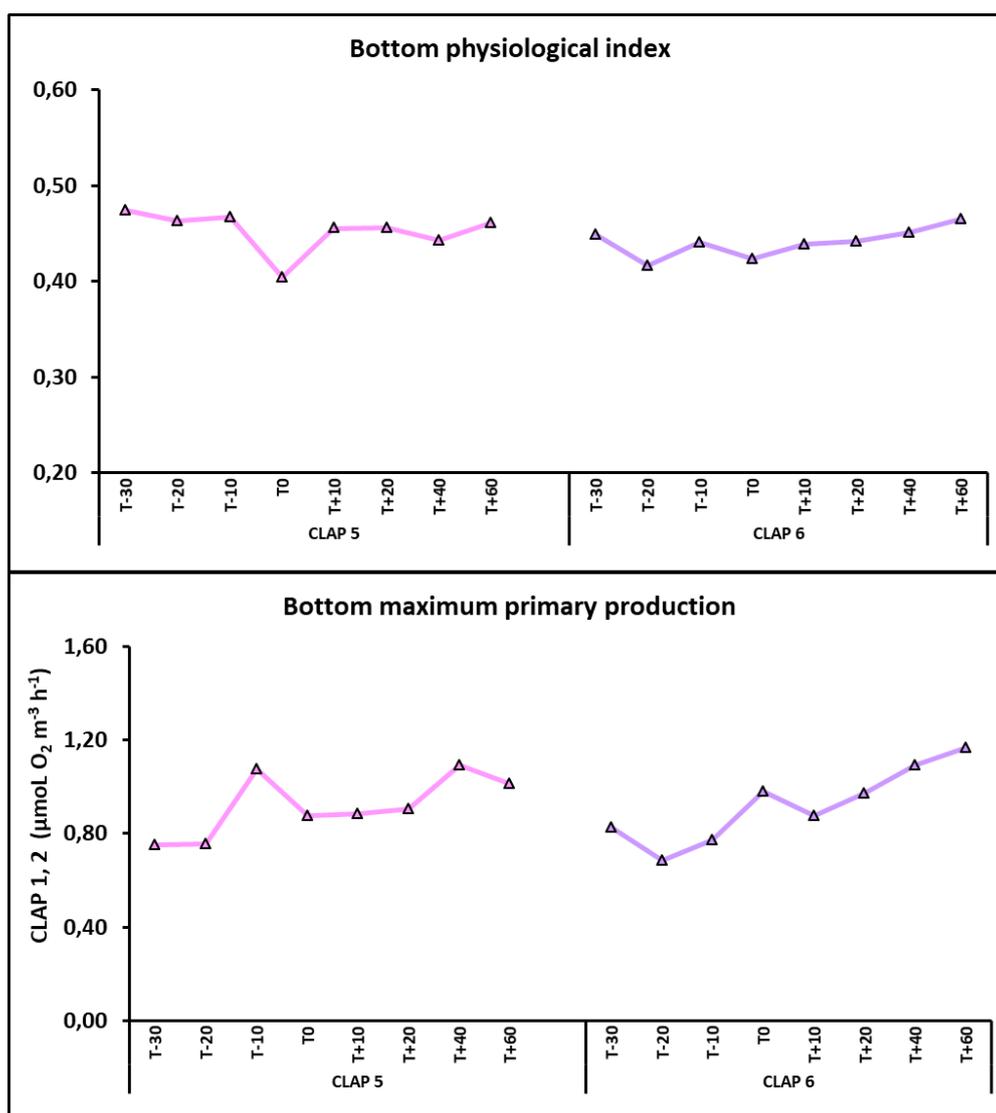
L'index physiologique, qui représente l'état de santé du phytoplancton, est, en surface, plus faible pendant les clapages 3 et 4 que pendant les autres clapages ANNEXE III Figure 3.233). Les valeurs inférieures à 0,4 traduisent un état physiologique médiocre, ou une augmentation des cellules chlorophylliennes mortes dans les échantillons.

L'index physiologique augmente, en surface, autour du T0 du clapage pendant les clapages 1 et 2 et descend par rapport à T-30 ou T-10 pendant les clapages 3, 4 et 6. A plus

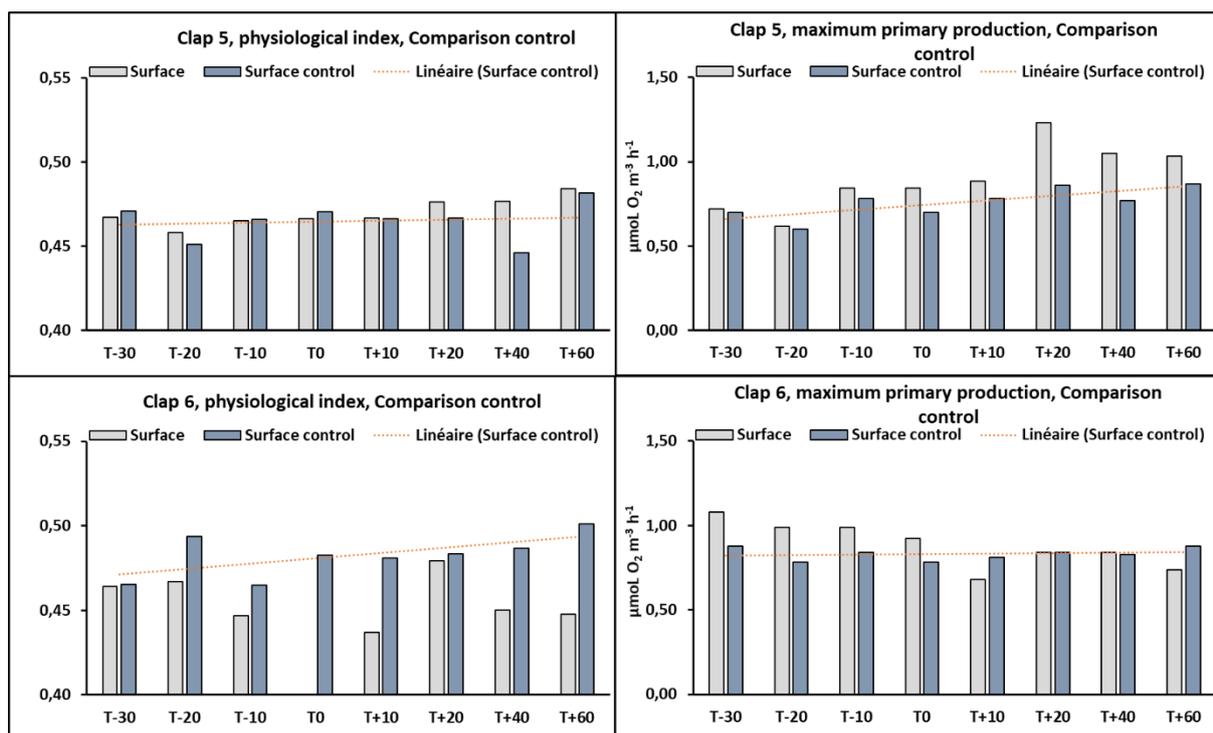
long terme, l'indice redescend pendant le clapage 1 et 2, et remonte vers des valeurs comparables à avant le clapage pour les clapages 3, 4 et 6. Pendant le clapage 5, les valeurs augmentent légèrement en continu le long des observations.

A l'exception du clapage 6, on observe des petits changements (augmentation ou baisse) de la production primaire autour du T0 de clapage, suivi d'une augmentation en quasi continue jusqu'à T+20, voire T+60 dans les cas des clapages 1 et 4 (ANNEXE III Figure 3.233).

On observe clairement une baisse de l'indice et une augmentation de la production primaire au moment de T0, suivi d'un retour à des valeurs pré-clapage après 10 minutes.



ANNEXE III Figure 3.24 : Indice physiologique (F_v/f_m) et production primaire maximale ($GOPIIm$) en surface lors des différents temps d'échantillonnages des clapages 5 et 6. Les triangles représentent le mois de septembre.



ANNEXE III Figure 3.25 : Comparaison entre l'indice physiologique (F_v/F_{mc}) et la production primaire maximale ($GOPIIm$) du bateau de suivi et celui du bateau témoin. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.

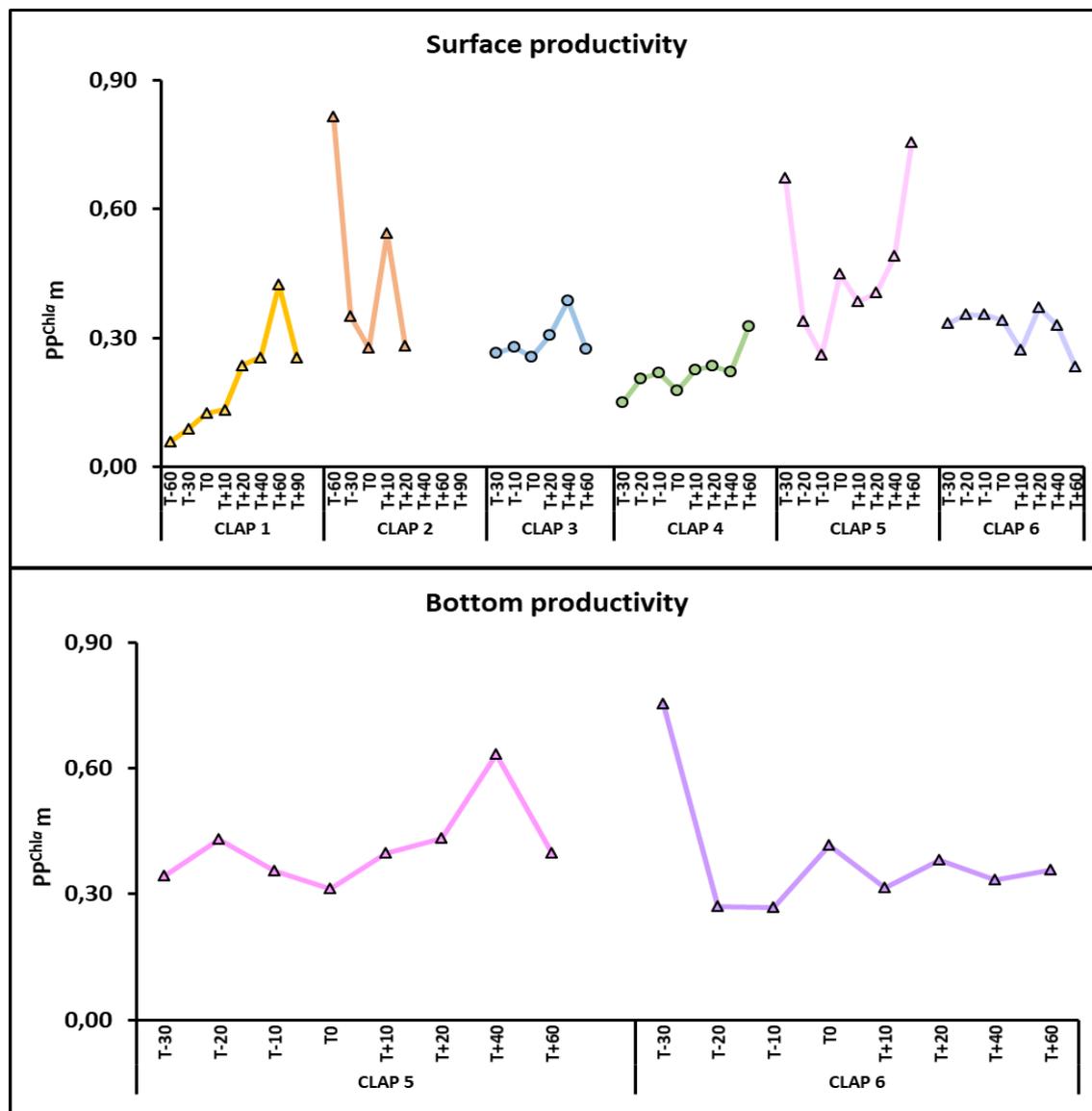
Pendant le clapage 5, il n'y a pas de différence en indice physiologique entre le bateau suivi et le bateau témoin (sauf à T+40), tandis que la production primaire est plus élevée à partir de T0 sur le bateau suivi ANNEXE III Figure 3.255). Ceci indique que l'augmentation de la production primaire après clapage observée en ANNEXE III Figure 3.244 est bien causée par ce dernier.

Pendant le clapage 6, on observe par contre un meilleur état physiologique sur le bateau contrôle tout le long des observations, et une production plus faible sur le bateau contrôle avant clapage, qui augmente au même niveau que celle observée sur le bateau suivi après clapage.

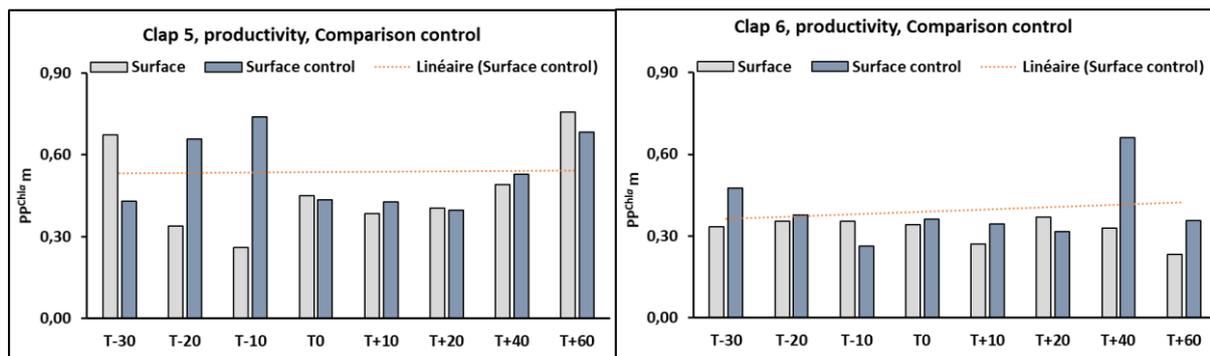
La productivité primaire ($GOPIIm/Chla$), qui correspond à la production primaire standardisée par la biomasse de phytoplancton, ANNEXE III Figure 3.266) montre généralement des valeurs assez comparables pendant tous les suivis de clapage. Des valeurs basses ont été observées avant clapage 1, et des valeurs élevées à T-60 du clapage 2 et à T-30 et +60 du clapage 5.

Sur le fond, les productivités pendant les clapages 5 et 6 sont également comparables. Contrairement à l'index physiologique, la productivité ne montre donc pas d'effet de clapage (ANNEXE III Figure 3.24 : *Indice physiologique (F_v/f_{Fm}) et production primaire maximale ($GOPIIm$) en surface lors des différents temps d'échantillonnages des clapages 5 et 6. Les triangles représentent le mois de septembre.*

Les productivités primaires mesurées par le bateau de suivi et le témoin sont très différentes avant le T0 lors du clapage 5 puis elles suivent la même tendance à la hausse. Lors du clapage 6, les deux bateaux donnent des résultats comparables à l'exception du T+40.



ANNEXE III Figure 3.26 : Productivité maximale du phytoplancton (GOPIIm/Chla) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages des clapages. Les triangles représentent le mois de septembre.



ANNEXE III Figure 3.27 : Comparaison de la productivité maximale du phytoplancton sur le bateau de suivi et sur le bateau témoin. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.

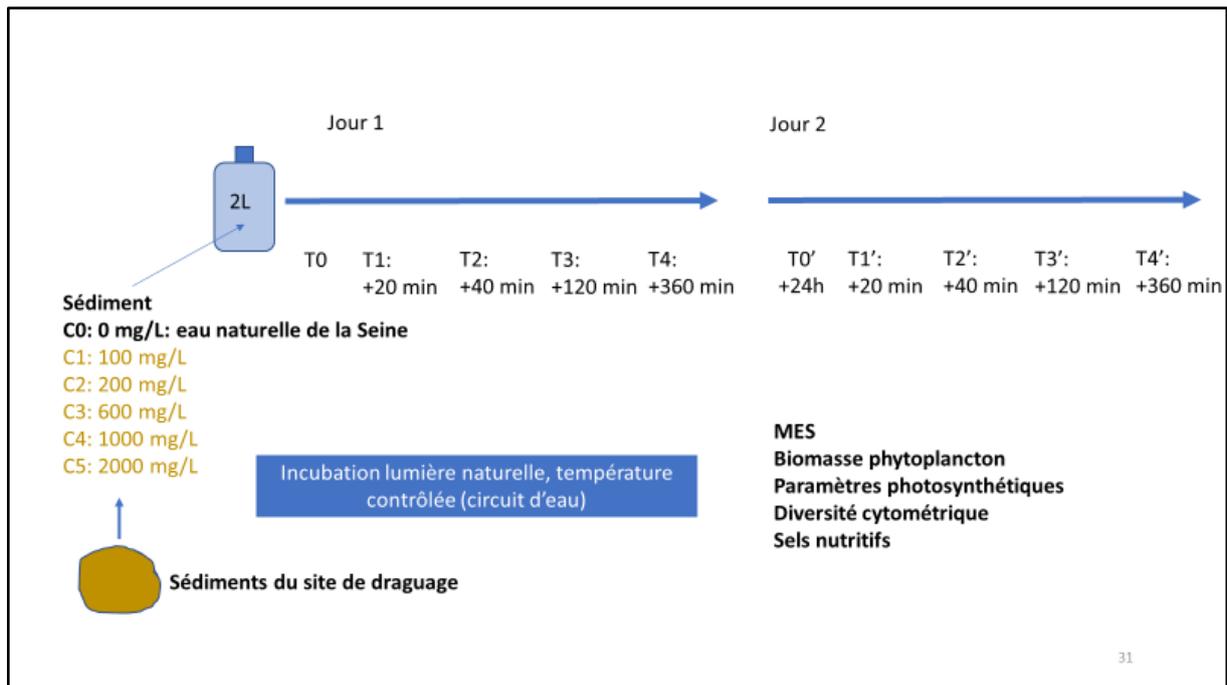
3.2. Résultats des expériences en laboratoire

3.2.1. Expériences avec le phytoplancton

Les expériences en laboratoire avec le phytoplancton ont consisté à incuber de l'eau naturelle de la Seine, échantillonnée sur le site de clapage, avec et sans ajout de sédiments en provenance du site de dragage. Le protocole est schématisé sur la

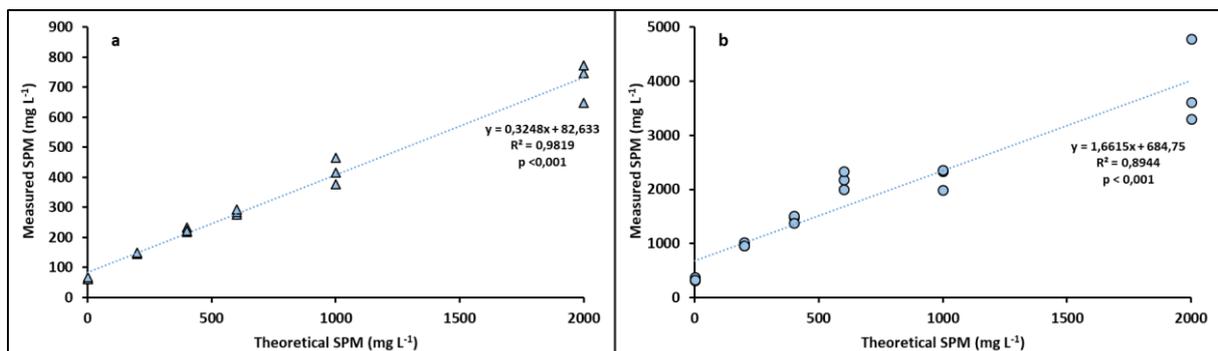
ANNEXE III Figure 3.2828. Une gamme de concentrations en MES a été préparée, en ajoutant une quantité de sédiments, qui se présentaient sous forme d'une boue assez liquide.

A partir de l'eau naturelle de la Seine (de Duclair), des gammes de concentrations en MES ont été préparées par enrichissement en sédiment à 100, 200, 600, 1000 et 2000 mg L⁻¹ et incubées dans des bouteilles claires de 2 litres de volume. Les bouteilles étaient exposées à la lumière naturelle pendant 2 jours, avec des échantillonnages à T0, et après 20, 40, 120 et 360 minutes. Un traitement contrôle consiste en l'incubation d'une même quantité d'eau naturelle de la Seine dans les mêmes conditions que les bouteilles enrichies en sédiment.

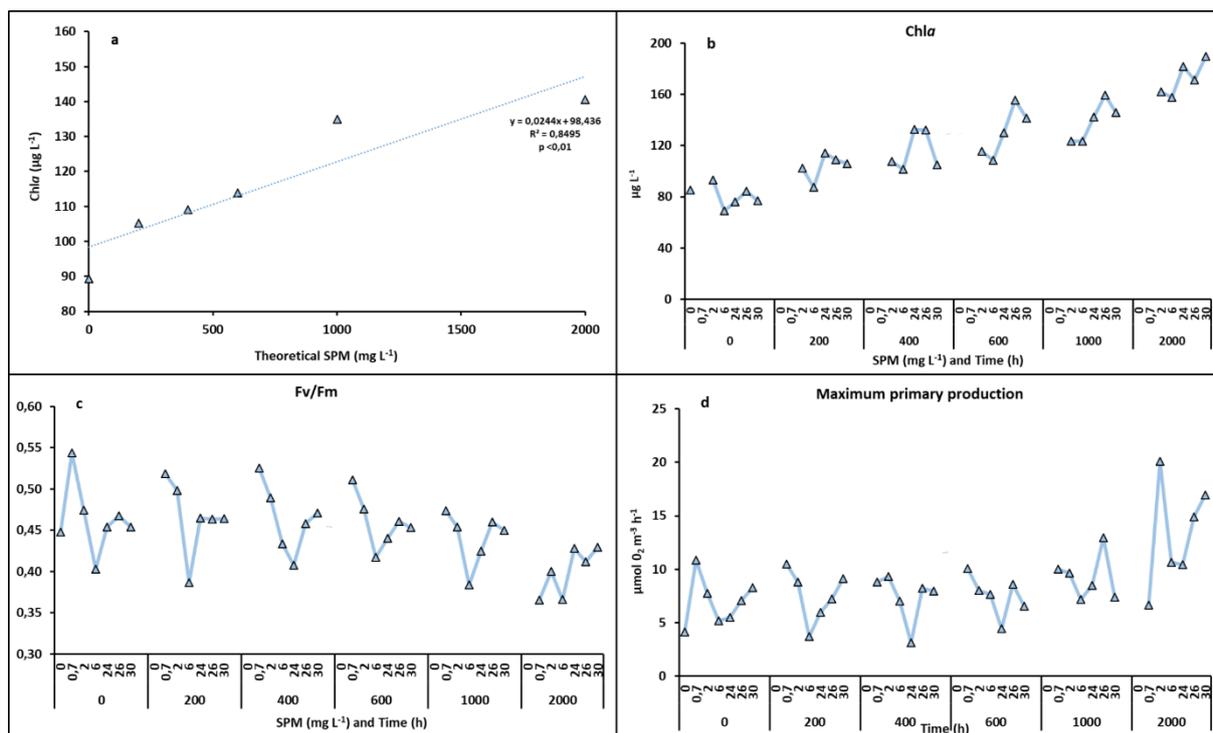


ANNEXE III Figure 3.28 : Protocole des expériences avec du phytoplancton. Voir texte pour plus d'explication.

Il est important de noter que, dans les expériences avec phyto et zooplancton, les concentrations "théoriques" testées correspondent à des suspensions préparées à partir de la boule de boue. On pèse une quantité de cette boue en poids frais qu'on ajoute à l'eau naturelle de la Seine afin de créer une certaine concentration. Après l'expérience, les échantillons sont séchés à 60 °C afin d'obtenir les valeurs de MES. En effet, le terme "MES" fait, dans la pratique, référence au poids sec des Matières En Suspension. Ces valeurs MES sont donc plus basses que les concentrations envisagées, et réalisées obligatoirement à partir de matériel frais, comme le montre l'exemple en ANNEXE III ANNEXE III Figure 3.2929.

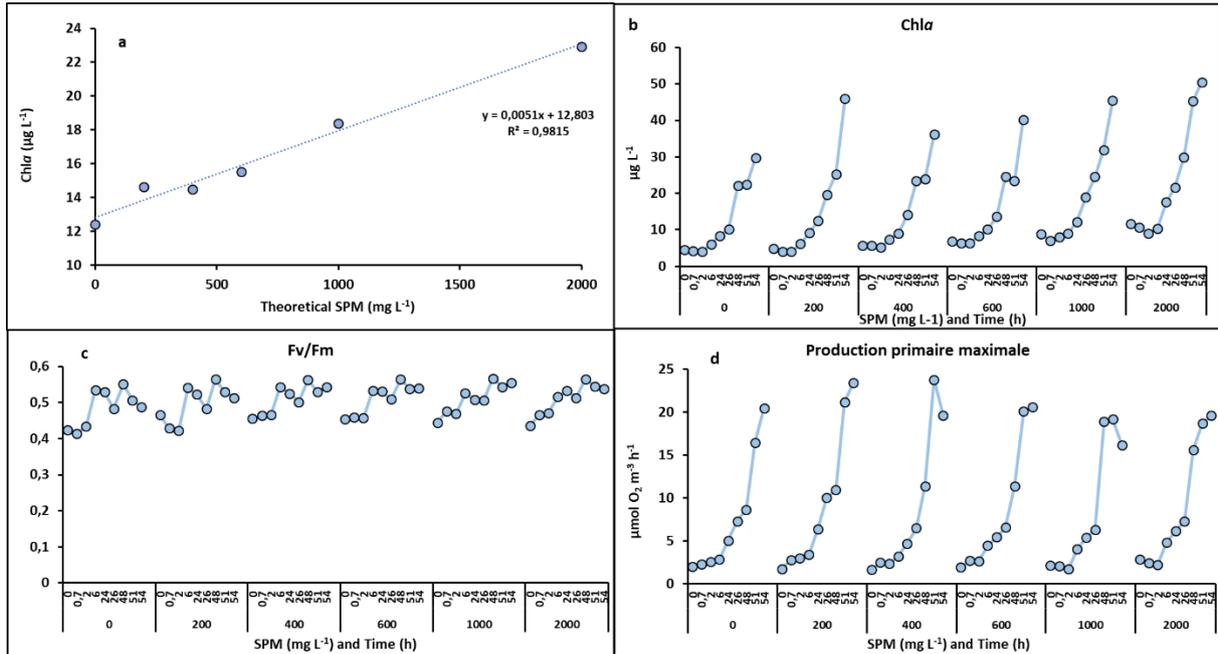


ANNEXE III ANNEXE III Figure 3.29 : Concentration en MES mesurée en poids sec versus concentration préparée à base de poids frais dans les expériences en laboratoire. a) Expérience de septembre 2020, b) Expérience de juin 2021.

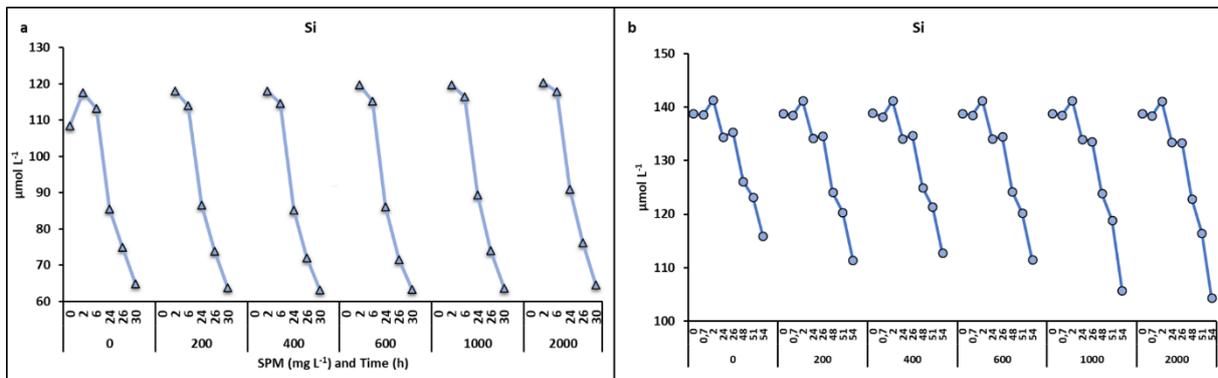


ANNEXE III Figure 3.30 : Expérience de septembre 2020 : a) Relation entre l'ajout des sédiments de clapage et la concentration en Chla mesurée lors des expérimentations, b) Concentration en Chla, c) Fv/Fm : Rendement quantique maximum du PSII, mesure de l'état physiologique des cellules phytoplanctoniques, d) Capacité photosynthétique maximale convertie en O₂ : GOPII max. Les paramètres photosynthétiques mesurés à l'aide d'un LabSTAF (Chelsea Technology).

La première expérience s'est déroulée du 10 au 11 septembre 2020. La ANNEXE III Figure 3.303.a montre une relation linéaire entre l'ajout de sédiments (MES) et la concentration en Chla dans les expériences d'incubation de phytoplancton naturel de la Seine avec des concentrations en sédiments en provenance du site de dragage à différentes concentrations. Cette relation met en évidence que les MES sont très riches en Chla. Une analyse complémentaire a montré une concentration de 21,6 µg Chla g⁻¹ de sédiment. Le suivi de la dynamique phytoplanctonique sur les incubations enrichies en sédiment de clapage confirme que les sédiments ont apporté du phytoplancton actif capable de croître et se développer après les enrichissements (ANNEXE III Figure 3.300.b). ANNEXE III Figure 3.3232.a montre l'utilisation de la Silice dissoute, ce qui correspond à une activité de diatomées. L'état physiologique (Fv/Fm) se maintient pour toutes les incubations ANNEXE III Figure 3.300.c). La productivité primaire, qui est liée à la biomasse, montre des valeurs maximales pour la plus forte concentration en sédiment, ce qui confirme l'enrichissement de l'eau en phytoplancton productif par l'ajout de sédiment ANNEXE III Figure 3.300.d).



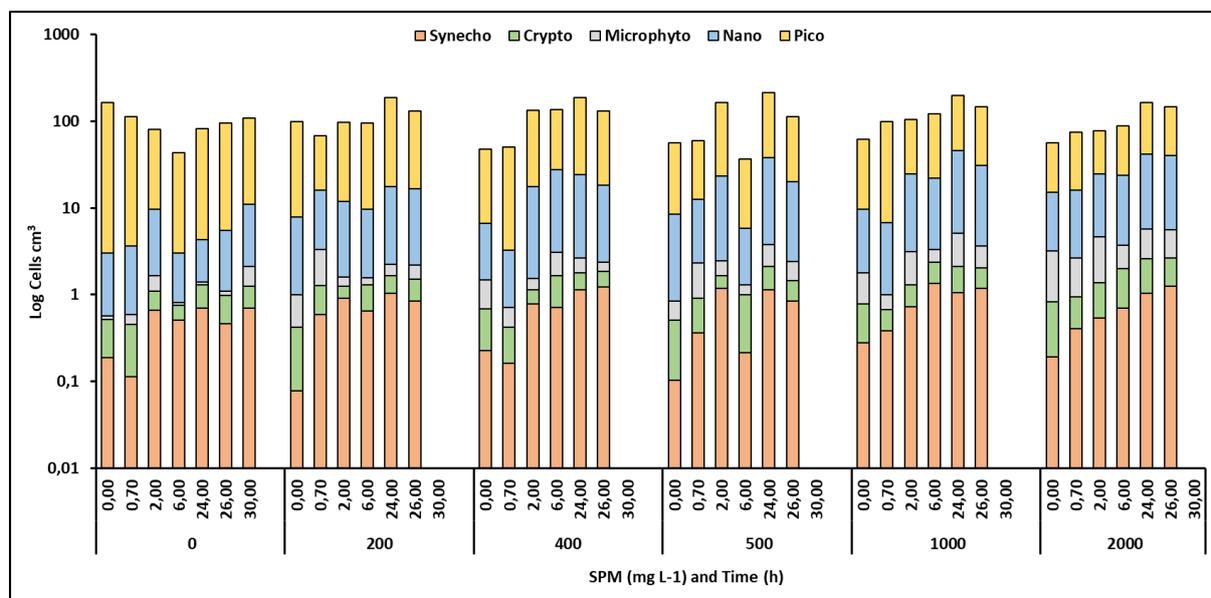
ANNEXE III Figure 3.31 : Expérience de juin 2021 : a) Relation entre l'ajout des sédiments de clapage et la concentration en Chla mesurée lors des expérimentations, b) Concentration en Chla, c) Fv/Fm : Rendement quantique maximum du PSII, mesure de l'état physiologique des cellules phytoplanctoniques, d) Capacité photosynthétique maximale convertie en O₂ : GOPII max. Les paramètres photosynthétiques mesurés à l'aide d'un LabSTAF (Chelsea Technology).



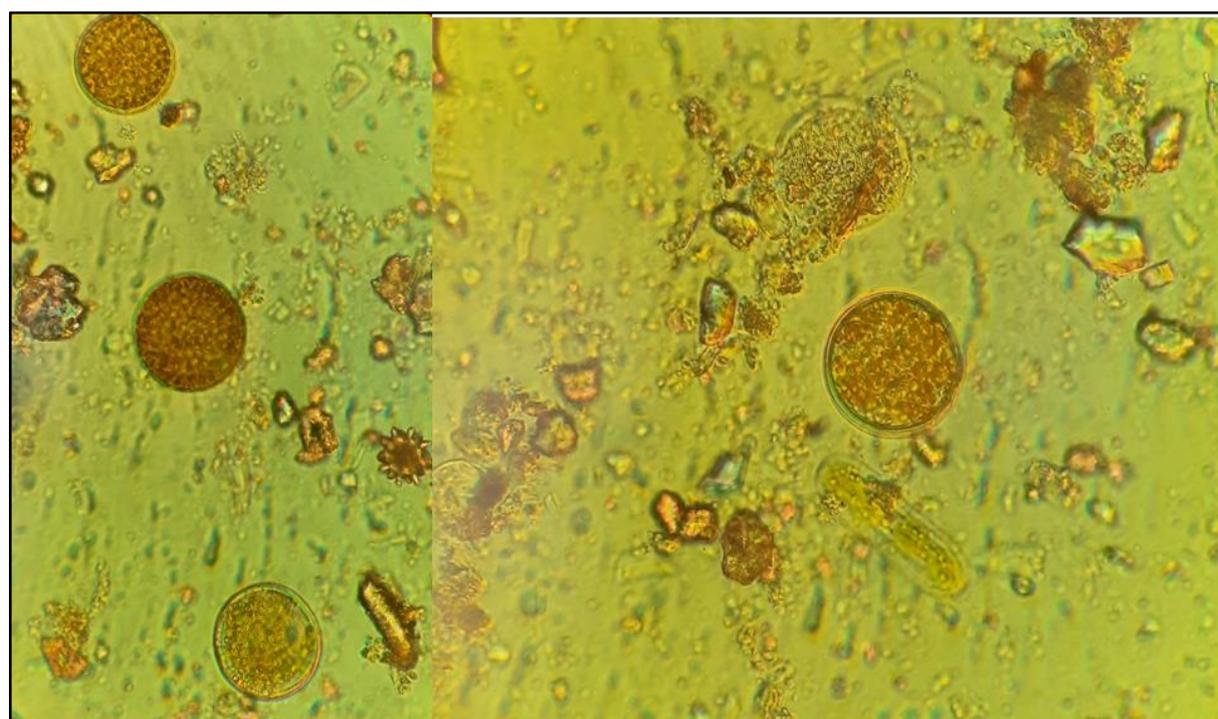
ANNEXE III Figure 3.32 : Concentration en silice dissoute dans l'eau au cours de la première incubation de phytoplancton. a) Expérience de septembre 2020 (triangles), b) Expérience de juin 2021 (ronds).

Des analyses de cytométrie en flux sur les échantillons de la première expérience ont permis de détecter les groupes d'organismes suivants : picophytoplancton, nanophytoplancton, microphytoplancton, Cryptophytes, *Synechococcus*.

En termes d'abondance numérique (nombre de cellules mL⁻¹) le pico et nanophytoplancton sont principalement présents dans les échantillons (ANNEXE III Figure 3.3333). Aucune tendance évidente n'apparaît sur la structure des communautés en fonction du temps et des enrichissements en sédiments. Une photo prise de l'échantillon du départ a montré la présence importante de diatomées centrées dans ces boues (ANNEXE III Figure 3.3434).



ANNEXE III Figure 3.33 : Évolution de la communauté phytoplanctonique (Cytosens) en fonction de la quantité de sédiment ajoutée et du temps d'incubation. Expérience de septembre 2020.



ANNEXE III Figure 3.34 : *Photo microscopique des sédiments pris sur le site de dragage pour la première expérience d'incubation, montrant la présence de diatomées centriques (formes circulaires brunes).*

La deuxième expérience s'est déroulée du 15 au 18 juin 2021. On observe de nouveau un enrichissement en phytoplancton avec l'ajout de MES ANNEXE III Figure 3.3131.a). Les concentrations en Chl_a sont beaucoup plus faibles que pendant la première expérience (Max de 50,5 vs 189,9 µg L⁻¹) et augmentent de façon plus régulière à toutes les concentrations pendant l'incubation ANNEXE III Figure 3.3131.b).

Contrairement à la première expérience, l'indice Fv/Fm augmente généralement entre 0 et 6 h, pour fluctuer après ANNEXE III Figure 3.3132.c). Les valeurs sont dans le même ordre de grandeur que pendant la première expérience, mais ne diminuent pas avec la concentration en MES, indiquant une bonne condition physiologique du phytoplancton pendant toute l'incubation. La production primaire augmente au cours du temps pour atteindre des maxima de 20,5 à 23,5 µmol O₂ m⁻³ h⁻¹ dans le contrôle et les concentrations en MES jusqu'à 600 mg L⁻¹, et moins élevées (entre 16,2 et 20,6 µmol O₂ m⁻³ h⁻¹) pour les concentrations en MES plus élevées (ANNEXE III Figure 3.311.d). Les maxima sont comparables avec celle mesurées pendant la première expérience, mais évoluent différemment avec la concentration en MES: la production maximale pendant la première expérience était mesurée à la plus haute concentration en MES ANNEXE III Figure 3.300.d).

La diminution de la concentration en silice dissoute observée pendant les deux expériences ANNEXE III Figure 3.3232.a.b) montre qu'une importante partie de la production primaire est réalisée par les diatomées, le seul groupe de phytoplancton à utiliser la silice.

Les concentrations très élevées de phytoplancton dans les sédiments ajoutés, surtout au cours de la première incubation, ont rendu impossible d'interpréter correctement l'effet des boues sur la concentration du phytoplancton naturelle dans l'eau de la Seine, son état physiologique et la production primaire réalisée. Le même problème s'est posé pendant la deuxième incubation, mais en moindre mesure. Comme les concentrations en Chl_a dans le contrôle à T₀ (donc la concentration de la population de phytoplancton naturelle) était plus faible pendant la deuxième expérience que la première, l'effet de l'ajout de phytoplancton a de nouveau dominé sur les signaux du phytoplancton naturel. Les résultats des suivis de clapage *in situ* (ANNEXE III Figure 3.20) indiquent que des concentrations très élevées de phytoplancton ont été présentes dans les sédiments de clapage uniquement lors des deux premiers clapages.

Les indices caractérisant les propriétés des MOD (cf 3.Erreur ! Source du renvoi introuvable.5) ont également été suivis pendant la deuxième expérience d'incubation de phytoplancton ANNEXE III Figure 3.3535). Les valeurs de l'indice HIX sont relativement faibles (< 6), représentant donc plutôt de la matière peu mature. Cet indice augmente très fortement entre 6 et 24 h d'incubation, pour rester à peu près stable après pour le contrôle et les concentrations 200 et 400 mg L⁻¹, et descendre dans les concentrations plus élevées. L'augmentation observée, pourrait être due à une utilisation des petites molécules plus labiles et moins aromatiques présentes dans le milieu qui diminueraient donc proportionnellement avec le temps et renforcerait ainsi le caractère aromatique moyen des MOD. La diminution

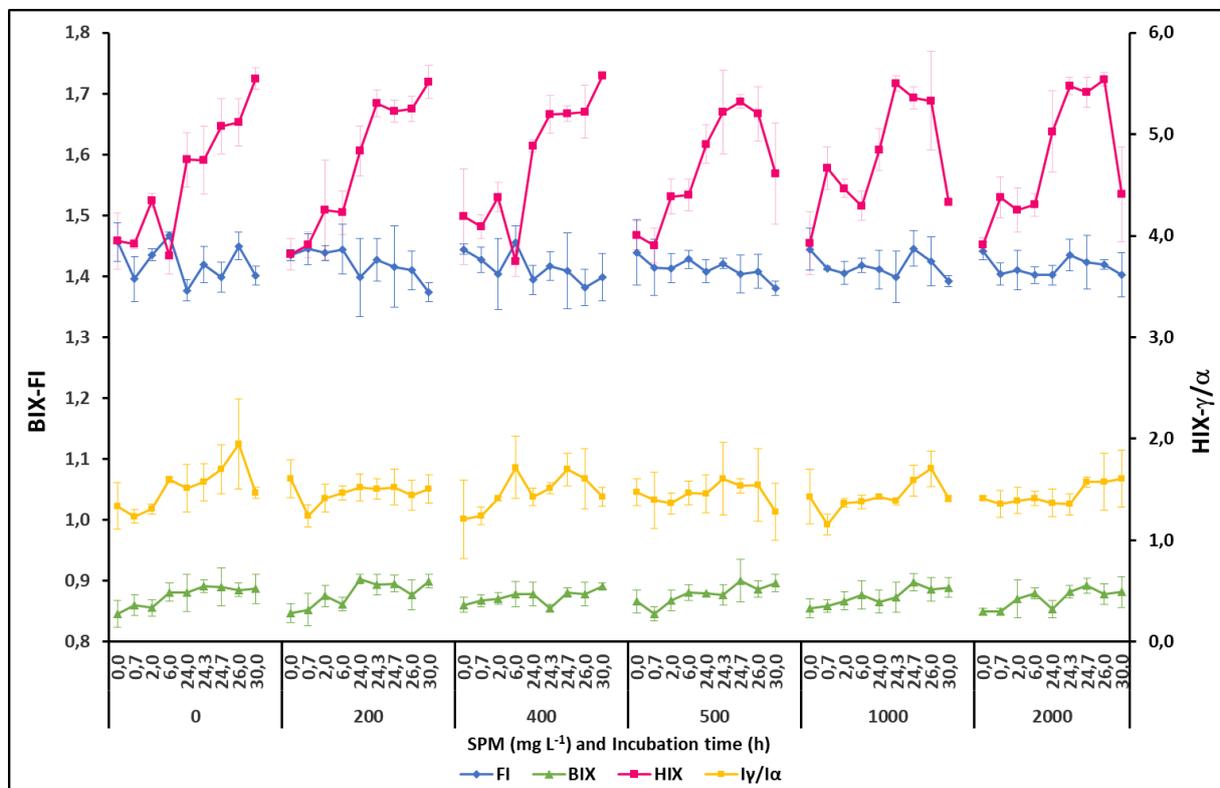
des valeurs de HIX observée en fin d'expérience pour les plus fortes concentrations en MES pourrait être liée à la production de petites molécules plus aliphatiques par dégradation ou encore lyse de cellules.

Les valeurs de BIX sont très élevées (> 0.85), en cohérence avec les faibles valeurs de HIX observées, représentant donc une production de MOD liée à une forte activité biologique qui augmente de façon légère et constante avec le temps à toutes les concentrations de MES, traduisant peut-être le bon état physiologique du phytoplancton. Il serait logique d'interpréter cette activité comme liée à la production primaire du phytoplancton (naturel et ajouté par les MES), mais les valeurs semblent indépendantes des concentrations en MES, contrairement à la concentration en Chla ANNEXE III Figure 3.200).

Les valeurs de FI, aux alentours de 1,4, indiquent un mélange de sources microbiennes et issues de végétaux terrestres. L'indice varie peu et diminue très légèrement au cours du temps d'incubation montrant que les MOD caractérisées par ces sources ne sont pas produites pendant l'expérience d'incubation.

Le rapport d'intensités de fluorescence γ/α baisse au début d'incubation et augmente après dans les contrôles et à 400 et 1000 mg L⁻¹ de MES, montrant des pics d'activité bactérienne, et reste assez stable pour les autres concentrations.

Les indices biogéochimiques étudiés évoluent donc au cours du temps d'une façon qui représente probablement plutôt un effet incubation, présent dans toutes les conditions MES, qu'un effet de concentration en MES.



ANNEXE III Figure 3.35 : Mesures des indices caractérisant la MOD (BIX, HIX, FI et γ/α) lors de la deuxième expérience d'incubation du phytoplancton en juin 2021.

3.2.2. Expériences avec le zooplancton

Les expériences avec du zooplancton se sont déroulées du 09 au 13 septembre 2020 et du 15 au 19 juin 2021. Elles ont suivi le même protocole que celles avec le phytoplancton, à l'exception des éléments détaillés ci-dessous.

Comme le zooplancton est trop peu abondant *in situ* pour permettre l'obtention de données statistiquement fiables sur les abondances en incubant des volumes raisonnables, des cultures du copépode *Eurytemora affinis* (ANNEXE III Figure 3.366.a), ont été utilisées pour ces expériences. Cette espèce, qui est dominante dans le méso-zooplancton entre le pont de Normandie et Val des Leux (Devreker et al., 2010; SARTRE, Tackx and Buffan-Dubau (coord) et al., 2023) est cultivée au laboratoire LOG en continu (ANNEXE III Figure 3.367.b). Comme les sites de clapages se trouvent dans le tronçon d'eau douce de l'estuaire de la Seine, les copépodes ont été préalablement acclimatés à de basses salinités. En effet, *Eurytemora affinis* tolère une large gamme de salinités mais au laboratoire elle est maintenue à une salinité moyenne de 15 PSU. Pour les besoins de cette expérimentation, la préparation de la culture dans une grande cuve de 1000 L a été réalisée dans les conditions standards de température 18°C et photopériode 12h : 12h lumière/obscurité. 3 à 4 semaines avant l'expérimentation, la culture a été acclimatée à une salinité de 2 PSU. La micro-algue *Rhodomonas salina* a été utilisée comme unique source de nourriture tous les deux jours en suivant nos anciens travaux (Souissi et al., 2016; Das et al., 2020; Das et al., 2023).



ANNEXE III Figure 3.36 : a) *Eurytemora affinis* femelle (Photo: A. Bernard), b) bassins de culture d' *E. affinis* et c) incubations de zooplancton au laboratoire LOG.

La gamme de concentrations de MES était : 0 (contrôle = eau naturelle de la Seine), 200, 400, 600 et 1000 mg L⁻¹. Une population d'environ 500 individus (majoritairement des adultes) d' *E. affinis* ont été introduits dans chacun des bécjers de 2 litres contenant les différentes concentrations de MES (ANNEXE III Figure 3.3636.c) et des échantillonnages ont eu lieu après 12, 24, 48 et 96 heures. A chaque échantillonnage, 3 bécjers répliques ont été utilisés.

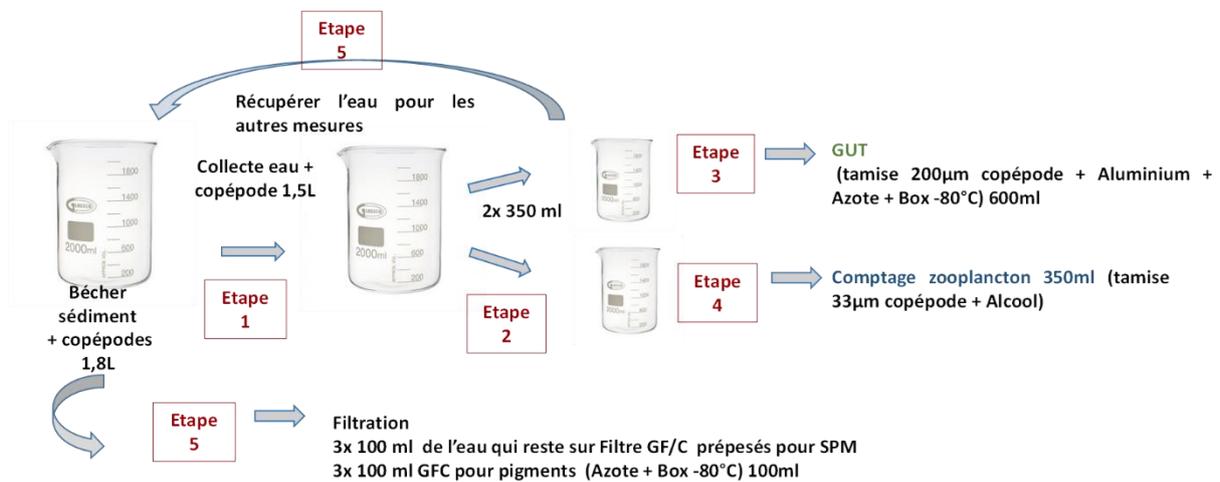
A chaque échantillonnage, des sous échantillons d'organismes et de MES étaient pris selon le schéma en ANNEXE III Figure 3.3737. Les copépodes collectés ont été comptés par

stade de développement, et la mortalité a pour chaque échantillonnage été calculée par rapport au contrôle au même moment d'échantillonnage. Pour le contrôle, la mortalité a été calculée par rapport à l'échantillonnage précédent.

Des copépodes ont également été collectés pour le dosage de leur contenu intestinal pigmentaire, qui représente leur activité de broutage sur le phytoplancton.

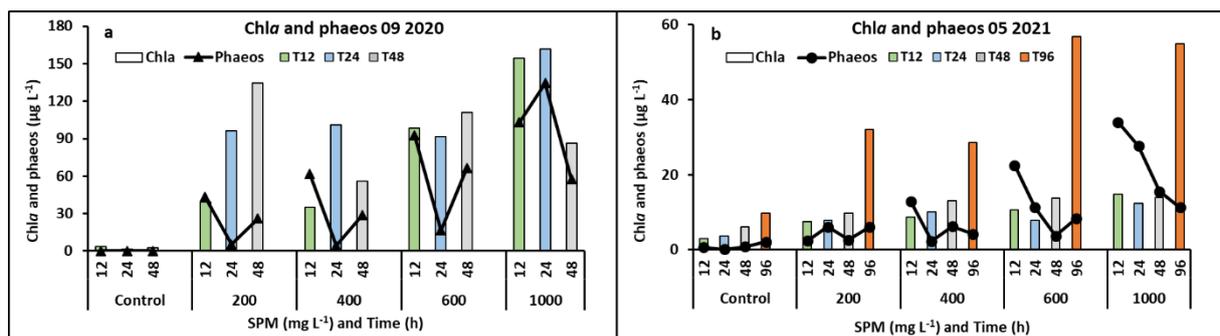
Des échantillons de MES ont été collectés pour la quantification de la concentration en MES et en pigments phytoplanctoniques. 30 mâles et 30 femelles *E. affinis* sont isolés séparément par échantillon, et leur contenu en pigments phytoplanctonique dosé par HPLC. Voir ANNEXE II du rapport SARTRE pour plus de détails sur la méthodologie.

Les données ont été analysées par ANOVA.



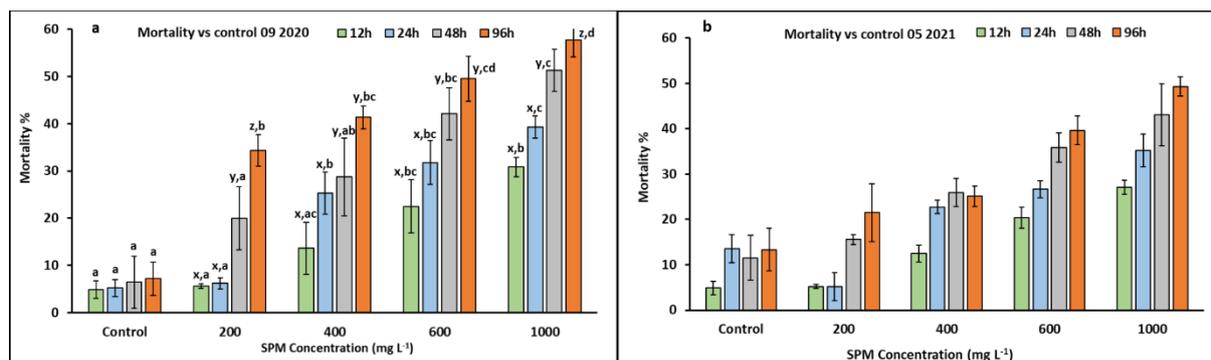
ANNEXE III Figure 3.37 : Schéma des échantillonnages et traitement des échantillons.

Le même phénomène d'enrichissement en phytoplancton a été observé pendant les expériences testant l'impact de différentes concentrations en sédiments en provenance du port sur le zooplancton. Plus on ajoute des sédiments, et plus la communauté phytoplanctonique est enrichie ANNEXE III Figure 3.3838).



ANNEXE III Figure 3.38 : Concentration en Chla et phéopigments lors des expériences d'incubation. a) septembre 2020 et b) mai 2021.

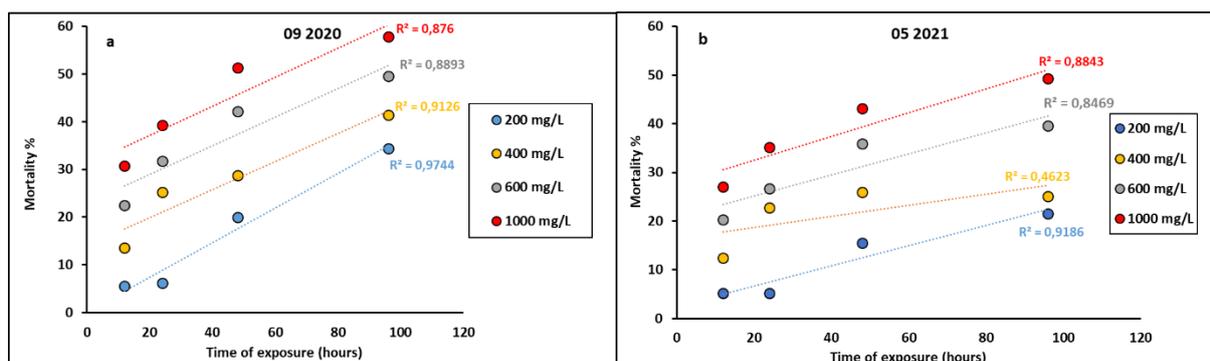
La mortalité du zooplancton dans les béciers avec sédiments n'est pas significativement différente de celle dans le contrôle uniquement à la concentration 200 mg L⁻¹ pendant 12 et 24h d'incubation. Au-delà de cette combinaison, la mortalité augmente avec la concentration en sédiments (ANOVA, p < 0.05) (ANNEXE III Figure 3.3939.a).



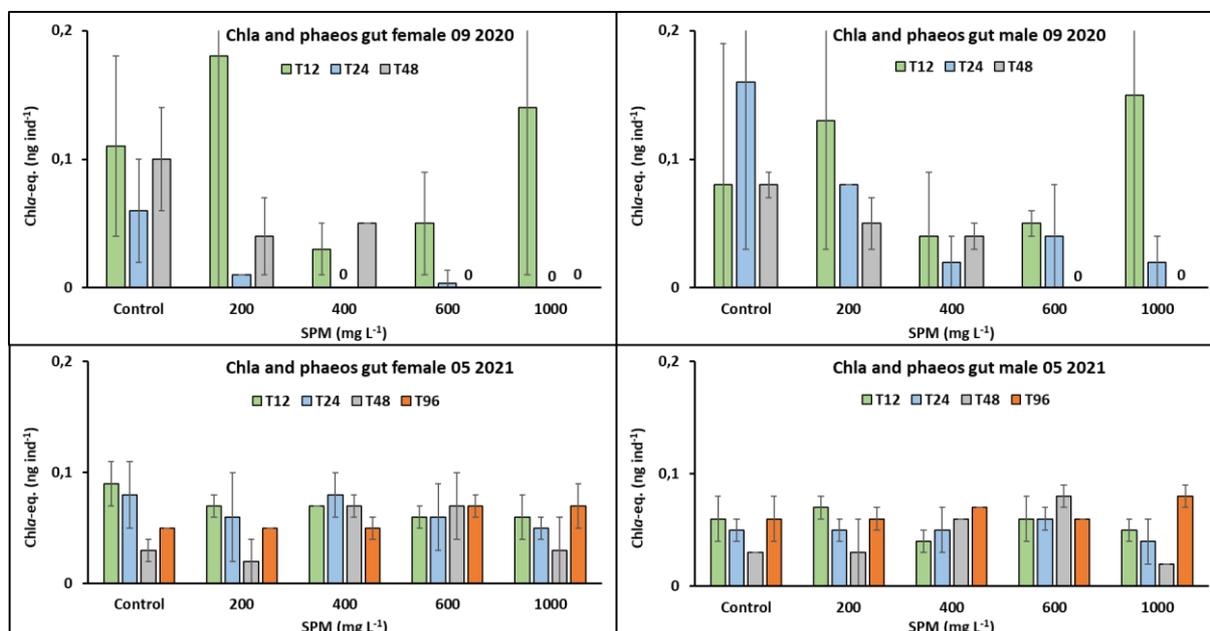
ANNEXE III Figure 3.39 : Pourcentage de mortalité par rapport au contrôle à de la population d'Eurytemora affinis lors des expériences d'incubation de zooplancton de a) septembre 2020 et b) mai 2021. Les barres verticales représentent les écarts types (N= 3). Les lettres indiquent les différences significatives entre les mortalités par rapport au temps d'incubation (x,y) et aus concentrations en MES (a,b,c).

Le deuxième test d'incubation de zooplancton réalisé en mai 2021 a donné des résultats très similaires au premier test. La mortalité augmente avec la concentration en MES et le temps d'incubation ANNEXE III Figure 3.3939.b). Dans les deux expériences, la mortalité est significativement supérieure à celle mesurée dans le contrôle (eau naturelle de la Seine) à toutes les concentrations au-dessus de 200 mg L⁻¹ et temps d'incubation plus long que 24 h (test t, p < 0.05).

Il faut remarquer que dans les deux expériences, une importante mortalité a aussi été observée dans les contrôles. Il est donc clair que l'incubation en elle-même représente un stress. Les ANNEXE III Figure 3.4040.a, b montrent bien que la mortalité augmente de façon linéaire avec le temps d'incubation et *grosso modo* de 10 % avec la concentration en MES.



ANNEXE III Figure 3.40 : Pourcentage de mortalité en fonction du temps d'exposition à différentes concentrations en MES pour les expériences d'incubation de septembre 2020 et mai 2021.



ANNEXE III Figure 3.41 : Contenus intestinaux en Chla et phéopigments des copépodes *E. affinis* femelles et mâles quantifiés pendant l'expérience d'incubation de zooplancton en septembre 2020 et mai 2021.

Pendant l'expérience de septembre 2020, les contenus intestinaux en Chla et phéopigments, qui représentent l'activité de nutrition de copépodes, montrent des valeurs assez variables. A partir de 600 mg L⁻¹ de MES incubés pendant 48 h on n'observe plus d'activité de nutrition, ni pour les femelles, ni pour les mâles ANNEXE III Figure 3.4141).

Pendant l'expérience de mai 2021 le signal pigmentaire est relativement stable dans toutes les conditions expérimentales ANNEXE III Figure 3.4141).

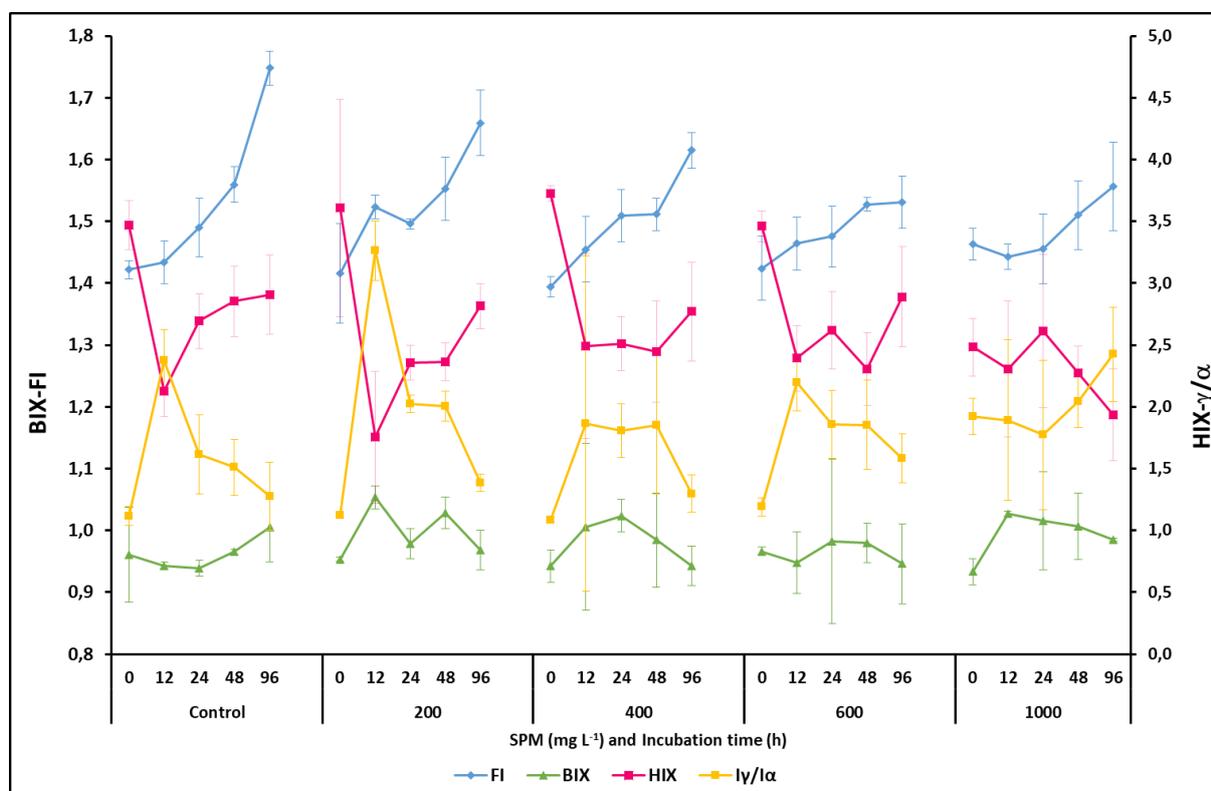
Pendant cette deuxième expérience, les indices biogéochimiques ont également été suivis ANNEXE III Figure 3.4242).

Les valeurs de l'indice FI augmentent de 1,4 à plus de 1,7 dans le contrôle et de façon moins forte lorsque la concentration en MES augmente. Ceci indique donc une activité microbienne aquatique qui se développe dans les contrôles, et qui est réduite par la présence des MES.

Le caractère aromatique de la MOD (HIX) diminue en début d'incubation à toutes les concentrations de MES, pour augmenter ensuite dans le contrôle et à 200 mg L⁻¹ de MES, et évoluer de façon plus fluctuante dans les incubations avec de plus fortes concentrations en MES. Les valeurs de HIX sont néanmoins extrêmement faibles, comprises entre 2 et 4, et leurs variations gouvernées par celles de la contribution du matériel protéique (γ/α) traduisant l'activité biologique et/ou bactérienne dans les expériences.

La contribution de MOD d'origine biologique (BIX) diminue dans le contrôle entre 0 et 24 h, puis une augmentation de cet indice est ensuite observée avec le temps comme pour l'indice FI, alors qu'il diminue généralement pour toutes les concentrations en MES après 24 h. A l'inverse, entre 0 et 12 h, l'indice BIX augmente dans les conditions avec MES en lien avec l'augmentation de γ/α et la diminution observée de HIX.

Bien que ces indices montrent des tendances claires pendant l'incubation, il est difficile de les relier à un effet de concentration en MES. Sachant que l'analyse fluorimétrique effectuée sur les échantillons a permis d'enregistrer plus de paramètres, une étude plus approfondie pourra être effectuée sur ces données à l'avenir.



ANNEXE III Figure 3.42 : Mesures des indices caractérisant la MOD (BIX, HIX, FI et γ/α) lors de la deuxième expérience d'incubation du zooplancton en mai 2021.

Que ce soit sur la mortalité ou sur la nutrition, on ne peut pas exclure que la mortalité créée par les MES par rapport aux contrôles n'est pas exclusivement ou essentiellement due aux particules en suspension telles quelles. Il est connu que les sédiments en estuaires sont contaminés par de multiples polluants comme les métaux lourds, les HAP, les plastiques (Das et al., 2023). Une analyse complète des contenus en produits potentiellement toxiques et de leur transfert vers le phytoplancton et le zooplancton est donc nécessaire avant de pouvoir complètement évaluer l'effet potentiel des clapages sur les communautés et le fonctionnement pélagiques.



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

En conclusion, pendant les suivis de clapage, des concentrations plus élevées en MES peuvent apparaître à travers plusieurs facteurs mesurés, surtout en profondeur. Ces effets restent de faible intensité, transitoires et disparaissent après une dizaine de minutes. Ces signaux sont difficilement interprétables à cause de l'interférence avec les marées et les activités de navigation. Les variations mesurées sont de courtes durées et souvent proches de la variabilité naturelle observée dans le milieu estuarien par les suivis haute-fréquence SYNAPSES.

Les expériences avec le phytoplancton ont montré la présence de concentrations élevées de phytoplancton productif dans les sédiments clapés, mais n'ont, justement à cause de la présence de ce phytoplancton en concentrations plus importantes que le phytoplancton naturel de la Seine, pas permis de détecter clairement un effet des MES sur les communautés phytoplanctoniques en Seine.

Les expériences avec du zooplancton ont montré que la mortalité des copépodes utilisés (*Eurytemora affinis*) augmente avec le temps d'incubation et la concentration en MES. Il n'est à l'instant pas possible de distinguer si cette mortalité est due aux concentrations en MES telles quelles ou à une toxicité des sédiments clapés. Le seuil de tolérance de 200 mg L-1 pendant 24 heures, déduit de ces expériences, n'a pas été dépassé pendant les clapages suivis dans le cadre du projet.

En résumé, aux échelles spatio-temporelles des mesures réalisées il ne semble pas possible d'identifier et de quantifier les effets des immersions prises individuellement en raison de la complexité et des variabilités des processus naturels et anthropiques considérées. En effet, ces mesures ne mettent pas en évidence un signal explicitement et directement corrélable à l'immersion des sédiments.

Par ailleurs, il est à noter que les travaux réalisés ne permettent pas de se prononcer sur les effets à moyen et long terme d'immersions récurrentes sur l'environnement estuarien pélagique et benthique.

Malgré des variations des concentrations en MES observés, les travaux réalisés mettent en évidence la complexité de réaliser un suivi permettant de discerner les variations des concentrations en MES induites par les clapages dans un environnement aussi dynamique que celui de l'estuaire de la Seine. Le protocole mis en oeuvre pourrait être discuté et travaillé pour faire face à ces difficultés techniques et améliorer l'identification des effets directs des immersions sur la qualité de l'eau. Il serait par exemple possible de prendre en compte, les variabilités naturelles mesurées via une station de mesure HF installée à proximité du site d'immersion, mais également les caractéristiques des sédiments prélevées sur les sites de dragage et leurs caractéristiques après le transport dans la drague.

Au regard des résultats acquis, il semble prioritaire de développer une stratégie d'évaluation des effets de cette pratique récurrente à moyen- long terme sur le physiotope et par conséquent sur le fonctionnement écologique du secteur concerné. Les suivis spécifiques devraient être mis en regard des suivis pérennes sur l'estuaire (ex : SYNAPSES) pour tenter d'identifier le poids de cette pratique dans les évolutions du fonctionnement de l'estuaire.

L'estuaire de la Seine fonctionne en effet comme un système intégré, avec des échanges biogéochimiques continus entre l'amont et l'aval, entre le lit mineur et le lit majeur mais surtout



entre le compartiment pélagique et benthique. L'évaluation des effets potentiels à court ou long terme des clapages en estuaire nécessitera donc une approche intégrée, multidisciplinaire, avec échange fréquent des résultats entre les différentes disciplines.

Une connaissance de la composition des sédiments clapés permettra aussi d'évaluer si des effets mesurés dans des expériences en laboratoire sont dus à l'augmentation de la concentration en MES ou à des substances associées.

Un tel suivi interdisciplinaire régulier des sédiments en provenance des sites de dragage pourrait inclure les analyses suivantes :

- granulométrie
- composition des matières particulaires organiques et inorganiques, caractérisation des molécules (ex : phytostérols ,brassicastérol)
- composition des matières dissoutes
- phytoplancton : signature spectrale in situ, diversité cytométrique (analyse biomasse en composition par HPLC), production primaire, état physiologique
- bactéries, micro-faune (boucle microbienne, ex : ciliés..)
- microphytobenthos, meiobenthos, macrobenthos
- contaminants (liste exigée par l'étude d'impact).
- potentiel écotoxique (bioessais).

Etant donné les importantes communautés phytoplanctoniques détectées lors des premiers suivis effectués, **il serait intéressant d'étudier si des enrichissements occasionnels en phytoplancton par les clapages ne sont pas à la base de réseaux trophiques sur les sites de clapage**. Des communautés benthiques assez abondantes et riches au niveau de la zone impactée par les clapages, mais incluant plusieurs espèces introduites ont effectivement été rapportées (Port de Rouen and HAROPA, 2021). Ces inventaires pourront être mis en relation avec les données obtenues sur les caractéristiques des sédiments clapés

Des expériences spécifiques en laboratoire pourront élucider certaines questions issues des suivis.



LISTE DES ILLUSTRATIONS

- ANNEXE III Figure 2.1 : Carte de l'estuaire de la Seine avec localisation des stations des campagnes communes du projet SARTRE ainsi que des sites de clapage et de dragage concernés durant cette étude. 12
- ANNEXE III Figure 2.2 : Schéma du suivi in situ des clapages. Zone brune : nuage de MES issu du clapage. Monod : bateau de suivi (M2C). L'ancre flottante permet de suivre la masse d'eau utilisée pour la mesure ; elle est mise en place en fin de clapage lors des campagnes 1 et 2, puis en début de clapage lors des suivantes. Lors des clapages 3 à 6, un bateau témoin est positionné en point fixe à l'avant de la drague..... 12
- ANNEXE III Figure 2.3 : Principe des suivis de concentration en MES lors de clapage (a) et des incubations de zooplancton en laboratoire (b et c). Exemple théorique des effets d'une gamme de concentration en MES sur l'activité de nutrition du zooplancton..... 13
- ANNEXE III Figure 3.1 : Températures en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.16
- ANNEXE III Figure 3.2 : Conductivité en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.17
- ANNEXE III Figure 3.3 : Concentration en oxygène en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. 18
- ANNEXE III Figure 3.4 : Comparaison entre la température du bateau de suivi et celle du bateau témoin..... 19
- ANNEXE III Figure 3.5 : Comparaison entre la conductivité du bateau de suivi et celle du bateau témoin. 20
- ANNEXE III Figure 3.6 : Comparaison entre la concentration en oxygène du bateau de suivi et celle du bateau témoin. 20
- ANNEXE III Figure 3.7 : Concentration des MES, (Suspended Particulate Matter, SPM) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnage de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique. 22
- ANNEXE III Figure 3.8 : Comparaison entre la concentration en SPM du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative entre les deux concentrations (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin. 23
- ANNEXE III Figure 3.9 : Photo aérienne de la surface de l'eau de l'estuaire de la Seine à la Pâturage-aux-Rats montrant des veines de différentes turbidité. Source : Google Earth..... 23
- ANNEXE III Figure 3.10 : Pourcentage des MOP (Particulate Organic Matter, POM) par rapport aux MES en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les triangles représentent le mois de

septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.	24
ANNEXE III Figure 3.11 : Comparaison entre la concentration en MOP du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative entre les deux concentrations (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.	25
ANNEXE III Figure 3.12 : Variations de la composition isotopique en carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}$, barres) des matières organiques particulières et de l'indice BIT (triangles et ligne) en surface et au fond de la colonne d'eau lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.....	27
ANNEXE III Figure 3.13 : Variations du pourcentage de phytostérols (composés provenant des végétaux terrestres, barres) et de brassicastérol (composé d'origine algale, ligne) ; en surface et au fond de la colonne d'eau lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.....	28
ANNEXE III Figure 3.14 : HIX (indice d'humification) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	30
ANNEXE III Figure 3.15 : BIX (indice d'activité biologique) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	32
ANNEXE III Figure 3.16 : Comparaison des indices HIX et BIX calculés pour les échantillons prélevés à partir du bateau de suivi et du bateau témoin pour les clapages 5, 6. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative avec le témoin (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	33
Annexe III Figure 3.17 : FI (indicateur de matériel issu de végétaux terrestres terrestres ou d'origine microbienne) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	34
ANNEXE III Figure 3.18 : γ/α (indice d'activité bactérienne) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N= 3). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les	



barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	35
ANNEXE III Figure 3.19 : Comparaison des indices FI et γ/α calculés pour les échantillons prélevés à partir du bateau de suivi et du bateau témoin pour les clapages 5, 6. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin. Les losanges bleus représentent une différence significative avec le témoin (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.....	36
ANNEXE III Figure 3.20 : Concentration en Chla en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. A noter que les concentrations pendant les deux premiers clapages sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.	37
ANNEXE III Figure 3.21 : Concentration en diatomées (Diatoms) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. A noter que les concentrations pendant les deux premiers clapage sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin. Les différences significatives par rapport à T-30 sont représentées en bleu et celles par rapport à T-10 en noir (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas, qui sont parfois trop faibles pour être visibles sur le graphique.	38
ANNEXE III Figure 3.22 : Comparaison entre la concentration en Chla et en pigments marqueurs des diatomées du bateau de suivi et celle du bateau témoin. Les losanges noirs représentent une différence significative entre les deux concentrations (t-test ou wilcox.test < 0,05 ; N=3). Les barres verticales représentent les écarts types entre 3 réplicas.....	39
ANNEXE III Figure 3.23 : Indice physiologique (Fv/Fm) du phytoplancton et production primaire maximale (GOPIIm) en surface lors des différents temps d'échantillonnages de tous les clapages. A noter que les productions primaires pendant les deux premiers clapage sont plus élevées (axe gauche) que pendant les autres clapages (axe droite). Les triangles représentent le mois de septembre et les ronds le mois de juin.	40
ANNEXE III Figure 3.24 : Indice physiologique (Fv/fFm) et production primaire maximale (GOPIIm) en surface lors des différents temps d'échantillonnages des clapages 5 et 6. Les triangles représentent le mois de septembre.	41
ANNEXE III Figure 3.25 : Comparaison entre l'indice physiologique (Fv/Fmc) et la production primaire maximale (GOPIIm) du bateau de suivi et celui du bateau témoin. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.	42
ANNEXE III Figure 3.26 : Productivité maximale du phytoplancton (GOPIIm/Chla) en surface et au fond lors des différents temps d'échantillonnages des clapages. Les triangles représentent le mois de septembre.	43
ANNEXE III Figure 3.27 : Comparaison de la productivité maximale du phytoplancton sur le bateau de suivi et sur le bateau témoin. La ligne orange indique la tendance temporelle des valeurs sur le bateau témoin.	44
ANNEXE III Figure 3.28 : Protocole des expériences avec du phytoplancton. Voir texte pour plus d'explication. .	45



ANNEXE III Figure 3.29 : Concentration en MES mesurée en poids sec versus concentration préparée à base de poids frais dans les expériences en laboratoire. a) Expérience de septembre 2020, b) Expérience de juin 2021.....	45
ANNEXE III Figure 3.30 : Expérience de septembre 2020 : a) Relation entre l'ajout des sédiments de clapage et la concentration en Chla mesurée lors des expérimentations, b) Concentration en Chla, c) Fv/Fm : Rendement quantique maximum du PSII, mesure de l'état physiologique des cellules phytoplanctoniques, d) Capacité photosynthétique maximale convertie en O ₂ : GOPII max. Les paramètres photosynthétiques mesurés à l'aide d'un LabSTAF (Chelsea Technology).....	46
ANNEXE III Figure 3.31 : Expérience de juin 2021 : a) Relation entre l'ajout des sédiments de clapage et la concentration en Chla mesurée lors des expérimentations, b) Concentration en Chla, c) Fv/Fm : Rendement quantique maximum du PSII, mesure de l'état physiologique des cellules phytoplanctoniques, d) Capacité photosynthétique maximale convertie en O ₂ : GOPII max. Les paramètres photosynthétiques mesurés à l'aide d'un LabSTAF (Chelsea Technology).....	47
ANNEXE III Figure 3.32 : Concentration en silice dissoute dans l'eau au cours de la première incubation de phytoplancton. a) Expérience de septembre 2020 (triangles), b) Expérience de juin 2021 (ronds).....	47
ANNEXE III Figure 3.33 : Évolution de la communauté phytoplanctonique (Cytosens) en fonction de la quantité de sédiment ajoutée et du temps d'incubation. Expérience de septembre 2020.....	48
ANNEXE III Figure 3.34 : Photo microscopique des sédiments pris sur le site de dragage pour la première expérience d'incubation, montrant la présence de diatomées centriques (formes circulaires brunes).....	49
ANNEXE III Figure 3.35 : Mesures des indices caractérisant la MOD (BIX, HIX, FI et γ/α) lors de la deuxième expérience d'incubation du phytoplancton en juin 2021.....	51
ANNEXE III Figure 3.36 : a) Eurytemora affinis femelle (Photo: A. Bernard), b) bassins de culture d' E. affinis et c) incubations de zooplancton au laboratoire LOG.....	51
ANNEXE III Figure 3.37 : Schéma des échantillonnages et traitement des échantillons.....	52
ANNEXE III Figure 3.38 : Concentration en Chla et phéopigments lors des expériences d'incubation. a) septembre 2020 et b) mai 2021.....	53
ANNEXE III Figure 3.39 : Pourcentage de mortalité par rapport au contrôle à de la population d'Eurytemora affinis lors des expériences d'incubation de zooplancton de a) septembre 2020 et b) mai 2021. Les barres verticales représentent les écarts types (N= 3). Les lettres indiquent les différences significatives entre les mortalités par rapport au temps d'incubation (x,y) et aux concentrations en MES (a,b,c).....	53
ANNEXE III Figure 3.40 : Pourcentage de mortalité en fonction du temps d'exposition à différentes concentrations en MES pour les expériences d'incubation de septembre 2020 et mai 2021.....	54
ANNEXE III Figure 3.41 : Contenus intestinaux en Chla et phéopigments des copépodes E. affinis femelles et mâles quantifiés pendant l'expérience d'incubation de zooplancton en septembre 2020 et mai 2021.....	54
ANNEXE III Figure 3.42 : Mesures des indices caractérisant la MOD (BIX, HIX, FI et γ/α) lors de la deuxième expérience d'incubation du zooplancton en mai 2021.....	55



GLOSSAIRE

Terme et abréviation en français	Terme et abréviation en anglais	Définition
Matières En Suspension (MES)	Suspended Particulate Matter (SPM)	Matières de taille > 0.2 (ou 0.7) μm en suspension dans l'eau.
Matières Inorganiques Particulaires (MIP)	Particulate Inorganic Matter (PIM)	Fraction inorganique des MES.
Matières Organiques Dissoutes (MOD)	Dissolved Organic Matter (DOM)	Matières organiques de taille < 0.2 μm en solution dans l'eau.
Matières Organiques Particulaires (MOP)	Particulate Organic Matter (POM)	Fraction organique des MES.

BIBLIOGRAPHIE

- Boutin R** (1999) Amélioration des connaissances sur le comportement des rejets en mer de produits de dragage de type vase. Phénomènes à court terme et dans le champ proche. Thèse INSA Lyon
- Cory RM, Miller MP, McKnight DM, Guerard JJ, Miller PL** (2010) Effect of instrument-specific response on the analysis of fulvic acid fluorescence spectra: Evaluating instrument-specific response. *Limnol Oceanogr Methods* **8**: 67–78
- Das S, Ouddane B, Hwang J, Souissi S** (2020) Intergenerational effects of resuspended sediment and trace metal mixtures on life cycle traits of a pelagic copepod. *Environ Pollut* **267**: 115460
- Das S, Souissi A, Ouddane B, Hwang J, Souissi S** (2023) Trace metals exposure in three different coastal compartments show specific morphological and reproductive traits across generations in a sentinel copepod. *Sci Total Environ* **859**: 160378
- Devreker D, Souissi S, Molinero JC, Beyrend-Dur D, Gomez F, Forget-Leray J** (2010) Tidal and annual variability of the population structure of *Eurytemora affinis* in the middle part of the Seine Estuary during 2005. *Estuar Coast Shelf Sci* **89**: 245–255
- Ejarque E, Freixa A, Vazquez E, Guarch A, Amalfitano S, Fazi S, Romaníe AM, Butturini A** (2017) Quality and reactivity of dissolved organic matter in a Mediterranean river across hydrological and spatial gradients. *Sci Total Environ* **599–600**: 1802–1812
- Hannouti A** (2003) Suspended particulate matter in the Scheldt estuary: sedimentation and spatio temporal patterns. Thèse VUB Bruxelles
- Huguet A, Vacher L, Relexans S, Saubusse S, Froidefond, J.M., Parlanti E** (2009) Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org Geochem* **40**: 706–719
- McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK, Doran P. T, Kulbe T, Andersen DT** (2001) Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol Oceanogr* **46**: 38–48
- Middelburg JJ, Herman PMJ** (2007) Organic matter processing in tidal estuaries. *Mar Chem* **106**: 127–147
- Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, Lamotte M** (2000) Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. *Org Geochem* **31**: 1765–1781
- Port de Rouen, HAROPA** (2021) Dragage d'entretien de l'estuaire entre Rouen et Vieux port : Bilan annuel expérimentation d'immersion Pâturage aux rats.
- Souissi A, Souissi S, Hansen B** (2016) Physiological improvement in the copepod *Eurytemora affinis* through thermal and multi-generational selection. *Aquac Res* **47**: 2227–2242
- Tackx M (coord), Buffan-Dubau E (coord), Azémar F, Bernard A, Bou E, Chauvel N, Copard Y, Claquin P, Dauvin JC, Huguet A, et al** (2023) Seine-Amont : Réseaux Trophiques Estuariens (SARTRE).
- Vacher L** (2004) Étude par fluorescence des propriétés de la matière organique dissoute dans les systèmes estuariens: cas des estuaires de la Gironde et de la Seine. Bordeaux 1
- Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, Steinweg B, Saccomandi F** (1999) Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* **38**: 45–50

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

GIP Seine-Aval
Hangar C - Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Tackx M.. & Buffan-Dubau E. (Coord.), 2023, SARTRE : Seine Amont : Réseaux Trophiques Estuariens – Annexes 3 : Etude de l'effet des clapages en Seine , Annexe de rapport du programme Seine-Aval 6, 64 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

