



**LSCE**

LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT  
& DE L'ENVIRONNEMENT



UNION DES ARMATEURS À LA PÊCHE DE FRANCE

## **CarboChalu : Impact du chalutage de fond sur le cycle du carbone sur les plateaux continentaux**

**Porteur du projet : Union des Armateurs à la Pêche de France (UAPF)**

**Référents UAPF : Marc GHIGLIA & Jérôme JOURDAIN**

**Partenaire technique : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)**

**Contributeurs LSCE : Christophe RABOUILLE, Bruno LANSARD, Eric VIOLLIER et Stanley NMOR**

## **Objectifs du projet :**

Établir une synthèse des connaissances scientifiques à date sur deux sujets très proches :

- (i) sur les mécanismes qui affectent le devenir du carbone organique dans les sédiments qu'on appelle diagenèse précoce et qui mène au recyclage et à l'enfouissement du carbone organique, ainsi que le devenir dans la colonne d'eau du CO<sub>2</sub> produit lors de ce recyclage
- (ii) compte tenu de la nouveauté de l'émergence de la problématique, sur l'impact du chalutage de fond sur les capacités de recyclage et d'enfouissement du carbone dans les sédiments ainsi que le potentiel de recyclage dans les particules remises en suspension. Ces mécanismes sont intimement liés.

Sur la base de cette synthèse :

- (i) permettre pédagogiquement aux professionnels de s'approprier ces résultats (UAPF et LSCE).
- (ii) Établir un premier bilan prospectif des enseignements à tirer de ces connaissances, en termes de gestion à venir des activités de chalutages et dragage (UAPF)

## **Table des matières**

1. Synthèse des connaissances scientifiques sur les mécanismes qui affectent le devenir du carbone organique dans les sédiments
2. Etat de l'art sur l'impact du chalutage sur le carbone organique dans les sédiments côtiers
3. Pistes possibles de quantification de l'effet du chalutage sur le recyclage et l'enfouissement du carbone, les incertitudes associées d'après les publications récentes.

### **Acronymes :** *(en anglais)*

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

CID : Carbone inorganique dissous (*dissolved inorganic carbon, DIC*)

CIP : Carbone inorganique particulaire (*particulate inorganic carbon, PIC*)

COD : Carbone organique dissous (*dissolved organic carbon, DOC*)

COP : Carbone organique particulaire (*particulate organic carbon, POC*)

MO : Matière organique (*organic matter, OM*)

µm : micromètre, c'est-à-dire 1 millième de mm (mille fois moins qu'un mm)

GtC : Giga tonne de carbone, soit un milliard de tonnes de carbone

Chl-*a* : Chlorophylle a

### **Glossaire :**

Aérobie : caractérise des fonctions chez les êtres vivants dépendantes de la présence d'oxygène.

Anoxique : milieu aquatique ne contenant pas d'oxygène.

Carbone inorganique (aussi appelé carbonate) : carbone dans les minéraux (le carbone inorganique particulaire - CIP), par exemple : particules de carbonate de calcium, calcite et aragonite sont les principales formes minéralogiques, ou en solution dans l'eau mer sous forme de CO<sub>2</sub> dissous (le carbone inorganique dissous - CID).

Carbone organique : carbone dans la matière organique particulaire ou dissoute.

Chlorophylle *a* (Chl-*a*) : Pigment vert présent chez tous les végétaux car il est indispensable pour la photosynthèse. Dans l'océan, la chlorophylle *a* est généralement mesurée par fluorescence et elle sert d'indicateur pour évaluer la concentration de matière organique fraîchement photosynthétisée par les communautés phytoplanctoniques.

Dissous : élément en solution dans l'eau de mer dont la taille est inférieure à 0,45 µm.

Eau interstitielle/porale: eau contenue dans les interstices ou pores du sédiment, donc entre les grains de sédiment solide. Cette eau porale représente souvent 60-80% du volume des sédiments humides et est donc un composant essentiel du sédiment.

Granulométrie : répartition des grains qui composent le sédiment en fonction de leur classe de taille. Les sédiments sableux sont généralement constitués de grains dont la taille est supérieure à 50 µm, les limons sont compris entre 50 à 2 µm et les sédiments vaseux ont une taille inférieure à 2 µm.

Les sels minéraux (ou éléments nutritifs) sont des éléments chimiques qui entrent dans la composition des organismes et qui sont présents dans l'alimentation animale et végétale. Ils se présentent sous forme ionique (cations ou anions), comme le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le chlore ( $\text{Cl}^-$ ), mais aussi le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) ou le phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Ces substances sont indispensables aux organismes.

Macrofaune : Ensemble des animaux benthiques dont la taille est supérieure à 1 millimètre et qui est généralement collecté à travers un tamis. Taille suffisante pour être facilement distingué à l'œil nu. Par opposition, la microfaune regroupe l'ensemble des animaux benthiques dont la taille est inférieure à 1 mm et dont l'identification nécessite généralement l'utilisation d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Matière organique : Matière à base de carbone fabriquée par les êtres vivants (végétaux, animaux, champignons et autres décomposeurs dont les micro-organismes). La matière organique est produite par la photosynthèse pour les organismes dits autotrophes (végétaux) ou par l'alimentation pour les organismes dits hétérotrophes (animaux, bactéries...). Par exemple, elle est représentée par les différentes parties d'une plante chez les végétaux, par les tissus mous, les muscles, et les organes chez les animaux.

Minéralisation : dégradation de la matière organique particulaire et dissoute (COP et COD) en carbone inorganique dissous (CID).

Minéralisation aérobie (ou oxygène) : processus de dégradation de la matière organique dépendant de l'oxygène. Cette respiration cellulaire consomme du dioxygène ( $\text{O}_2$ ), produit de l'énergie pour les êtres vivants et du carbone inorganique dissous (CID). La minéralisation permet le retour du carbone et des autres éléments nutritifs (azote, phosphore...) sous forme inorganique et donc à nouveau utilisables par les végétaux.

Minéralisation anaérobie (ou anoxique) : Certains micro-organismes, comme certaines bactéries, sont capables de respirer en utilisant d'autres composés que l'oxygène. La minéralisation anaérobie dégrade la matière organique, produit du carbone inorganique dissous (CID) et parfois du méthane ( $\text{CH}_4$ ).

Oxique : milieu aquatique contenant de l'oxygène en quantité abondante.

Particulaire : matière sous forme solide dont la taille est supérieure à  $0,45 \mu\text{m}$ .

Photosynthèse : fixation de  $\text{CO}_2$  par les végétaux (dont le phytoplancton) avec l'aide de l'énergie issue de la lumière du Soleil. Cette synthèse permet aux végétaux de fixer des sels minéraux dissous (nutriments) et de produire des tissus organiques qui seront à la base de la chaîne alimentaire marine.

Plancton/Phytoplancton : il s'agit de microalgues végétales qui se développent en suspension dans l'océan. Ce grand groupe recouvre essentiellement les diatomées (squelette siliceux), les coccolithophoridés (squelette calcaire), les dinoflagellés et les

cyanobactéries.

Respiration cellulaire : C'est l'ensemble des processus chimiques du métabolisme cellulaire qui permettent de convertir l'énergie chimique contenue dans les aliments. Ces processus impliquent une succession de réactions chimiques formant des voies métaboliques qui appartiennent au catabolisme, c'est-à-dire qu'elles consistent à dégrader les grosses molécules biologiques en molécules plus petites, ce qui libère de l'énergie ainsi qu'un certain nombre de déchets.

Zone aphotique : par opposition à la zone photique, c'est la couche profonde de l'océan où l'énergie lumineuse n'est jamais suffisante pour que la photosynthèse s'y produise. L'obscurité y est totale et la température constamment basse. Elle débute généralement vers 200 m de profondeur environ et s'étend jusqu'au fond de l'océan.

Zone photique : aussi nommée zone euphotique ou zone épipelagique, est la couche supérieure de l'océan qui est exposée à une lumière suffisante pour que la photosynthèse s'y produise. La profondeur de la zone photique peut être grandement affectée par la turbidité et la latitude. Elle est au maximum de 200 m de profondeur environ.

# 1. Synthèse des connaissances scientifiques sur les mécanismes qui affectent le devenir du carbone organique dans les sédiments

Les eaux côtières correspondent à la partie des mers et océans bordant le littoral. Elles sont en position d'interface entre les eaux de transition - estuaires, deltas et lagunes - et les eaux océaniques du large. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons le terme de « zone côtière et plateau continental » qui sera défini comme la zone allant du littoral jusqu'à 400-600 m de profondeur, zone principale d'accès aux chaluts des différents bateaux de la pêche côtière et hauturière. A noter qu'en océanographie, le terme « océan côtier » englobe les zones littorales et l'ensemble du plateau continental jusqu'à environ 200 m de profondeur. La partie haute du talus continental (200-600m) est prise en compte dans cette étude. Elle fait partie des marges océaniques mais pas de l'océan côtier au sens strict océanographique (Fig. 1).

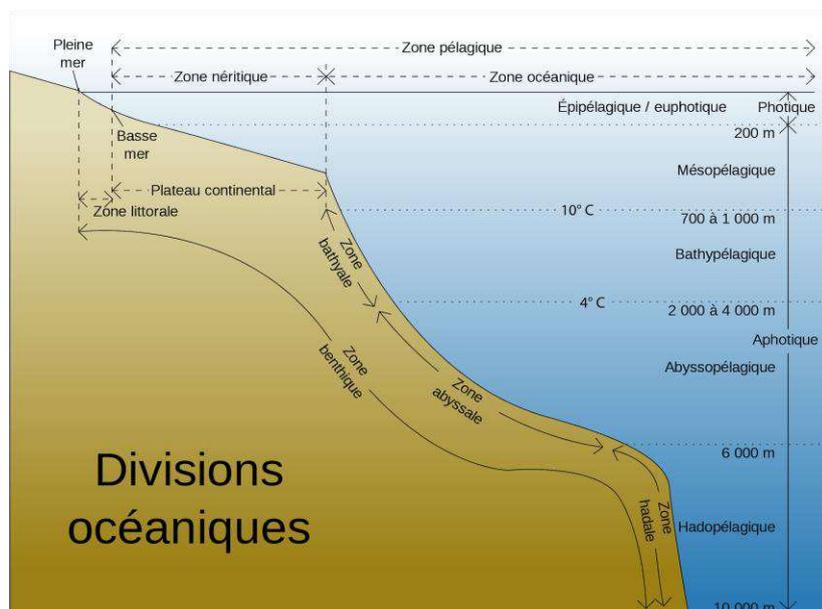


Figure 1 : Représentation des divisions océaniques en fonction de la bathymétrie

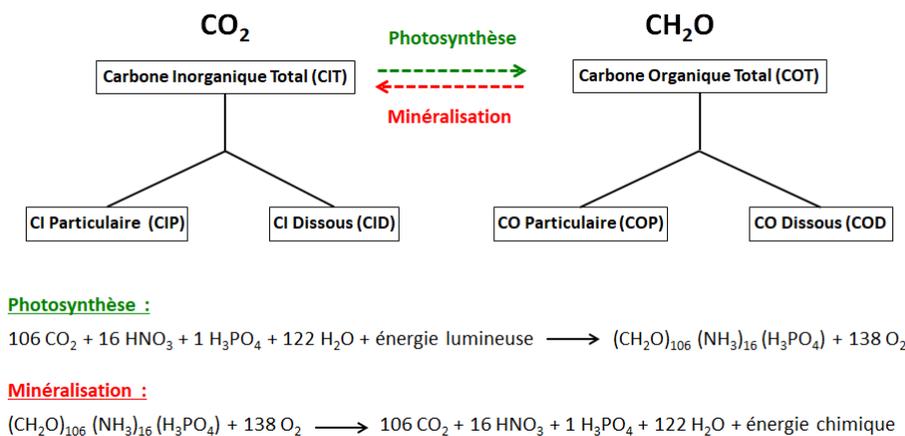
## 1.1 Différents stocks et flux de carbone (organique / inorganique) dans différentes phases (dissoute / particulaire)

Les organismes photosynthétiques sont à la base des écosystèmes marins. Des algues souvent microscopiques utilisent l'énergie du Soleil pour transformer le CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer en carbone organique qui entre dans la constitution de toutes les molécules organiques (glucides, lipides, protéines...). La photosynthèse est souvent résumée par la réaction suivante (CH<sub>2</sub>O est une écriture simplifiée de la matière organique) :



L'énergie lumineuse étant indispensable au phytoplancton, la photosynthèse se produit uniquement à la surface de l'océan, dans la couche photique qui reçoit de la lumière. D'autres éléments que le carbone sont indispensables à la constitution des êtres vivants, comme l'azote fourni par le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et le phosphore apporté par le phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

Dans l'océan, le carbone (C) existe sous 2 formes : le carbone inorganique (minéral) et le carbone organique (lié à des processus de production biologique de matière organique). Ces deux grands stocks de carbone sont présents dans deux phases : dissoute ( $< 0,45 \mu\text{m}$ ) et particulaire ( $> 0,45 \mu\text{m}$ ). Les processus biologiques de photosynthèse et de minéralisation permettent de relier le cycle du carbone organique au cycle du carbone inorganique (Fig. 2).

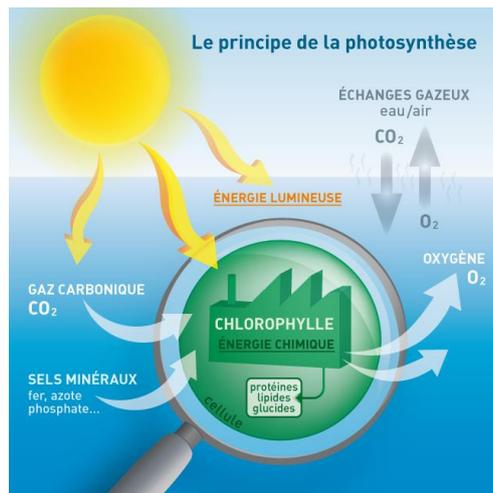


**Figure 2 :** Les différents stocks et flux de carbone. La photosynthèse permet de fixer du  $\text{CO}_2$  et des sels minéraux et de produire de la matière organique (représentée par  $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)$ ) et du dioxygène. A l'inverse, la respiration cellulaire dégrade la matière organique, consomme de l' $\text{O}_2$ , produit du  $\text{CO}_2$  et régénère les sels minéraux.

Dans les zones côtières et les plateaux continentaux, le carbone inorganique provient de l'érosion des continents, des apports de particules minérales (sables, vases...) par les fleuves, des dépôts de poussières atmosphériques et des échanges de  $\text{CO}_2$  avec l'atmosphère. Le carbone organique présent dans l'océan peut provenir des continents (carbone terrigène ou continental) car il est produit par l'ensemble des organismes vivants sur les continents (bactéries, planctons, végétaux et animaux). Le carbone organique peut également être produit directement dans l'océan par les communautés phytoplanctoniques (micro-algues), les macro-algues (les laminaires par exemple), les phanérogames marines (les herbiers marins comme les zostères ou les posidonies) et l'ensemble du réseau trophique océanique (bactéries, zooplanctons, vers, bivalves, gastéropodes, crustacés, poissons, mammifères marins...).

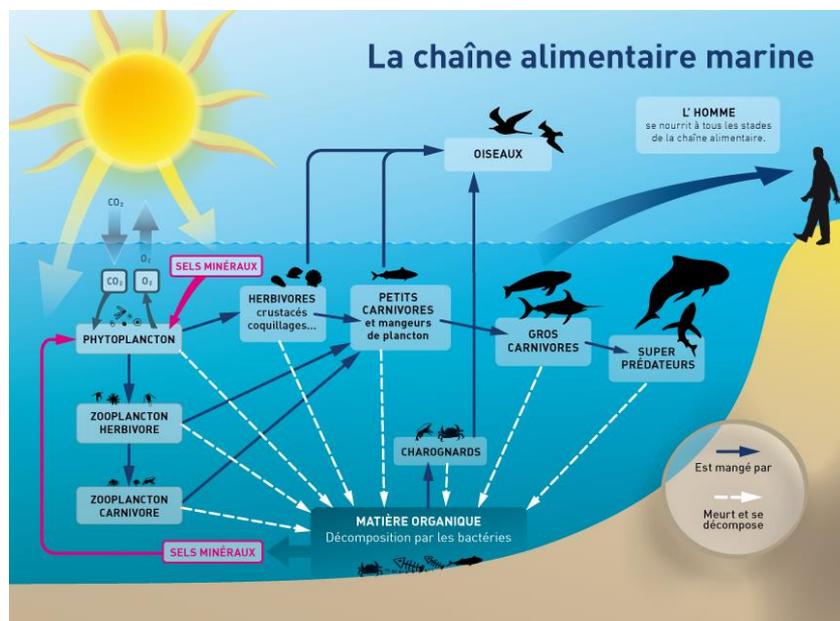
Grâce à la photosynthèse, les cellules phytoplanctoniques constituent le premier maillon de la chaîne alimentaire marine (Fig. 3). Cette synthèse biologique permet de capter du  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau de mer et de l'incorporer dans les micro-algues sous la forme de carbone organique particulaire. Pour réaliser la photosynthèse, les végétaux océaniques ont besoin d'énergie lumineuse et d'éléments nutritifs (azote, phosphore, fer par exemple) qui sont

dissous dans l'eau de mer.



**Figure 2 :** Représentation simplifiée de la photosynthèse qui permet aux végétaux de transformer du CO<sub>2</sub> (CID) en carbone organique particulaire (COP), en utilisant des sels minéraux et de l'énergie lumineuse tout en produisant du dioxygène (O<sub>2</sub>)

Lorsque les conditions océaniques sont favorables, les communautés phytoplanctoniques se multiplient rapidement (un phénomène comparable aux “marées vertes” du littoral breton mais moins visible à l'œil nu) et peuvent fixer de grande quantité de CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer. Les périodes de fortes productions primaires océaniques s'appellent des blooms. On les observe généralement au printemps et elles sont caractérisées par une augmentation rapide de la biomasse phytoplanctonique. Le phytoplancton sert ensuite d'alimentation au zooplancton herbivore qui, à son tour, sera mangé par du zooplancton carnivore (Fig. 4). Et ainsi de suite... Les relations entre les proies et les prédateurs permettent ainsi un transfert de carbone organique vers les niveaux supérieurs du réseau trophique.



**Figure 4 :** Le réseau trophique océanique indiquant les principaux stocks et flux de carbone au sein des

différentes espèces végétales et animales.

Le carbone organique particulaire (COP) produit à la surface des océans par le phytoplancton peut être dégradé par des micro-organismes, telles que des bactéries (Fig. 2). Dans ce cas, le COP est minéralisé en carbone inorganique ( $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$ ) et il retourne en phase dissoute (CID et potentielle source de  $\text{CO}_2$  pour l'atmosphère). Dans le cas contraire, le COP a tendance à sédimenter et donc à être exporté plus ou moins rapidement en direction du fond. Les sédiments des zones littorales et des plateaux continentaux constituent généralement des "puits de carbone" car le COP a tendance à s'y accumuler au cours du temps.

Les stocks de matière organique sont répartis dans les compartiments suivants :

- Le carbone inorganique dissous dans l'océan, où se trouve la majorité du carbone, soit environ 37000 GtC. Celui-ci se trouve sous 3 formes (ion carbonate  $\text{CO}_3^{2-}$ , l'ion bicarbonate  $\text{HCO}_3^-$  et le  $\text{CO}_2$  dissous). Ce dernier peut s'échanger avec le  $\text{CO}_2$  atmosphérique et donc contribuer, s'il est transféré de l'eau vers l'atmosphère, à l'effet de serre planétaire.
- Le carbone organique particulaire (lié à la matière vivante ou en voie de minéralisation), que l'on trouve principalement près de la surface, soit environ 3 GtC. Le stock de COP est principalement représenté par les communautés planctoniques à plus de 95%.
- La matière sédimentaire, contenant principalement des carbonates particuliers (CIP) avec une quantité de carbone organique variant entre 0.5 et 4% du poids sec. Le stock total de COP dans les sédiments océaniques est de 120 GtC (pour les 10 premiers centimètres) avec environ 15-30 GtC dans les sédiments des plateaux continentaux (extrapolation d'après *Diesing et al.* 2017). En général, les sédiments fins (vases) contiennent entre 1 et 2% de carbone organique particulaire (COP) alors que les sables sont beaucoup plus pauvres avec 0.1-0.2% de carbone organique particulaire (COP) (*Leipe et al.*, 2011).

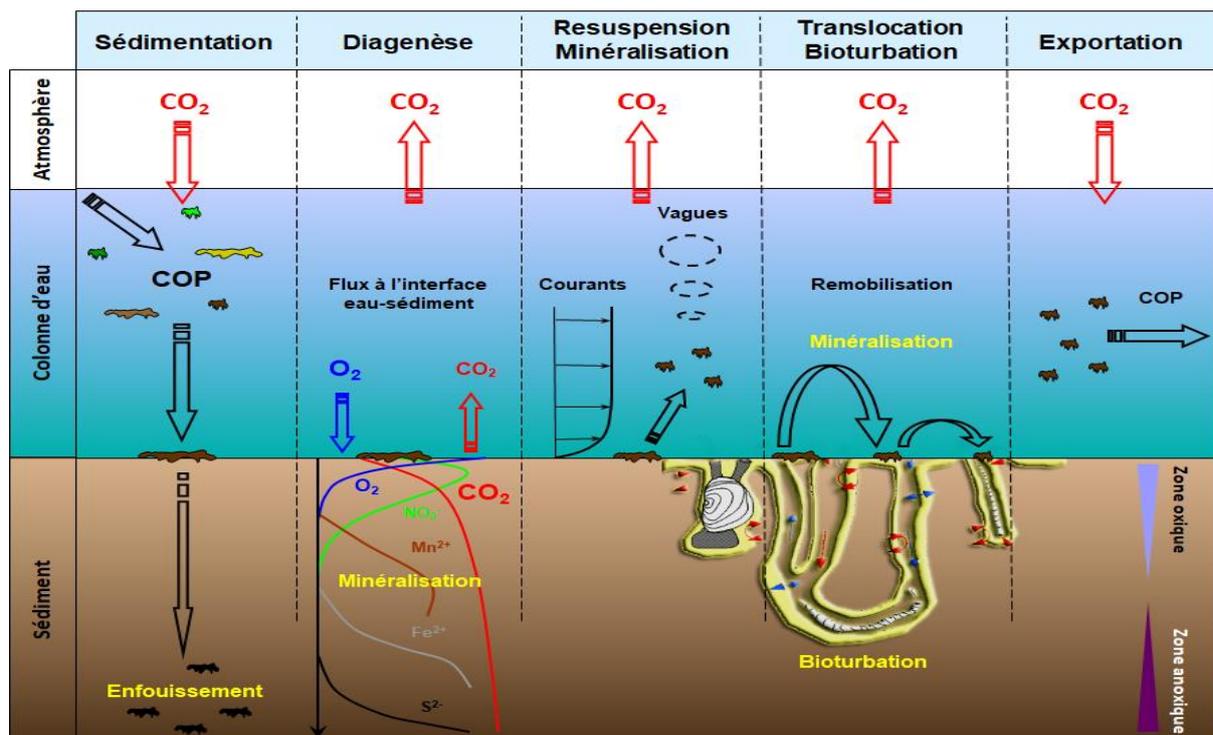
## 1.2. Sources et puits de $\text{CO}_2$ atmosphérique

Les différentes formes de carbone interagissent entre elles au travers de la photosynthèse (fixation de carbone inorganique dissous dans la matière organique particulaire) ou la minéralisation qui correspond à la transformation inverse (transformation de la matière organique particulaire en carbone inorganique dissous). Le phénomène de photosynthèse correspond donc à une soustraction de carbone inorganique dissous du milieu (Fig. 2) permettant l'entrée de  $\text{CO}_2$  atmosphérique dans l'océan, ce qu'on appelle un puits de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. A l'inverse, la minéralisation qui produit du carbone inorganique dissous tend à transférer du  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère, ce qu'on appelle une source de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. L'augmentation ou la diminution de  $\text{CO}_2$  dissous dans les eaux de surface vont créer les conditions du transfert de ce gaz entre l'océan et l'atmosphère. Ce transfert interviendra massivement lors de périodes de vents intenses qui favorisent le brassage de l'océan (mélange vertical). Le couplage de ces deux processus génère donc dans les zones

côtières et les plateaux continentaux des zones de puits et de source de CO<sub>2</sub> selon que le bilan {minéralisation - photosynthèse} soit positif (source) ou négatif (puits). Tout apport extérieur ou stockage à long terme dans le système peut inverser le signe du bilan (*Bauer et al., 2013 ; Legge et al., 2020*). Typiquement, les estuaires sont des sources de CO<sub>2</sub> car ils minéralisent la matière organique venant du continent en plus de celle produite localement. Au contraire, les plateaux continentaux sont généralement des puits de CO<sub>2</sub> atmosphérique car ils stockent dans leurs sédiments une partie substantielle du carbone organique produit en surface par le phytoplancton. Les plateaux continentaux sont aussi le lieu d'exportation saisonnière des sédiments vers le large accentuant ainsi l'effet de "puits" des plateaux (voir section 1.3.5.).

### 1.3. Processus affectant le carbone organique dans les sédiments

Les sédiments des zones côtières et des plateaux continentaux sont donc un lieu important du stockage de carbone sous la forme de COP. Ce COP peut cependant être transformé en CID qui peut ensuite diffuser vers l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub>. En effet, le carbone organique subit de nombreuses transformations naturelles au sein des sédiments et dans la couche d'eau sus-jacente, nommée couche limite benthique. Ces deux compartiments sont très importants pour le transport des particules sur les plateaux continentaux, pour les échanges d'éléments particulaires et dissous entre la colonne d'eau et les sédiments ainsi que pour la dissipation de l'énergie des vagues et des courants (Fig. 5).



**Figure 5** : Représentation schématique et séquentielle des principaux processus biologiques, physiques et chimiques qui gouvernent le devenir du carbone organique dans les zones côtières et les plateaux continentaux.

Du fait de leur faible profondeur, les zones côtières sont caractérisées par une activité de transformation importante dans le compartiment benthique (les sédiments) qui est en interaction directe avec le compartiment pélagique (la colonne d'eau). Le compartiment benthique agit à la fois comme un puits de carbone par l'enfouissement d'une partie de la matière organique et comme une source de carbone vers l'océan à travers le recyclage d'une fraction de cette matière. C'est une compétition permanente ! Dans les zones côtières et les plateaux continentaux, les cycles biogéochimiques sont principalement contrôlés par leur composante sédimentaire et la dynamique de ce réservoir influe donc fortement sur le sens des flux de CO<sub>2</sub> échangés avec l'atmosphère. Les processus dans les sédiments superficiels varient dans l'espace et dans le temps et on doit donc nécessairement prendre en compte ces variations pour quantifier les bilans de carbone aux interfaces côtières (*Borges et al., 2005; Chen and Borges, 2009*).

### **1.3.1. Importance de la nature des constituants du sédiment**

Les sédiments des milieux océaniques côtiers (zone côtière et plateau) sont constitués de deux types de sédiments : vaseux et sableux. Ces deux types de sédiment sont liés à la nature des apports et à l'intensité des courants et des tempêtes qui effectuent un tri granulométrique et génèrent des phénomènes de resuspension et de transport (Fig. 5) affectant surtout les particules fines. Les milieux sableux contiennent des quantités limitées de matière organique avec des teneurs moyennes en carbone organique de 0.1-0.2% en poids (*Leipe et al., 2011*) alors que les vases côtières contiennent environ 10 fois plus de carbone (1-2% le plus fréquemment). Les zones côtières et les plateaux continentaux sont caractérisés par des apports de particules minérales du continent qui assurent une capacité d'enfouissement importante du COP d'origine terrigène. A tel point qu'on estime à environ 85% l'enfouissement permanent de carbone organique pour les seuls 7% de la partie côtière de l'océan, alors que l'océan ouvert n'en assure que 15% environ (*Hedges and Keil, 1995*). On peut noter que les deltas des fleuves sont des zones de concentration de cet enfouissement car ils représentent la moitié de l'enfouissement dans les zones côtières alors qu'ils ne représentent que moins de 5% de la surface des plateaux continentaux (0.3% du total des océans). Pour la question de la préservation et de l'enfouissement du carbone organique, le problème de l'origine et de la réactivité du carbone se pose. Il est estimé qu'environ la moitié du carbone enfoui dans les sédiments des zones côtières et des plateaux continentaux est d'origine terrestre (plantes et débris terrestres). En effet, au premier ordre, ce type de carbone subit des transformations plus limitées dans le milieu marin que la matière organique marine (voir ci-dessous). Par ailleurs, lors des crues, les apports fluviaux sédimentent massivement à l'embouchure des fleuves favorisant ainsi l'enfouissement du carbone organique terrigène. Au débouché des fleuves, la sédimentation massive du matériel particulaire favorise dans un premier temps la séquestration de la MO terrigène, en la soustrayant rapidement aux réactions diagénétiques les plus favorables à sa dégradation (*Aller, 1998*).

### **1.3.2. Minéralisation dans le sédiment : transformations diagenétiques**

Dans un premier temps, le carbone organique particulaire, d'origine terrestre ou marine, est en partie dégradé sous l'interface eau-sédiment au cours de la diagenèse précoce. La diagenèse précoce regroupe les premières transformations (d'origine physique, chimique et biologique) qui conduisent à la formation du sédiment. Cette étape est décisive vis-à-vis du cycle biogéochimique du carbone dans l'océan. La minéralisation du COP, qui transforme le carbone organique particulaire en carbone inorganique dissous, s'effectue via un réseau complexe de réactions d'oxydation (Fig. 5), où l'oxygène occupe une place privilégiée puisqu'il est l'oxydant le plus favorable d'un point de vue énergétique. L'importance relative des différentes voies de minéralisation anoxique du COP (dénitrification, réduction des oxydes de Mn et de Fe, sulfato-réduction, méthanogenèse) varie dans l'espace et le temps en fonction de la nature des dépôts sédimentaires, des taux d'accumulation et des forçages biologiques et physiques (*Canfield, 1994*). Le recyclage benthique total est la résultante des réactions oxiques et anoxiques de minéralisation du COP et constitue une source de CID pour le milieu marin et donc, *in fine*, de CO<sub>2</sub> pour l'atmosphère. Il faut également noter que la minéralisation du carbone s'accompagne d'une production de sels nutritifs dissous (N, P) provenant de la dégradation de la matière organique. Ces nutriments s'accumulent dans les eaux interstitielles des sédiments superficiels (voir 1.3.6).

### **1.3.3. Resuspension des particules sédimentaires**

Dans un second temps, la dynamique des sédiments participe activement au recyclage de cette matière. En effet, l'intensité et la fréquence des cycles d'érosion, transport et redéposition sous l'effet des courants de marées, des courants côtiers et des vagues générées par les tempêtes, favorisent la reminéralisation de la matière organique en provoquant notamment des oscillations des conditions oxiques (*Hartnett et al., 1998*).

Les tempêtes hivernales provoquent la remise en suspension des sédiments par l'action combinée des vagues et des courants. Ces phénomènes de resuspension entraînent une importante relocalisation des particules et modifient profondément les conditions du recyclage benthique du carbone organique. L'action mécanique de chalutage perturbe également la colonne sédimentaire et la séquence diagenétique associée. Les particules (fines ou grossières) sont remises en suspension. Les particules les plus fines, comme les vases et les argiles, sont remises en suspension dans l'eau de fond et peuvent être transportées sur plusieurs dizaines de kilomètres en fonction des courants de fond. A l'inverse, les plus grosses particules, comme les sables, se redéposent rapidement à quelques cm ou m du trait de chalut.

### **1.3.4. Effets de la bioturbation : le rôle de la faune sédimentaire**

La bioturbation représente l'action des macro-organismes vivants dans le sédiment sur le transport du matériel sédimentaire (solide et eau interstitielle contenue dans les vases ou les sables). Elle peut être séparée en deux grands mécanismes : le mélange des particules

par l'action de la faune benthique (bioturbation) et le mouvement de pompage d'eau pour la respiration (bio-irrigation). Ce mécanisme de bioturbation est particulièrement intense dans les zones côtières et les plateaux continentaux étant donné la densité d'organismes (macrofaune > 1 mm) dans ces sédiments. En général, l'effet de la bioturbation est intense sur les 10 premiers cm de la colonne sédimentaire, mais il peut s'étendre sur plusieurs dizaines de centimètre selon les espèces résidentes. L'effet de la bioturbation-bioirrigation est double : (1) stimulation du transport de COP vers les sédiments et vers les couches anoxiques favorisant l'utilisation rapide de cette source nutritive par les bactéries anaérobies ; (2) entraînement de l'oxygène vers les sédiments par le pompage dans les terriers par la bio-irrigation, participation à l'efficacité du recyclage oxydant du COP et transfert du carbone inorganique dissous vers la colonne d'eau. Il est donc relativement admis que la bioturbation stimule la minéralisation du carbone organique via l'activité de la macrofaune benthique (*Snelgrove et al., 2018*).

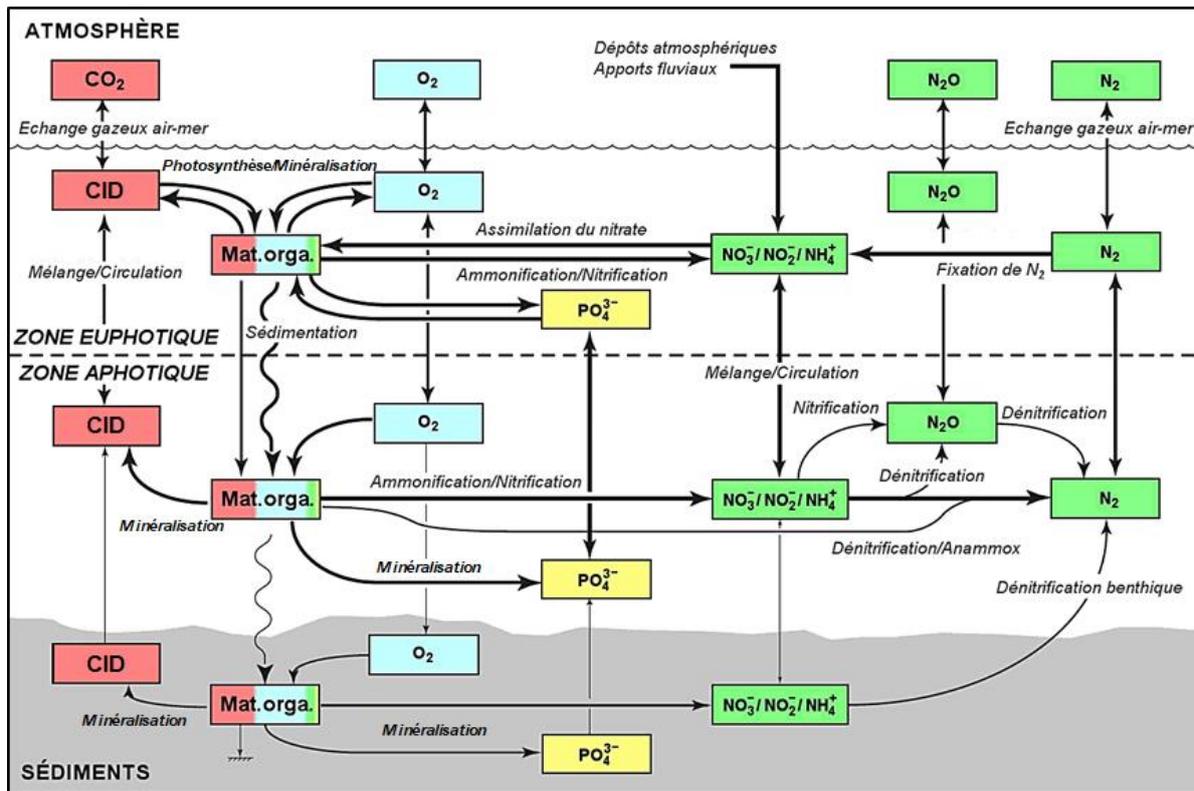
### **1.3.5. Export de carbone organique vers le large par les courants de fond**

Une partie des sédiments des plateaux continentaux est exportée vers le large, la plupart du temps dans des canyons sous-marins. L'essentiel de cet export s'effectue après la resuspension des sédiments du plateau continental dans l'eau de fond lors des tempêtes. Ces sédiments sont transportés par des courants intenses vers les rebords de plateau et exportés lors d'évènements de plongée d'eau dense ou de courants de fond (downwelling) pendant les tempêtes hivernales (*Canals et al., 2006; Ulses et al., 2008*).

Les éléments minéralisés dans les sédiments, et notamment le CID, sont naturellement transportés vers l'eau de fond par la diffusion moléculaire, phénomène physico-chimique qui permet la migration des espèces chimiques dans les eaux interstitielles puis vers l'eau de fond. Ensuite, le CID accumulé dans l'eau de fond est mélangé dans toute la colonne d'eau par le refroidissement et les tempêtes automnales. Par la suite, le CO<sub>2</sub> peut être transféré vers l'atmosphère lors des mélanges verticaux de la colonne d'eau qui ont lieu principalement en hiver.

### **1.3.6. Représentation détaillée des cycles de la matière associée au carbone dans le milieu côtier**

Dans l'océan, le cycle (transferts ou flux entre les compartiments, transformations dans les compartiments) du carbone est étroitement lié aux cycles d'autres éléments chimiques notamment à l'oxygène (O), à l'azote (N) et au phosphore (P). La photosynthèse a pour effet de fixer du CO<sub>2</sub>, de consommer des sels nutritifs (nitrate, nitrite, phosphate...) et de produire de l'O<sub>2</sub>. A l'inverse, la minéralisation de la matière organique produit du CO<sub>2</sub>, consomme de l'O<sub>2</sub> (ou un autre oxydant) et permet de recycler les sels minéraux. La minéralisation de la matière organique peut se faire directement dans la colonne d'eau mais elle est plus intense dans les sédiments car le carbone s'accumule au cours du temps. Cela produit des accumulations de sels nutritifs (N, P) dans les couches de sédiments situées à la surface qui peuvent être libérées lors du chalutage.



**Figure 6 :** Représentation plus complexe du cycle du carbone dans l'océan et ses différentes connexions avec les cycles de l'oxygène, de l'azote et du phosphore (d'après Gruber, 2008).

En conclusion, les zones côtières et les plateaux continentaux sont des zones sensibles vis-à-vis du carbone, particulièrement la partie sédimentaire qui constitue un stock important de carbone et contribue pour 80% de l'enfouissement de carbone organique dans le milieu marin. En terme d'échelle de temps, sur les plateaux continentaux, où la vitesse d'accumulation de sédiment est de l'ordre de 1 à 2 mm/an, les quelques centimètres de sédiment qui sont resuspendus pendant le chalutage correspondent à plusieurs décennies de dépôt de sédiment et du carbone organique qu'il contient (15-30 GtC pour 10 cm de sédiment, cf paragraphe 1.1). Il faut donc pouvoir évaluer avec précision le devenir de cette matière remobilisée et des sédiments perturbés sur ces mêmes échelles de temps. En effet, les transformations du carbone après perturbation par le chalutage vont conditionner finalement l'impact de cette technique de pêche sur le bilan du carbone dans les zones côtières et les plateaux continentaux.

## 2. Etat de l'art sur l'impact du chalutage sur le carbone organique dans les sédiments côtiers

Les sédiments marins des zones côtières et des plateaux continentaux constituent l'une des principales réserves de carbone de la planète et influencent fortement le puits océanique de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (Atwood *et al.*, 2020). Sur les plateaux continentaux et vers les talus, le chalutage et le dragage de fond sont les activités humaines les plus impactantes pour les

fonds marins (*Amoroso et al., 2018 ; Epstein et al., 2022*). En effet, le chalutage/dragage produit une perturbation de la colonne sédimentaire et une resuspension avérée des sédiments qui augmente la turbidité de l'eau, favorise le transport des particules par les courants et augmente la minéralisation du carbone organique. Plusieurs études effectuées sur le terrain ou par des calculs rapportés à l'effort de pêche (*Oberle et al., 2016; Ferré et al., 2008, Durrieu de Madron et al., 2005*) ont montré que la resuspension induite par le chalutage était beaucoup plus importante que celle induite par les vagues pour des parties de plateau situées sous 100 mètres de profondeur que les tempêtes atteignent rarement (*Oberle et al., 2016*). Certains auteurs ont comparé le chalutage au labourage en profondeur des terres agricoles qui correspond, dans notre cas, à une perte nette de carbone des sédiments (*Paradis et al., 2021*). Pour autant, les effets du chalutage viennent en concurrence des processus naturels de minéralisation du carbone organique et pour estimer l'impact du chalutage sur le bilan de carbone des sédiments côtiers, il faut pouvoir le comparer au fonctionnement naturel des sédiments.

A partir d'un corpus de 21 articles, nous avons dégagé de cette littérature peu abondante et souvent peu quantitative les effets du chalutage sur le cycle du carbone. Ces effets sont antagonistes, i.e. ils peuvent agir comme des sources de CO<sub>2</sub> vers l'océan et l'atmosphère (tel que postulé par *Sala et al., 2021*), mais ils peuvent également contribuer à la fixation de CO<sub>2</sub> (puits) par la fixation de CO<sub>2</sub> lors des blooms phytoplanctoniques favorisés par les apports de sels nutritifs ou par l'export de particules vers l'océan profond. Nous avons donc séparé cette partie du rapport en deux parties (sources et puits) avec dans chacune d'elle les processus mis en évidence dans la littérature. Nous tenterons, dans une courte synthèse, de dégager les ordres de grandeur des phénomènes pour essayer de déterminer quels sont les processus dominants.

## 2.1 Sources de CO<sub>2</sub>

### 2.1.1 Resuspension et minéralisation du carbone organique dans la colonne d'eau

A notre connaissance, aucune étude sur le chalutage n'a publié de valeur de COP minéralisé dans la colonne d'eau après le chalutage. Une des causes de la possible rapide reminéralisation des particules resuspendues est l'efficacité plus importante de la dégradation aérobie par rapport à la minéralisation anaérobie (*Hartnett et al., 1998*). Les sédiments des plateaux continentaux sont souvent anoxiques sous le premier centimètre et une remise en contact avec l'oxygène de la colonne d'eau pourrait accélérer le métabolisme bactérien et la minéralisation du COP (*Hulte et al., 1998; Sun et al., 2002*).

Le temps de résidence des particules dans la colonne d'eau après le chalutage dépend fortement des conditions hydrodynamiques locales. *Durrieu de Madron et al. (2005)* indique dans son article que la turbidité est revenue aux valeurs de référence quelques heures après le passage du chalut, alors que *Palanques et al. (2001)* indique une rémanence de la turbidité sur 4-5 jours. Or, les effets du transport après la resuspension liée au chalutage et la

reminéralisation du contenu organique des particules est très dépendante du temps de résidence des particules dans l'eau, en lien avec la ré-oxygénation des particules suspendues et l'activation bactérienne qui est liée (Hulthe *et al.*, 1998). Ainsi, on observe fréquemment dans les sédiments des zones chalutées des pertes de matériel organique très dégradable contenant de la *chlorophylle-a* (Tiano *et al.*, 2019) qui est donc possiblement décomposé en CID dans la colonne d'eau pendant la resuspension. Pour les autres parties de la matière organique plus résistantes, il est vraisemblable que leur décomposition en CID dans le temps court de la resuspension (quelques heures à quelques jours) soit limitée. En effet, d'après Arndt *et al.* (2013), l'échelle temporelle de minéralisation pour la matière organique des sédiments de surface est de l'ordre d'un mois à une année (constante cinétique  $k=1-10 \text{ a}^{-1}$ ), ce qui implique des dégradations significatives sur ces durées et donc limitées sur des durées plus courtes. La minéralisation du sédiment resuspendu par le passage des engins de pêche pourrait donc être extrêmement variable et dépendre largement des conditions hydrodynamiques locales de transport des particules et des vitesses de minéralisation liées à la qualité nutritive de la matière organique.

### **2.1.2 Minéralisation du carbone organique dans les sédiments**

Le passage des engins de pêche à la surface du sédiment entraîne une remise en suspension du sédiment et possiblement un dépôt sur place d'une partie du matériel resuspendu (Durrieu de Madron *et al.*, 2005; Dellapenna *et al.*, 2006 ; Ferré *et al.*, 2007). C'est le cas pour la fraction silteuse (4-62  $\mu\text{m}$ ) des sédiments. La perturbation des sédiments est effective sur plusieurs centimètres ( $2.4 \pm 1.1 \text{ cm}$ , Hiddink *et al.*, 2017) et l'accroissement de la minéralisation, s'il existe, a lieu dans les sédiments re-déposés. Il est notable que la proportion de matière organique rapidement dégradable contenant des sucres et des protéines (souvent liée au phytoplancton frais et contenant de la *Chl-a*) est très variable, mais peut atteindre 30-50% dans les couches superficielles du sédiment après les dépôts de printemps. Plusieurs études ont abordé l'impact de cette perturbation liée au chalutage sur la minéralisation de la matière organique dans les sédiments après le passage de chaluts. La plus ancienne est celle de Warnken *et al.* (2003) qui n'a pas montré, à l'échelle de la journée, d'augmentation de la consommation d'oxygène et donc de la production de CID. Ces mesures couvrent un intervalle de temps très court après la perturbation par le chalutage et sont donc limitées dans la mesure d'une augmentation potentielle de la minéralisation. La publication plus récente de van de Velde *et al.* (2018) étudie les sédiments sur une échelle de temps beaucoup plus longue (6 mois après la perturbation d'origine inconnue de 15 cm de profondeur dans le sédiment). Les auteurs attribuent cette perturbation, sans certitude aucune sur son origine, à un événement de chalutage ou à un dépôt de dragage mélangé à la production primaire locale de phytoplancton. Les auteurs notent une augmentation notable de la minéralisation du carbone d'un facteur 2.5, de  $16.4 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$  à  $41 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$  (de  $196$  à  $492 \text{ mg C m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ ). Ils attribuent cette augmentation de la minéralisation à la quantité de matière organique fraîche piégée dans le dépôt de 15 cm de sédiment. L'analogie pourrait être faite avec des situations de chalutage de printemps pour des

couches mélangées plus fines avec entraînement de phytoplancton dans le matériel redéposé après le chalutage qui pourrait conduire à une forte augmentation de la minéralisation. Néanmoins, étant donné l'épaisseur de la couche mélangée dans cet exemple, il est peu probable que la perturbation soit liée à un événement de chalutage. Plus proche des conditions de chalutage, les articles de *Tiano et al. (2019)* et de *De Borger et al. (2020)* montrent en revanche des décroissances de la minéralisation après des épisodes de chalutage par différentes techniques de pêche. Dans ces expériences et modèles, on note une perte de matière organique fraîche dans les sédiments (associée à la Chl-*a*) qui réduit la minéralisation dans le sédiment comme en témoignent les demandes en oxygène mesurées après le chalutage (réduction de 30%) pour les incubations faites à bord sur des périodes de quelques jours suivant le passage des chaluts. Ces résultats sont corroborés par les approches de modélisation de *De Borger et al. (2020)* qui a montré sur 5 types de sédiment-modèles (sables grossiers, sables fins, vases, riches ou pauvres en matière organique pour les 2 derniers) des diminutions significatives (15-25%) de la minéralisation suite à la perte de la fraction fine du sédiment et au mélange des sédiments superficiels restant. A noter que la réduction dans les sédiments grossiers est moins marquée après le passage des engins de pêche. Ces diminutions de minéralisation augmentent avec le nombre de passages en pêche sur les sites (voir Fig. 6 de *De Borger et al., 2020*).

L'apparente contradiction entre les études de *van de Velde et al. (2018)* et de *De Borger et al. (2020)* vient de l'enrichissement/appauvrissement en MO fraîche. Dans leur modèle, *van de Velde et al. (2018)* imposent un enrichissement qui mène à un accroissement de la minéralisation dans le sédiment. Dans celui de *De Borger et al. (2020)*, et suite aux mesures de *Tiano et al. (2019)* montrant un appauvrissement significatif de Chl-*a*, la teneur en matière organique réactive est réduite suite au passage des engins de pêche menant, de ce fait, à une diminution nette de la minéralisation. On prend donc conscience que la variable clé du problème est la capacité des sédiments à entraîner/conservier la matière organique fraîche lors de leur dépôt suite au passage des engins de pêche.

D'autres expériences ont eu lieu comme celle de *Morys et al., (2021)* en Mer Baltique où une drague légère a été employée pour imiter le chalutage avec 2.5-3 cm de sédiment retiré de la surface. Cette expérience montre une perte évidente de la Chl-*a* contenue essentiellement dans la couche de surface, et donc une perte de matière organique réactive. En conséquence, les flux d'oxygène diminuent comme dans l'étude de *Tiano et al. (2019)* indiquant une baisse de la minéralisation du carbone organique. Les flux d'ammonium, marqueurs de la minéralisation, augmentent mécaniquement tout de suite après la perturbation du sédiment et se stabilisent par la suite à des valeurs très basses, indiquant également la baisse de la minéralisation du carbone organique (le flux de CID n'a pas été mesuré dans cette expérience). En revanche, les flux de phosphate augmentent durablement sur plus de deux semaines lors de cette expérience. La situation est assez similaire dans l'article de *Tiano et al. (2022)* où les traits de chalut ont été réalisés sur un habitat d'espèces irrigantes (*Lanice conchilega*). Cette expérience montre une perte de

carbone organique et de Chl-*a* et une diminution de la minéralisation vue à travers le flux d'oxygène mesurés après le passage du chalut sur une période d'une semaine (5-8 jours). Celle-ci s'accompagne d'ailleurs d'une diminution nette de la densité de macrofaune sur les sites soumis au chalutage intensif (jusqu'à 6 passages).

L'ensemble de ces résultats montre une baisse de l'activité de minéralisation de la matière organique dans les sédiments liée à une perte de sédiment fin de surface contenant la partie réactive la plus fraîche de la matière organique. La seule étude qui fait exception est celle de *van de Velde et al.* (2018), mais l'origine de la perturbation est inconnue et n'est vraisemblablement pas liée au chalutage.

### 2.1.3 Resuspension d'eau porale contenant du CID

Lors du chalutage et de la resuspension induite, les eaux interstitielles contenues dans les sédiments sont également mélangées avec l'eau de fond. Ces eaux contiennent des sels nutritifs (nitrates, ammonium, phosphate, silicates) et du CID généralement en concentration élevée par rapport à l'eau de mer de fond. Il a été montré que ces apports sont notables à partir des sédiments vaseux tels que ceux étudiés par *Durrieu De Madron et al.* (2005) et *Dounas et al.* (2007). Les quantités répertoriées sont assez différentes dans les deux études mais leur ordre de grandeur est comparable pour l'azote inorganique dissous (AID): 1870  $\mu\text{molN}/\text{m}^2$  (26 mg N/m<sup>2</sup>) pour *Durrieu De Madron et al.* (2005) et 650  $\mu\text{molN}/\text{m}^2$  (9.1 mg N/m<sup>2</sup>) pour *Dounas et al.* (2007). Les autres sels nutritifs montrent également des ordres de grandeur en adéquation. A partir de ces valeurs, on peut calculer une quantité de CID produite (en prenant comme hypothèse réaliste un rapport CID/AID de 10) pour ces sédiments vaseux : 6-18 mmolC/m<sup>2</sup> soit environ 0.07-0.2 gC/m<sup>2</sup>. Ces quantités sont faibles (<10%) au regard des quantités de COP resuspendus (2-3 gC/m<sup>2</sup>), mais elles constituent une perte nette de CID pour des sédiments perturbés par le chalutage vers l'eau de fond et donc un apport de CO<sub>2</sub> lié à cette technique de pêche.

## 2.2 Préservation de carbone

### 2.2.1 Resuspension et export de carbone vers la marge

Certains auteurs ont proposé que la resuspension des sédiments liée au chalutage s'accompagne d'un export accru de carbone vers le large (*Oberle et al.*, 2016). En effet, il a été noté (*Durrieu de Madron et al.*, 2005 ; *Ferré et al.*, 2007; *Palanques et al.*, 2001) que la resuspension peut alimenter en particules fines la couche de fond riche en particule (néphéloïde). Une autre partie de cette couche resuspendue est déposée sur le plateau continental près du lieu de pêche. La couche d'eau de fond chargée en particule peut naturellement transporter les sédiments vers le large le long des pentes océaniques selon l'orientation des courants. On peut donc envisager selon *Oberle et al.* (2016) qu'une partie importante de la fraction fine du sédiment soit exportée avec la couche d'eau de fond vers la pente océanique. Ce phénomène serait amplifié si le chalutage est effectué à l'extrémité

du plateau continental près du talus continental. *Oberle et al.* (2016) ont calculé qu'une quantité égale à l'apport des fleuves sur la marge ibérique pourrait être exportée vers le talus par le chalutage, représentant six fois les valeurs naturelles d'export par resuspension. A notre connaissance, aucun calcul n'a été fait pour le carbone, mais celui-ci étant lié à la fraction fine, son export par ce processus doit être significatif et une fraction de carbone des sédiments du plateau continental contenu dans les sédiments peut alors être exportée vers le talus continental et l'océan profond. Ce mécanisme d'érosion et d'export qui appauvrit la zone côtière en substances nutritives liées à la matière organique (et donc au carbone) constitue clairement une menace pour la productivité à moyen terme de la zone du plateau continental. Néanmoins, il peut s'apparenter, pour les échelles de temps de quelques centaines d'année, à un mécanisme de préservation du carbone océanique (*Epstein et al.*, 2022): en effet, le carbone organique exporté vers les eaux de fond du talus est soustrait du contact avec l'atmosphère car il peut être (i) soit enfoui dans les sédiments du talus (i) soit être transformé en CO<sub>2</sub> par minéralisation dans les sédiments, diffuser vers l'eau de fond et être inclus dans la circulation profonde de l'océan dont le temps de retour est d'environ 1000 ans. Ce temps de retour est, bien entendu, conditionné par la circulation côtière régionale: zones de remontées d'eaux profondes (upwelling), ou zones de plongée d'eaux denses (*Canals et al.*, 2006).

### **2.2.2 Flux d'eau interstitielle et de sels nutritifs**

Les flux de sels nutritifs relargués du sédiment lors de la resuspension (voir ci-dessus) augmentent également la concentration en nutriments des eaux de fond de 20-30% (*Durrieu De Madron et al.*, 2005). Ils peuvent participer, lors du mélange des eaux de fond et des eaux de surface, à l'augmentation de la production primaire du phytoplancton qui est, au printemps et en été, carencé en sels nutritifs. *Dounas et al.* (2007) ont montré par la modélisation que cette production primaire dans les eaux crétoises peut être localement accrue de 50% avec une moyenne annuelle de 15% d'augmentation liée aux apports de nutriments lors de la resuspension des eaux interstitielles par le passage des chaluts. Il est clair selon les auteurs que cette étude ne s'applique pas directement à d'autres sites de pêche étant donné les grandes différences de teneur en sels nutritifs dans les sédiments et dans les eaux de surface. Néanmoins, cet apport de nutriment crée donc un puits de CO<sub>2</sub> additionnel par la fixation de CO<sub>2</sub> dans la matière organique qu'il faudrait pouvoir quantifier.

### **2.2.3 Suppression de la macrofaune et de la bioturbation entraînant une diminution de la minéralisation**

Il a été proposé de longue date que la macrofaune (taille > 1mm) présente dans les sédiments joue un rôle essentiel dans la minéralisation du carbone organique. En effet, cette faune consomme le carbone organique comme source nutritive, mais contribue également au mélange des sédiments par la bioturbation, l'irrigation des sédiments et par la régulation de produits toxiques pour l'écosystème, tels que les sulfures ce qui tend à accroître le potentiel de minéralisation dans les sédiments riches en faune (*Snelgrove et al.*, 2018; *Van*

de Velde et al., 2020). L'effet du chalutage sur cette faune benthique est assez bien documenté (Hiddink et al., 2017): il mène à une diminution de la biomasse plus ou moins forte (6-40%). Cette diminution dépend du type d'engin de pêche et de leur profondeur de pénétration dans le sédiment et mène à des temps de récupération pour la faune pouvant aller jusqu'à plusieurs années (Hiddink, 2017). Lors de ce prélèvement de faune par les engins de pêche, une baisse de la minéralisation du carbone a été observée, en lien avec la diminution de l'intensité de la bioturbation et de l'irrigation liée à l'activité de cette faune. C'est ce que Tiano et al. (2022) ont observé dans des habitats denses de la Mer du Nord : baisse significative de la macrofaune (-50%) et diminution du recyclage du carbone organique dans les sédiments (jusqu'à -50%). Néanmoins, d'autres auteurs comme Sciberras (2016) ont montré dans d'autres types d'habitats vaseux (Ouest-Angleterre) que la biomasse de la faune benthique ne diminuait pas avec la pression de chalutage et que les sédiments chalutés pouvaient même être plus riches en matière organique fraîche. Ces résultats, assez différents des autres études de la littérature, mettent en lumière les spécificités des habitats et les réponses différentes aux contraintes imposées par le chalutage.

Néanmoins, si nous nous basons sur les résultats de Hiddink (2017), d'une baisse significative de la biomasse benthique après le passage des chaluts, nous pouvons anticiper que, comme dans le cas de Tiano (2022), la fonction de bioturbation liée à la faune benthique diminue avec le chalutage, ce qui pourrait correspondre à une diminution de la minéralisation et mener à une préservation accrue du carbone dans les sédiments (cf Hiddink, 2021).

### **2.3: Evolution temporelle des zones chalutées, persistance des effets du chalutage**

Il a été montré dans Hiddink et al. (2017) que le temps de récupération de la faune contenue dans les écosystèmes benthiques après le passage de chalut est de 1,9 à 6,4 ans. Concernant le carbone, il n'existe aucune étude, à notre connaissance, ayant suivi à long terme des sites impactés par le chalutage et leur capacité à "récupérer" après l'arrêt de cette pression. Un article récent apporte une méthodologie différente pour estimer l'effet à long terme du chalutage (Paradis et al., 2021). En effet, cet article combine la comparaison de sites chalutés et non chalutés assez proche des côtes (<20 km) en Méditerranée à des profondeurs similaires (500 m), avec des exclusions temporaires de chalutage (2 mois pendant l'hiver). La comparaison de sites chalutés/non-chalutés montre une forte différence dans le contenu en carbone et en composés dégradables essentiellement d'origine marine, avec un déficit bien marqué pour le site chaluté. Ce déficit est attribué (voir plus haut) à la perte de particules fines lors de la resuspension par le chalutage et du transport de ces particules hors de la zone chalutée. La persistance des effets du chalutage sur le stock et la composition du COP est observée pendant la fermeture temporaire de la pêche pour 2 mois pendant l'hiver. Bien qu'il y ait eu un transport substantiel de matière fraîche depuis les rivières en crue, les stocks de carbone qui sont 30% plus faibles que sur le site non-chaluté ne se sont pas reconstitués

pendant cette période d'arrêt de la pêche. Les auteurs estiment que plusieurs décennies (10-30 ans) seraient nécessaires pour revenir aux stocks initiaux. En effet, les vitesses d'accumulation de sédiment sont de 0,4 à 0,8 cm/an, ce qui mène à des temps de remplissage (pour 10 cm) supérieurs à 10 ans. Même si ce temps semble surévalué (non prise en compte de la bioturbation, épaisseur de sédiment supérieure à l'épaisseur chalutée moyenne), le temps de reconstitution du sédiment, bien qu'inconnu à l'heure actuelle, est vraisemblablement de plusieurs années.

## **2.4 Conclusion: effets du chalutage sur les zones sensibles pour le carbone**

Comme on l'a vu dans l'étude bibliographique précédente, deux effets antagonistes pour le cycle du carbone co-existent dans l'océan côtier soumis au chalutage : certains processus (resuspension, stimulation de la minéralisation, flux de CID) vont accroître la source de CO<sub>2</sub> depuis le sédiment vers l'eau surnageante et créer donc une source additionnelle de CO<sub>2</sub> liée à l'activité de chalutage. D'autres processus concurrents/antagonistes (export de carbone vers les fonds marins au large, flux de nutriments, suppression de la bioturbation) peuvent diminuer la minéralisation ou créer des puits de CO<sub>2</sub> temporaires par divers mécanismes décrits dans les paragraphes ci-dessus (voir aussi *Epstein et al., 2022*). A l'heure actuelle, aucune étude des effets du chalutage n'a intégré tous ces processus sur une zone donnée rendant très incertain le calcul d'un bilan carbone général de l'effet du chalutage. Ces incertitudes augmentent d'autant plus si on augmente l'échelle spatiale, notamment à l'échelle d'une marge continentale ou à l'échelle nationale, et si on intègre la variabilité temporelle des zones côtières.

Il est donc nécessaire, voire même urgent, de mener des études d'impact du chalutage intégrant la colonne d'eau et le sédiment, le carbone et la faune benthique et d'estimer simultanément les flux de carbone liés aux différents processus énumérés ci-dessus. Des suivis à court terme (quelques semaines), mais aussi à moyen terme (de la saison à l'année) devraient être effectués afin de juger de la capacité des sédiments à régénérer leur cycle du carbone suite à la perturbation du chalutage.

Par ailleurs, les études réalisées révèlent des différences fortes entre les types de sédiments (vases, sables) et il est certainement essentiel de croiser les cartes d'effort de pêche avec les informations existantes sur les types de sédiments. Il est également essentiel de cartographier les teneurs en carbone organique (quantité, type de carbone, origine et réactivité voir par exemple *Smeaton et al., 2022*) sur les plateaux continentaux afin de caractériser au mieux la susceptibilité carbone des habitats chalutés.

### 3. Pistes possibles de quantification de l'effet du chalutage sur le recyclage et l'enfouissement du carbone

Le présent rapport évalue uniquement, en se basant sur la littérature scientifique existante, l'effet du chalutage sur le bilan carbone des sédiments. Il ne traite en aucune façon de l'impact des activités de pêche sur d'autres indicateurs environnementaux (diversité et qualité des habitats, ressources halieutiques, ...). L'état de l'art sur les connaissances scientifiques actuelles ne permet pas de quantifier précisément l'impact du chalutage sur le bilan carbone à l'échelle des zones côtières métropolitaines, c'est-à-dire qu'il ne permet pas de quantifier le solde des effets antagonistes que génèrent les activités de chalutage de fond sur les stocks de carbone organique dans les sédiments. Une majorité d'études actuellement publiées montre un effet limité du chalutage sur les stocks de carbone organique. Mais la difficulté d'en estimer les changements associée aux limites temporelles imposées aux études de terrain laissent à penser qu'on est loin de comprendre et de quantifier l'interaction entre les mécanismes sédimentologiques, microbiologiques et chimiques associés au chalutage et leurs effets sur le bilan net de carbone. Il existe, par ailleurs, quelques cas attestés de perte significative de carbone dans des zones soumises au chalutage. Cette incertitude sous-tend également les conclusions de l'article de revue rédigé par *Epstein et al.* (2022) où on peut lire: "[...] pour tirer des conclusions définitives, il serait nécessaire de réaliser davantage d'études expérimentales et de modélisation couvrant un large éventail de contextes environnementaux, de types d'habitats et de pressions de pêche, afin d'aborder le grand nombre d'inconnues et de facteurs spécifiques associés au statut du carbone organique dans les fonds marins."

Dans ce cadre, nous pouvons apporter quelques recommandations pour progresser dans ce sens :

- Établir une cartographie précise et détaillée des sédiments marins côtiers (minéralogie et granulométrie) avec leurs teneurs en carbone (CID, COD, CIP, COP). Cette cartographie pourrait intégrer l'origine (continentale ou marine) du carbone organique et sa réactivité (labile ou réfractaire) à l'aide d'indicateurs appropriés. Le développement d'un modèle numérique de terrain (MNT) et d'un système d'information géographique (SIG) contenant ces données serait très pertinent. Ce travail pourrait être conduit dans le cadre d'un effort national, par exemple en partenariat avec l'IFREMER. Un tel travail a été recommandé par l'Alliance Nationale de Coordination pour la Recherche sur l'Énergie (ANCRE), dans ses directives pour l'inventaire des puits de carbone nationaux (ANCRE, 2022).
- Développer et conduire des expériences innovantes et intégrées permettant de réunir pêcheurs et scientifiques afin de déterminer pleinement les effets combinés du chalutage sur le carbone piégé dans les sédiments superficiels des écosystèmes marins côtiers. Idéalement, ces études devront associer des spécialistes de plusieurs domaines et en particulier des sédimentologues, des biologistes, des microbiologistes et des

biogéochimistes des systèmes marins côtiers. Elles devraient également étudier des environnements contrastés (sableux ou vaseux) et porter sur la colonne d'eau et les sédiments afin d'étudier le devenir de la matière resuspendue et des sédiments en place ou redéposés. Enfin, elles devraient associer le temps court lié aux premiers effets du chalutage et à la remise en suspension des sédiments (de l'échelle de la minute à l'échelle du jour), au temps plus long lié à la réorganisation du système sédimentaire et de sa faune (de l'échelle du mois à l'échelle de l'année).

- Associer à ces études expérimentales, des modèles mathématiques spatialisés mettant en compétition resuspension, minéralisation dans les sédiments et dans la colonne d'eau, flux de carbone et de nutriments (*Moriarty et al.*, 2017, 2018), transfert de particules et redéposition, bioturbation afin de pouvoir intégrer les différents mécanismes sur des temps suffisamment longs pour en calculer les effets respectifs.
- Comme souligné dans l'article de *Epstein et al.* (2022), la connaissance de l'état de référence du milieu, c'est-à-dire l'état initial du compartiment sédimentaire avant toute perturbation par le chalutage, manque cruellement pour attester des effets de ces pratiques de pêche sur le bilan carbone des zones côtières. En plus des recommandations citées ci-dessus, deux autres voies sont possibles pour obtenir des informations sur cet état de référence :
  - Effectuer des comparaisons entre des sites protégés (par l'homme ou naturellement) et des sites qui ont été modifiés par le chalutage. Cela est possible dans certaines parties du monde où des réserves ont été instaurées depuis plusieurs décennies. Une autre voie serait de suivre la trajectoire de récupération des environnements récemment passés sous protection intégrale (*Wang et al.*, 2021)
  - Étudier les rétro-trajectoires des environnements soumis à un chalutage intense pour reconstruire, par les archives sédimentaires, l'état du système (par exemple vis-à-vis du carbone organique) dans le passé avant que le chalutage ne devienne intense (années 1950 par exemple).

## Références bibliographiques

- Aller, R.C. (1998). Mobile deltaic and continental shelf muds as suboxic, fluidized bed reactors, *Mar. Chem.*, 61(3-4), 143-155. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(98)00024-3)
- Amoroso, R.O., C.R. Pitcher, A.D. Rijnsdorp, et al. (2018). Bottom trawl fishing footprints on the world's continental shelves, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 115, E10275–E10282. <https://doi.org/10.1073/pnas.180237911>
- ANCRE, Alliance Nationale de Coordination pour la Recherche sur l'Énergie (2022). Les puits de carbone: Quels rôles de la recherche pour accélérer leur développement en France ? <https://www.allianceenergie.fr/position-paper-les-puits-de-carbone-quels-roles-de-la-recherche-pour-accelerer-leur-developpement-en-france/>
- Arndt, S., B. B. Jorgensen, D. E. LaRowe, J. J. Middelburg, R. D. Pancost, and P. Regnier (2013), Quantifying the degradation of organic matter in marine sediments: A review and synthesis, *Earth Sci. Rev.*, 123, 53–86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.008>.
- Atwood, T.B., Witt, A., Mayorga, J., Hammill, E., and E. Sala (2020). Global patterns in marine sediment carbon stocks, *Front. Mar. Sci.*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00165>
- Bauer, J.E., Cai, W.-J., Raymond, P.A., Bianchi, T.S., Hopkinson, C.S., and P.A.G. Regnier (2013). The changing carbon cycle of the coastal ocean. *Nature* 504 (7478), 61-70. <https://www.nature.com/articles/nature12857>
- Borges, A.V., Delille, B., and Frankignoulle, M. (2005). Budgeting sinks and sources of CO<sub>2</sub> in the coastal ocean: Diversity of ecosystems counts, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L14601, <https://doi.org/10.1029/2005GL023053>
- Canals, M., P. Puig, X. Durrieu de Madron, S. Heussner, A. Palanques, and J. Fabres (2006), Flushing submarine canyons, *Nature*, 444, <https://doi.org/10.1038/nature05271>.
- Canfield, D.E. (1994). Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments, *Chem. Geol.*, 114(3-4), 315-329. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90061-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90061-2)
- Chen, C.T.A., and A. Borges (2009). Reconciling opposing views on carbon cycling in the coastal ocean: continental shelves as sinks and near-shore ecosystems as sources of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Deep-Sea Research. Part II*, 56 (8-10), 578-590. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.01.001>
- De Borger, E., J. Tiano, U. Braeckman, A.D. Rijnsdorp, and K. Soetaert (2020). Impact of bottom trawling on sediment biogeochemistry: a modeling approach, *Biogeosci.*, 18, 2539-2557, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2539-2021>
- Dellapenna, T.M., M.A. Allison, G.A. Gill, R.D. Lehman, and K.W. Warnken (2006). The impact of shrimp trawling and associated sediment resuspension in mud dominated, shallow estuaries, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 69, 519-530. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.04.024>
- Diesing, M., S. Kröger, R. Parker, C. Jenkins, C. Mason, and K. Weston (2017). Predicting the standing stock of organic carbon in surface sediments of the North–West European continental shelf, *Biogeochem.*, 135, 183-200. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0310-4>
- Dounas, C., I. Davies, G. Triantafyllou, P. Koulouri, G. Petihakis, C. Arvanitidis, G. Sourlatzis, and A. Eleftheriou (2007). Large-scale impacts of bottom trawling on shelf primary productivity, *Cont. Shelf. Res.*, 27, 2198–2210. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.05.006>

Durrieu de Madron, X., B. Ferré, G. Le Corre, C. Grenz, P. Conan, M. Pujo-Pay, R. Buscail, and O. Bodiou (2005). Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *Cont. Shelf. Res.*, 25, 2387–2409, [doi:10.1016/j.csr.2005.08.002](https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.002)

Epstein, G., Middelburg, J.J., Hawkins, J.P., Norris, C.R. and C.M. Roberts (2022). The impact of mobile demersal fishing on carbon storage in seabed sediments. *Glob Chang Biol.*, 28(9), 2875-2894. [doi.org/10.1111/gcb.16105](https://doi.org/10.1111/gcb.16105)

Ferré, B., X. Durrieu de Madron, C. Estournel, C. Ulses, and G. Le Corre (2008). Impact of natural (waves and currents) and anthropogenic (trawl) resuspension on the export of particulate matter to the open ocean: Application to the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *Cont. Shelf. Res.*, 28, 2071–2091, [doi:10.1016/j.csr.2008.02.002](https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.02.002)

Hartnett, H., Keil, R., Hedges, J. *et al.* (1998). Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature* 391, 572–75. <https://doi.org/10.1038/35351>

Hedges, J. I., and Keil, R. G. (1995). Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis. *Mar. Chem.* 49, 81-115. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(95\)00008-F](https://doi.org/10.1016/0304-4203(95)00008-F)

Hiddink, J. G., S. Jennings, M. Sciberras, C. L. Szosteka, K. M. Hugues, N. Ellis, A. D. Rijnsdorp, R. A. MacConnaughey, T. Mazor, R. Hilborn, J. S. Collie, C. R. Pitcher, R. O. Amoroso, A. M. Parma, P. Suuronen, and M. J. Kaiser (2017), Global analysis of depletion and recovery of seabed biota after bottom trawling disturbance, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 114, 8301–8306, [doi:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1618858114](https://doi.org/10.1073/pnas.1618858114).

Hiddink, J.G., S. van de Velde, R.A. MacConnaughey, E. DeBorger, F.G. O'Neill, J. Tian, M. J. Kaiser, A. Sweetman, and M. Sciberras (2021). Quantifying the carbon benefits of ending bottom trawling.

Hulth, G., S. Hulth, and P. O. J. Hall (1998), Effect of oxygen on degradation rate of refractory and labile organic matter in continental margin sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 1319-1328.

Legge, O., M. Johnson, N. Hicks, *et al.*, (2020). Carbon on the northwest European shelf: contemporary budget and future influences, *Front. Mar. Sci.*, 7, 143, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00143>

Leipe, T., F. Tauber, H. Vallius, J. Virtasalo, S. Uscinowicz, N. Kowalski, S. Hille, S. Lindgren, and T. Millyvirta (2011), Particulate organic carbon (POC) in surface sediments of the Baltic Sea, *Geomar. Sci. Lett.*, 31, 175–188, <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0223-x>.

Moriarty, J. M., C. K. Harris, M. A. M. Friedrichs, K. Fennel, and K. H. Xu (2018), Impact of seabed resuspension on oxygen and nitrogen dynamics in the northern Gulf of Mexico: A numerical modeling study, *J. Geophys. Res.*, 123, 7237–7263, [doi:https://doi.org/10.1029/2018JC013950](https://doi.org/10.1029/2018JC013950).

Moriarty, J. M., C. K. Harris, K. Fennel, M. A. M. Friedrichs, K. Xu, and C. Rabouille (2017), The roles of resuspension, diffusion and biogeochemical processes on oxygen dynamics offshore of the Rhône River, France: a numerical modeling study, *Biogeosci.*, 14, 1919–1946, [doi:doi:10.5194/bg-14-1919-2017](https://doi.org/10.5194/bg-14-1919-2017).

Morys, C., V. Bruchert, and C. Bradshaw (2021). Impacts of bottom trawling on benthic biogeochemistry in muddy sediments: Removal of surface sediment using an experimental field study, *Mar. Envir. Res.*, 169, 105384, [doi: https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105384](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105384).

Oberle, F.K.J., Storlazzi, C.D., and T.J. Hanebuth (2016). What a drag: Quantifying the global impact

of chronic bottom trawling on continental shelf sediment, *J. Mar. Syst.*, 159, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.12.007>

Oberle, F.K.J., Swarzenski, P.W., Reddy, C.M., Nelson, R.K., Baasch, B., and T.J.Hanebuth (2016). Deciphering the lithological consequences of bottom trawling to sedimentary habitats on the shelf, *J. Mar. Syst.*, 159, 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.12.008>

Palanques, A., J. Guillen, and P. Puig (2001). Impact of bottom trawling on water turbidity and muddy sediment of an unfished continental shelf, *Limnol. & Oceanogr.*, 46, 1100-1110. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.5.1100>

Paradis, S., Goñi, M., Masqué, P., Durán, R., Arjona-Camas, M., Palanques, A., and P. Puig (2021). Persistence of biogeochemical alterations of deep-sea sediments by bottom trawling. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091279. <https://doi.org/10.1029/2020GL091279>

Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R.B., Atwood, T.B., Auber, A., *et al.* (2021). Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature* 592 (7854), 397-402. [doi: 10.1038/s41586-021-03371-z](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03371-z).

Sciberras, M., R. Parker, C. Powell, C. Robertson, S. Kröger, S. Bolam, and J.G. Hiddink (2016). Impacts of bottom fishing on the sediment infaunal community and biogeochemistry of cohesive and non-cohesive sediments, *Limnol. & Oceanogr.*, 61, 2076-89. <https://doi.org/10.1002/lno.10354>

Smeaton C. and W.E.N. Austin (2022). Quality not quantity: Prioritizing the management of sedimentary organic matter across continental shelf seas. *Geophys. Res. Lett.*, 49(5), e2021GL097481. <https://doi.org/10.1029/2021GL097481>

Snelgrove, P. V. R., K. Soetaert, M. Solan, S. Thrush, C.-L. Wei, R. Danovaro, R. W. Fulweiler, H. Kitazato, B. Ingole, A. Norkko, R. J. Parkes, and N. Volkenborn (2018), Global Carbon Cycling on a Heterogeneous Seafloor, *Trends Ecol. Evol.*, 33, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.004>.

Sun, M.-Y., R. C. Aller, C. Lee, and G. S. Wakeham (2002), Effects of oxygen and redox oscillation on degradation of cell-associated lipids in surficial marine sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 2003-2012.

Tiano, J. C., R. Witbaard, M. J. N. Bergman, P. van Rijswijk, A. Trammer, D. van Oevelen, and K. Soetaert (2019). Acute impacts of bottom trawl gears on benthic metabolism and nutrient cycling, *ICES J. Mar. Sci.*, 76, 1917–1930, [doi:10.1093/icesjms/fsz060](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz060).

Tiano, J. C., Depestele, J., Van Hoey, G., Fernandes, J., van Rijswijk, P., Soetaert, K. (2022). Trawling effects on biogeochemical processes are mediated by fauna in high-energy biogenic-reef-inhabited coastal sediments. *Biogeosciences*, 19, 2583–2598, <https://doi.org/10.5194/bg-19-2583-2022>

Ulses, C., C. Estournel, X. Durrieu de Madron, and A. Palanques (2008), Suspended sediment transport in the Gulf of Lions (NW Mediterranean): Impact of extreme storms and floods, *Cont. Shelf Res.*, 28, 2048-2070, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.2001.2015>.

van de Velde, S., V. Van Lancker, S. Hidalgo-Martinez, W. Berelson, and F. J. R. Meysman (2018). Anthropogenic disturbance keeps the coastal seafloor biogeochemistry in a transient state, *Scientif. Rep.*, 8:5532, [doi:10.1038/s41598-018-23925-y](https://doi.org/10.1038/s41598-018-23925-y).

Warnken, K. W., G. A. Gill, T. M. Dellapenna, R. D. Lehman, R. D. Harper, and M. A. Allison (2003). The effects of shrimp trawling on sediment oxygen consumption and the fluxes of trace metals and nutrients from estuarine sediments, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 57, 25-42.

[https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00316-5](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00316-5)

Wang, Z., Leung, K. M. Y., Sung, Y.-H., Dudgeon, D., and Qiu, J.-W. (2021). Recovery of tropical marine benthos after a trawl ban demonstrates linkage between abiotic and biotic changes, *Nature Communications Biology*, 4(1), <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01732-y>

## Annexe bibliographique (résumés des articles et commentaires)

### Fiche 1 : Oberle, F.K.J., et al. (2016)

What a drag: Quantifying the global impact of chronic bottom trawling on continental shelf sediment, *Journal of Marine Systems*, 159, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.12.007>

Résumé: Les plateaux continentaux du monde entier sont soumis à un intense chalutage de fond qui entraîne une remise en suspension des sédiments. Les concepts traditionnels largement utilisés des systèmes modernes de transport sédimentaire sur le plateau continental reposent uniquement sur des estimations de la remise en suspension des sédiments d'origine naturelle, par exemple par les vagues de tempête, les courants de fond et les flux gravitaires, mais ils négligent un facteur anthropique critique. La forte influence du chalutage de fond sur le bilan sédimentaire source-puits est étudiée sur le plateau continental de l'Ibérie du Nord-Ouest. L'utilisation des données de suivi des navires de l'Automated Information System permet de reconstruire la trajectoire des navires à haute résolution et de calculer précisément la distribution spatiale de l'intensité du chalutage de fond et de la charge sédimentaire remise en suspension associée. La masse moyenne de **sédiments remis en suspension par le chalutage de fond pour le plateau ibérique du Nord-Ouest est de 13,50 Mt par an**, ce qui **multiplie par six le transport de sédiments hors du plateau par rapport aux mécanismes de remise en suspension naturelle**. L'analyse du bilan source-puits fournit des preuves que le chalutage de fond provoque une érosion rapide des sédiments fins à des échelles de temps humaines. En combinant les données globales de distribution des sédiments mous des plateaux avec les estimations de l'intensité du chalutage de fond à l'échelle mondiale, nous montrons que la masse de sédiments remis en suspension par le chalutage de fond représente approximativement la même masse que tous les sédiments entrant dans les plateaux par les rivières. Des délimitations spatiales entre les zones de remise en suspension des sédiments naturels et anthropiques sont présentées pour aider aux questions de gestion marine.

Commentaires:

- l'article identifie l'effort de pêche par chalutage (distance en pêche = vitesse réduite), ouverture des chaluts à panneaux (otter trawl) = 80m.
- Ensuite, à partir de corrélation de resuspension, de carte de nature des fonds (sable, silts et vases), ils calculent la resuspension qui s'opère essentiellement sur des fonds sableux
- Celle-ci est 6 fois supérieure à l'apport des fleuves en matière particulaire pour la marge ibérique (13.5 vs 2.25 Mt/an).
- Les auteurs assimilent cette resuspension à un export, ce qui paraît discutable (à comparer avec Ferré et al., 2008 et Durrieu de Madron et al., 2005).
- Pour l'export de carbone (non discuté dans ce travail), le rapport pourrait être très différent puisque les sables ont peu de carbone organique (0.1-0.2%) comparé au matériel apporté par les fleuves (2-5%)

### Fiche 2 : Durrieu de Madron, X.,et al. (2005)

Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *Cont. Shelf. Res.*, 25, 2387-2409, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.002>

Résumé: Une expérience de chalutage dédiée a été réalisée sur trois sites du plateau continental du Golfe du Lion, dans le but d'évaluer la remise en suspension de la matière particulaire et dissoute déclenchée par différents types de chaluts sur des sédiments vaseux. Les différentes configurations étaient : (i) chalut de fond, avec bobine pour corde de fond (Rockhopper) ; (ii) chalut de fond, sans bobine (Meditis) ; et (iii) chalut pélagique, remorqué à 1 et 10 m au-dessus du fond marin. Les panaches de sédiments remis en suspension ont été mesurés en utilisant l'intensité acoustique rétrodiffusée, à partir d'un ADCP remorqué. Des profils concomitants de distribution de la taille des particules, de transmission de la lumière et des échantillons d'eau ont été collectés à l'extérieur et à l'intérieur des panaches. L'analyse des données a permis de dériver les principales caractéristiques physiques et chimiques des panaches générés par les chaluts, ainsi que de

quantifier les flux de remise en suspension des éléments sédimentaires, particulaires (PN, COP) et dissous (nutriments). Le temps de résidence et la dispersion des panaches ont été suivis et modélisés, en considérant la vitesse de décantation de la matière particulaire et la turbulence proche du fond.

Les résultats indiquent que les chaluts de fond produisent une remise en suspension significative, tandis que les chaluts pélagiques de fond et de milieu de mer n'ont aucun impact sur les sédiments. Les nuages de sédiments à plusieurs centaines de mètres en arrière des chaluts de fond ont une hauteur de 3 à 6 mètres et une largeur de 70 à 200 mètres ; ils ont été générés à la fois par les portes à panneaux et par le filet. Les concentrations moyennes de sédiments en suspension mesurées dans les panaches atteignent 50 mg/l. Les flux de sédiments remis en suspension le long du trajet des chaluts vont de 190 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, pour les sédiments les plus grossiers (limon argileux) à 800 g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> pour les sédiments les plus fins (argile limoneuse). Alors que les charges d'éléments dissous (nutriments) remis en suspension dans le segment du panache suggèrent une libération d'eau interstitielle, présente au moins dans les premiers centimètres de sédiment, la charge de matière particulaire ne résulte que de la remise en suspension de moins de 1mm d'épaisseur du sédiment. Cette divergence montre qu'une très petite fraction des sédiments labourés par le chalut est effectivement injectée dans la colonne d'eau.

Commentaires:

- Cet article montre l'importance du panache soulevé par les chaluts à panneaux (5-6 mètres de haut), plusieurs centaines de mètres de distance, avec des concentrations de particules de l'ordre de 50mg/l. Cet effet est temporaire et dure quelques heures avant dépôt dans les sédiments (ici sédiments argileux et limoneux).
- Un deuxième effet, moins classique, a été observé: il s'agit du relargage vers la colonne d'eau d'eau interstitielle (contenue dans les sédiments) qui est beaucoup plus riche en nutriment (mais aussi en CID, non mesuré dans cette étude) que l'eau de fond. Ainsi, le chalutage augmente la teneur en nutriments et en carbone inorganique dissous des eaux côtières, ce qui pourrait mener à une production accrue de phytoplancton (et un puits de CO<sub>2</sub>), mais qui pourrait également mener à une source renforcée de CO<sub>2</sub> par augmentation du CID (non mesuré ni discuté dans cette étude).

### **Fiche 3 : Ferré, B., et al. (2008)**

Impact of natural (waves and currents) and anthropogenic (trawl) resuspension on the export of particulate matter to the open ocean: Application to the Gulf of Lion (NW Mediterranean), *Cont. Shelf. Res.*, 28, 2071–2091, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.02.002>

Résumé : Les dépôts de sédiments modernes sur les marges continentales constituent un vaste réservoir de matière particulaire qui est régulièrement affecté par des processus de remise en suspension. La remise en suspension par le chalutage de fond sur les plateaux à forte activité de pêche peut modifier l'échelle de la perturbation naturelle par les vagues et les courants. Des données de terrain récentes montrent que l'impact des chaluts de fond sur la remise en suspension des sédiments fins par unité de surface est comparable à celui des plus grandes tempêtes.

Nous avons évalué l'impact des processus naturels et anthropiques sur la dispersion des particules fluviales et des sédiments de plateau sur le plateau du Golfe du Lion. Nous avons réalisé des simulations numériques réalistes de la resuspension et du transport forcé par les courants et les vagues ou par une flotte de chalutiers de fond. Les simulations ont été réalisées sur une période de 16 mois (janvier 1998-avril 1999) afin de caractériser la variabilité saisonnière. La dynamique sédimentaire prend en compte la consolidation du substrat, la géométrie des rides et les caractéristiques cohésives et non-cohésives des sédiments. Les paramètres essentiels mais incertains (teneur en argile, flux d'érosion et contrainte de cisaillement critique pour les sédiments cohésifs) ont été fixés avec les données existantes. La remise en suspension par les vagues et les courants est contrôlée par la contrainte de cisaillement, tandis que la remise en suspension par les chaluts est contrôlée par la densité et la distribution de la flotte de chalutiers de fond. La remise en suspension naturelle par les vagues et les courants s'est produite principalement pendant de courts épisodes saisonniers et s'est concentrée sur le plateau intérieur.

La remise en suspension induite par les chaluts, en revanche, se produit régulièrement tout au long de l'année

et se concentre sur le plateau extérieur. L'érosion annuelle totale causée par les chaluts ( $5,6 \cdot 10^6 \text{ t.y}^{-1}$ ) était inférieure de quatre ordres de grandeur à l'érosion induite par les vagues et les courants ( $35 \cdot 10^9 \text{ t.y}^{-1}$ ). Cependant, la resuspension nette (bilan érosion/dépôt) due au chalutage ( $0,4 \cdot 10^6 \text{ t.y}^{-1}$ ) n'était inférieure que d'un ordre de grandeur à celle due aux vagues et aux courants ( $9,2 \cdot 10^6 \text{ t.y}^{-1}$ ). L'exportation hors plateau concerne la fraction la plus fine du sédiment (argiles et limons fins) et a lieu principalement à l'extrémité sud-ouest du Golfe. Le transport hors plateau a été favorisé durant l'hiver 1999 par un épisode très intense de cascade d'eau dense du plateau. L'exportation de sédiments remis en suspension par les chaluts ( $0,4 \cdot 10^6 \text{ t.y}^{-1}$ ) était inférieure d'un ordre de grandeur à l'exportation associée à la remise en suspension naturelle ( $8,5 \cdot 10^6 \text{ t.y}^{-1}$ ). On pense que la remise en suspension induite par les chaluts représente un tiers de l'exportation totale de sédiments en suspension du plateau. Une simulation combinant les deux processus de remise en suspension ne révèle aucun changement significatif dans les taux de remise en suspension et d'exportation par rapport à la somme de chaque processus individuel, ce qui suggère l'absence d'interférence entre les deux processus.

Commentaires:

- Sur le plateau du Golfe du Lion, les sédiments sont resuspendus beaucoup plus efficacement par les tempêtes que par le chalutage (10000 fois plus), mais le bilan net d'export est plus nuancé, avec un rapport de 20 entre export dû aux tempêtes et export dû au chalutage.
- Le chalutage produit la majorité de la resuspension entre 80-130m qui est rarement mobilisé par les tempêtes ou par les courants de fond. De plus, le chalutage est plus intense en été sur le plateau externe et contribue saisonnièrement à l'export de matière (jusqu'à 20% en été)
- Au final, pour le Golfe du Lion, le chalutage contribue à 7% de l'export total de particule, le reste se produisant lors de resuspension par les tempêtes et d'export par plongée d'eau dense ou par downwelling.

#### **Fiche 4 : Hiddink, J. G., et al. (2021-preprint).**

Quantifying the carbon benefits of ending bottom trawling.

Résumé : Sala et al. suggèrent que la perturbation des fonds marins par les chalutiers industriels et les dragues entraîne des émissions de  $\text{CO}_2$  aqueux de 0,58 à 1,47 Pg par an, en raison de la reminéralisation accrue du carbone organique (CO) dans les sédiments après le chalutage. Nous convenons que le chalutage de fond perturbe les flux naturels de carbone dans les écosystèmes des fonds marins en raison du mélange des sédiments, de la remise en suspension et des changements dans la communauté biologique et qu'il est important d'estimer l'ampleur de cet effet. Nous ne sommes toutefois pas d'accord avec le fait que leur évaluation représente une "estimation fiable". Premièrement, l'hypothèse selon laquelle le CO dans les sédiments non perturbés est inerte et n'est reminéralisé qu'après avoir été perturbé par le chalutage est en contradiction avec des décennies de recherche géochimique sur les processus naturels affectant le CO dans les sédiments marins. Deuxièmement, le volume de sédiments où le carbone est minéralisé après le chalutage est largement surestimé. Troisièmement, les effets secondaires, tels que l'élimination de la faune benthique bioturbante et la libération de nutriments sédimentaires, qui pourraient conduire à la préservation et à la production de CO dans les sédiments, sont ignorés. Tous ces problèmes entraînent un gonflement des émissions de  $\text{CO}_2$  estimées d'un ou plusieurs ordres de grandeur.

Commentaires:

- Mauvaise conception dans l'article de Sala et al. du carbone organique minéralisé. En fait, dans l'article de Sala, ils ignorent la minéralisation naturelle et estiment que le stock de carbone n'est affecté que par le chalutage, ce qui est, bien sûr, faux. Leur validation sur des vrais flux de sédiment reflète cette dualité recyclage naturel-recyclage lié au chalutage.
- La profondeur perturbée (2.4 cm) sur-estime la resuspension et le mélange de sédiments estimés à 0.1-0.8 cm (10% de la prof perturbée). L'effet de sur-minéralisation lié à l'exposition à l'oxygène serait donc surévalué. Par ailleurs, la constante réactive  $k$  ( $1-4 \text{ y}^{-1}$ ) est trop importante pour les profondeurs mises en jeu (de même que la fraction labile 0.7, ndlr) et ne correspond qu'à l'interface eau-sédiment.
- Le prélèvement (ou la mort) de la faune est également un élément négligé dans Sala et al. Or, celle-ci favorise la reminéralisation et son prélèvement par les engins de pêche devrait favoriser la préservation du carbone
- Supp Table 2 (compilation de 16 papiers): increased or equal mineralisation, very few cases of decreased

- mineralization
- En conclusion, les auteurs pensent que les flux de carbone calculés par Sala sont largement surestimés

### **Fiche 5 : Legge, O. et al. (2020).**

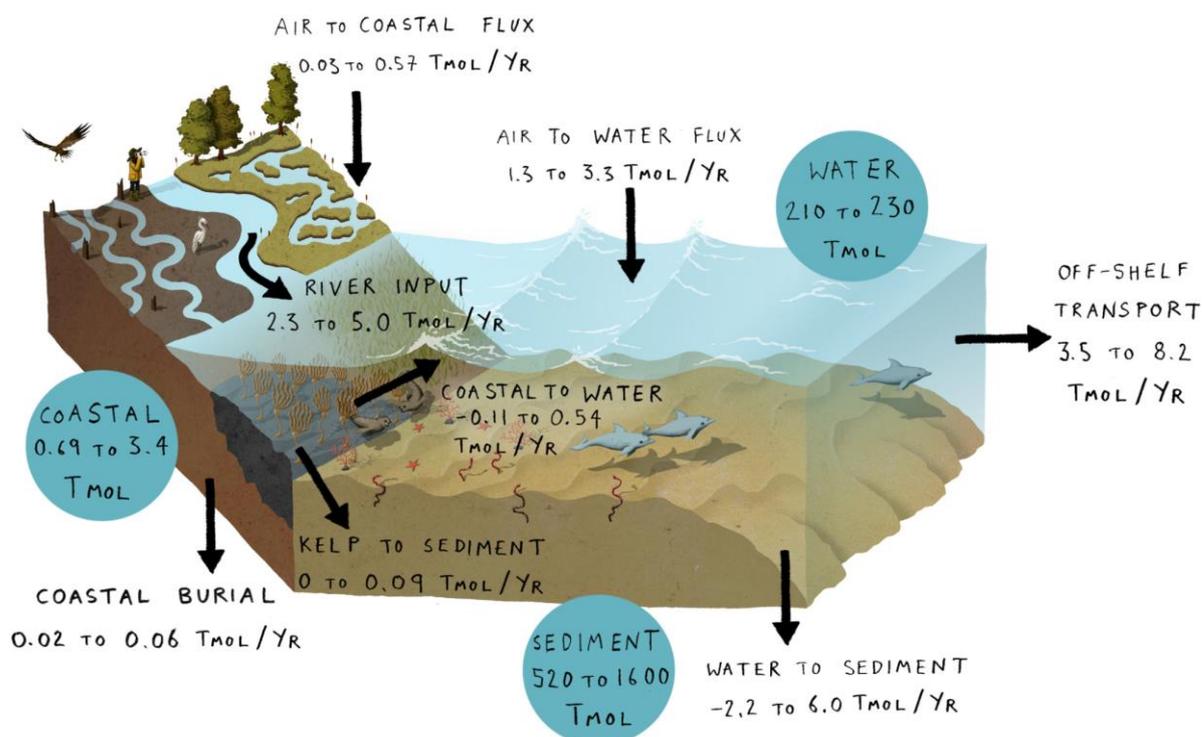
Carbon on the Northwest European Shelf: Contemporary Budget and Future Influences, *Front. Mar. Sci.*, 7, 143, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00143>

Résumé : Un bilan carbone pour les mers du plateau continental du nord-ouest de l'Europe (NWES) a été établi en utilisant les estimations disponibles pour les stocks et les flux de carbone côtiers, pélagiques et benthiques. Les principales incertitudes ont été identifiées et l'effet des impacts futurs sur le budget carbone a été évalué. L'eau des mers épicontinentales contient entre 210 et 230 Tmol de carbone et absorbe annuellement entre 1,3 et 3,3 Tmol de l'atmosphère. Le transport hors du plateau et l'enfouissement dans les sédiments représentent respectivement 60-100 et 0-40% des sorties de carbone du NWES. Ces deux flux restent mal définis par les observations et la détermination de leur ampleur et de leur importance relative est une priorité de recherche essentielle. Les stocks de carbone pélagique et benthique sont dominés par le carbone inorganique. Les sédiments du plateau continental contiennent le plus grand stock de carbone, avec entre 520 et 1600 Tmol stockés dans les 0,1 m supérieurs du fond marin. Les habitats côtiers tels que les marais salants et les vasières contiennent de grandes quantités de carbone par unité de surface, mais leurs stocks totaux de carbone sont faibles par rapport aux stocks pélagiques et benthiques en raison de leur plus faible étendue spatiale. Le grand stock de carbone pélagique continuera à augmenter en raison de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique, avec une diminution du pH associée. Les stocks et les flux de carbone pélagiques risquent également d'être affectés de manière significative par l'augmentation de l'acidité et de la température, ainsi que par les changements de circulation, mais l'impact net est incertain. Les stocks de carbone benthiques seront affectés par l'augmentation de la température et de l'acidité, ainsi que par la diminution des concentrations d'oxygène, mais l'impact net de ces changements interdépendants sur les stocks de carbone est incertain et constitue une lacune majeure dans les connaissances. L'impact du chalutage de fond sur les stocks de carbone benthique est unique parmi les impacts que nous considérons en ce sens qu'il est répandu et aussi directement gérable, bien que son effet net sur le bilan carbone soit incertain. Les habitats côtiers sont vulnérables à l'élévation du niveau de la mer et sont fortement influencés par les décisions de gestion. Les actions locales, nationales et régionales ont le potentiel de protéger ou d'améliorer le stockage de carbone, mais en fin de compte, c'est la gouvernance mondiale, via le contrôle des émissions, qui a le plus de chances d'influencer le sort à long terme des stocks de carbone sur le plateau continental de l'Europe du Nord-Ouest.

Commentaires: L'article est divisé en deux parties:

- La première partie fait état des stocks et flux de carbone dans le milieu côtier (plateau essentiellement, limité à 200 m de profondeur). Les stocks sont dominés par le carbone inorganique (95% dissous pour l'eau et 95% particulaire pour le sédiment), mais la partie réactive est le carbone organique. Les stocks benthiques de carbone organique (environ 80 Tmol C) sont moitié moins grands que les stocks de carbone inorganique dissous dans la colonne d'eau (environ 200 Tmol) dont une partie seulement peut être échangée avec l'atmosphère (1-3 Tmol/an) par le biais du CO<sub>2</sub>.
- La deuxième partie parle des altérations du système dues au changement climatique (et global) et à l'influence humaine, entre autres le chalutage (Augmentation du niveau marin, acidification baisse de l'oxygène, apports de nutriments des fleuves, changement de circulation, Aires Marines Protégées, hausse des températures, baisse salinité de surface)
- Pour le chalutage, ils évoquent la resuspension et la reminéralisation du carbone comme source, une source nouvelle de nutriments (avec du CID, ndlr) vers la zone pélagique et donc une production de plancton accrue (puits de CO<sub>2</sub>). La réduction de la biomasse benthique pourrait réduire le mélange et la pénétration d'O<sub>2</sub> et favoriser le stockage de carbone dans les sédiments (versus la minéralisation). L'effet net sur le puits de CO<sub>2</sub> est donc délicat à calculer et dépend des conditions locales. Il est souligné que l'effet du chalutage est surtout important au premier passage, ce qui impliquerait de maintenir des zones complètement non chalutées.
- En conclusion: le stock de carbone benthique est le plus important dans le côtier (surtout du PIC) et est (en partie) manageable par rapport aux impacts humains directs. Il faut donc mieux comprendre toutes les

interactions en jeu pour pouvoir décider où agir sur le cycle de C.



### Fiche 6 : De Borger et al. (2021)

Impact of bottom trawling on sediment biogeochemistry, *Biogeosciences*, 18, 2539–2557, 2021, <https://doi.org/10.5194/bg-18-2539-2021>

Résumé: Le chalutage de fond dans les mers épicontinentales peut se produire plus de 10 fois par an pour un endroit donné. Cela affecte le métabolisme benthique, par le biais d'une mortalité de la macrofaune, d'une remise en suspension de la matière organique des sédiments et de modifications de la structure physique des sédiments. Cependant, les impacts du chalutage sur la minéralisation du carbone organique et les processus associés ne sont pas bien connus. En utilisant une approche de modélisation, les effets de l'augmentation de la fréquence du chalutage sur la diagenèse précoce ont été étudiés dans cinq environnements sédimentaires différents, en simulant les effets d'un engin à pénétration plus profonde (par exemple, un chalut à perche à chaîne chatouilleuse) par rapport à un engin à pénétration moins profonde et plus variable (par exemple, un chalut à impulsion électrique). Les événements de chalutage ont fortement augmenté les concentrations d'oxygène et de nitrate dans les couches de sédiments de surface et ont conduit à des quantités significativement plus faibles d'ammonium (43 %-99 % de réduction) et de carbone organique dans les 10 cm supérieurs du sédiment (62 %-96 % de réduction). En conséquence, les taux de minéralisation totaux dans les sédiments ont été réduits jusqu'à 28 %. L'effet sur les différents processus de minéralisation différait à la fois entre les types de sédiments et entre les fréquences de chalutage. L'engin à faible pénétration a eu un effet légèrement plus faible sur la dénitrification benthique que l'engin à pénétration plus profonde, mais il n'y avait pas de résultats statistiquement différents entre les types d'engins pour tous les autres paramètres. La dénitrification a été réduite de 69 % dans un sédiment sableux fin, alors que l'élimination de l'azote a presque doublé dans une vase hautement eutrophique. Cela suggère que même des profondeurs de pénétration relativement faibles des engins de pêche de fond génèrent des altérations biogéochimiques significatives. L'élimination physique du carbone organique par la remise en suspension des sédiments induite par les chaluts, exacerbée par l'élimination de la macrofaune bioturbatrice, a été identifiée comme la cause principale des changements dans le processus de minéralisation.

Commentaires: L'article explore les impacts possibles du chalutage de fond sur le cycle du carbone et de l'azote dans les sédiments pour deux années de profondeur de pénétration différente et de fréquence de chalutage croissante du point de vue de la modélisation.

- Ils ont essentiellement utilisé leur modèle dans différents contextes environnementaux (sites allant de grossiers, limons, vaseux et eutrophes).
- Leur modèle a montré que la quantité de carbone minéralisable diminuait avec l'augmentation de la fréquence (avec plus de 90 % de CO éliminé dans tous les sites - à la fois dans les parties grossières et fines des sédiments).
- L'augmentation de la fréquence de chalutage a eu un effet sur la minéralisation totale avec une réduction de 15-25% de la minéralisation totale dans tous les types de sédiments modélisés.
- Ils montrent que le chalutage perturbe les concentrations moyennes de nitrate, d'ammonium et d'oxygène dans l'eau de porosité des sédiments, bien que l'effet sur la profondeur de pénétration de l'oxygène dans les sédiments grossiers soit marginal. Ainsi, une dénitrification accrue est observée et simulée.
- Leur étude suggère que les sites chalutés ont connu une importance accrue de la minéralisation oxygène au détriment de la minéralisation anoxique. Cependant, dans un site vaseux non perturbé, la minéralisation peut être dominée par la voie anoxique (68%).

### **Fiche 7 : Tiano et al. (2019)**

Acute impacts of bottom trawl gears on benthic metabolism and nutrient cycling, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 76, Issue 6 : 1917–1930, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz060>

Résumé: La recherche sur les impacts environnementaux des engins de pêche de fond s'est principalement concentrée sur les caractéristiques structurelles des habitats benthiques telles que la composition faunistique et les caractéristiques physiques du fond marin. Cette étude se concentre davantage sur les caractéristiques fonctionnelles en abordant les conséquences biogéochimiques associées aux engins de chalut à perche à chaîne chatouilleuse et de chalut électrique PulseWing. En juin 2017, des pêcheurs professionnels ont chaluté des transects expérimentaux avec les deux types d'engins dans la zone du front frison de la mer du Nord. Des échantillons de sédiments de type box core et des landers in situ ont été utilisés pour évaluer les flux biogéochimiques et les caractéristiques des sédiments dans les zones non chalutées et chalutées (échantillons prélevés 3,5-70 h après la pêche). Une réduction de la chlorophylle a sédimentaire a été observée, qui était plus importante à la suite de la chaîne gratteuse (83%) par rapport au chalutage PulseWing (43%). Ce déplacement du matériel de surface a provoqué des diminutions significatives de la consommation d'oxygène dans les sédiments dans les échantillons chalutés à la chaîne (41%) et au PulseWing (33%), ainsi qu'une pénétration plus profonde de l'oxygène dans les sédiments (chaîne : 3,78 mm, PulseWing : 3,17 mm) par rapport aux zones non chalutées (2,27 mm). Notre recherche implique que la perturbation du chalutage de fond peut conduire à des déclinés immédiats dans le métabolisme de la communauté benthique, avec le chalutage à chaîne chatouilleuse présentant des altérations plus importantes que le chalutage PulseWing sur les processus biogéochimiques benthiques.

Commentaires:

- Le chalutage à ailes pulsées a induit une augmentation significative des particules en suspension avec une réponse inverse de l'oxygène.
- Le chalutage entraîne une diminution significative de la concentration de chlorophylle a dans les sédiments de surface (-83% pour le filet chatouilleux, -45% pour le filet à ailettes) par rapport au site non chaluté et l'effet varie selon le type de chalutage (plus prononcé dans le filet chatouilleux que dans le chalut à ailettes).
- Aucun effet significatif sur la teneur/concentration en OC et TN entre le site témoin et le site chaluté, mais le déplacement par le chalutage entraîne l'élimination de la couche supérieure de sédiments.
- Ils ont montré que la concentration de NH<sub>4</sub> était élevée après le chalutage et qu'un approfondissement de l'OPD a été observé dans les sites chalutés par rapport à la zone non chalutée (40 % dans le filet tic-tac et 29 % dans le filet à impulsions), probablement lié à l'élimination de la couche de sédiments de surface avec son eau

interstitielle ou à une ammonification accrue.

- Le SCOC global a diminué après l'événement en raison de l'élimination de la matière organique fraîche, ce qui est contraire au rapport de Van der Velde et al 2018.

### **Fiche 8 : Dellapenna et al., (2006)**

The impact of shrimp trawling and associated sediment resuspension in mud dominated, shallow estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Volume 69 (3-4): 519-530 <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.04.024>

Résumé: Afin d'étudier l'importance relative du chalutage des crevettes sur la remise en suspension du fond marin et les caractéristiques du fond dans les estuaires peu profonds, une série d'expériences de perturbation et de surveillance ont été menées sur un site de vase de fond de baie (2,5 m de profondeur) dans la baie de Galveston, au Texas, en juillet 1998 et mai 1999. D'après les profils sédimentaires de <sup>7</sup>Be avant et après le chalutage, la concentration d'oxygène dissous et de sulfure dans l'eau interstitielle et les propriétés des sédiments en vrac, on a estimé que le chalut, y compris le filet, les panneaux du chalut et la "chaîne à chatouilles", creusait le fond marin jusqu'à une profondeur maximale d'environ 1,5 cm, la plupart des zones étant beaucoup moins perturbées. Les données sur le profil de la colonne d'eau dans le panache turbide laissé par le chalut dans ces vases sous-consolidées (85-90% de porosité ; <0,25 kPa de résistance au cisaillement sans drainage) démontrent que des inventaires de sédiments en suspension allant jusqu'à 85-90 mg/cm<sup>2</sup> sont produits immédiatement derrière le filet de chalut ; un ordre de grandeur plus élevé que les inventaires avant chalutage et comparable à ceux observés pendant un événement de vent de 9-10 m/s sur le site d'étude. La décantation et la dispersion du panache ont fait que les inventaires de sédiments en suspension sont revenus aux valeurs d'avant le passage du chalut environ 14 minutes après le passage du chalut dans deux expériences distinctes, ce qui indique que les particules se redéposent principalement sous forme de floes avant de pouvoir être largement dispersées par les courants locaux. Suite au passage du chalut sur le fond marin, la résistance au cisaillement de la surface des sédiments n'a pas montré d'augmentation significative, ce qui suggère que le blindage du lit n'a pas lieu et que les zones chalutées ne montreront pas d'augmentation de la contrainte de cisaillement critique.

Commentaires:

- La mesure au pénétromètre n'a montré aucune différence entre la résistance au cisaillement avant et après le chalutage.
- Les radiographies X ont montré une bioturbation intense dans les 20 cm supérieurs du sédiment après le chalutage.
- Les profils de <sup>7</sup>Be ne montrent pas de tendances claires entre les carottes avant et après le chalutage (peut-être en raison de la résolution verticale grossière de la mesure).
- La profondeur du potentiel redox mesuré par O<sub>2</sub> et SO<sub>4</sub> a été multipliée par 3 entre les sédiments pré et post chalutage (la couche de profondeur varie de 0,5 à 0,75 cm).
- Déplacement de la transmissivité de la colonne d'eau (mesurée par le taux de solides en suspension/turbidité) après l'événement.

### **Fiche 9 : Morys et al. (2021)**

Impacts of bottom trawling on benthic biogeochemistry in muddy sediments: Removal of surface sediment using an experimental field study. Marine Environmental Research, Volume 169, 105384, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105384>

Résumé: Un dragage benthique expérimental a été réalisé dans une zone vaseuse non pêchée de la Baltique proprement dite afin d'imiter l'impact du chalutage en retirant les sédiments de surface, en se concentrant sur les processus biogéochimiques benthiques. Des carottes de sédiments ont été prélevées sur la voie et comparées à des témoins non perturbés. Les flux benthiques ont été immédiatement affectés et un déplacement vers le haut des profils CID de l'eau interstitielle a été détecté. Le temps nécessaire aux sédiments pour se réajuster à un nouvel état biogéochimique semble être spécifique aux nutriments. On a constaté que les propriétés des sédiments (profils de chlorophylle, de carbone organique et de teneur en eau) changeaient de manière significative. La macrofaune a été complètement éliminée par la drague, ce qui souligne la perte potentielle des fonctions très précieuses qui leur sont associées. Dans la mer Baltique, dans les zones qui

étaient auparavant les plus pêchées, la fréquence du chalutage peut avoir laissé peu de temps pour un réajustement et potentiellement maintenu le fond marin dans un état permanent de cycle biogéochimique transitoire.

Commentaires:

- À l'aide d'un travail expérimental avec une couche enlevée de 2,5 à 3 cm, ils ont montré que l'enlèvement des sédiments superficiels par chalutage peut entraîner une diminution de la chlorophylle et une perte de carbone organique de 25 à 50 % par l'enlèvement de la couche enrichie en surface
- Les sites chalutés subissent une perte de macrofaune, vitale pour la restauration des sédiments après la perturbation.
- Les sites chalutés connaissent une diminution de la concentration de CID dans le centimètre supérieur (aucun flux de CID n'est mesuré).
- La zone chalutée connaît une augmentation jusqu'à 4 fois plus importante du flux de NH<sub>4</sub> par rapport au site non chaluté juste après la perturbation (jour 1-2), qui diminue rapidement après (jour 6-7).
- Le flux de phosphate a augmenté de 50-600% et est resté élevé pendant toute la semaine de l'expérience.
- Le taux de consommation d'oxygène était significativement plus faible dans la zone chalutée que dans la zone non chalutée.

### **Fiche 10 : Tiano et al. (2022)**

Trawling effects on biogeochemical processes are mediated by fauna in high-energy biogenic-reef-inhabited coastal sediments. *Biogeosciences*, 19, 2583–2598 (10), <https://doi.org/10.5194/bg-19-2583-2022>

Résumé : Les environnements dynamiques et sablonneux sont généralement moins vulnérables aux contraintes mécaniques que les habitats limoneux à faible énergie. Les communautés de récifs biogènes, cependant, peuvent cependant faire exception à cette règle. Cette étude explore les effets physiques, biologiques et biogéochimiques de la pêche au chalut de fond sur un écosystème côtier dominé par le polychète tubicole *Lanice conchilega*. Deux types d'engins spécifiques, tous deux utilisés pour exploiter la sole de la mer du Nord (*Solea solea*), ont été comparés : les chaluts à impulsions électriques et les chaluts à perche équipés de chaînes chatouilleuses. Nous avons détecté un approfondissement bathymétrique de ~ 1 cm après le chalutage associé à des pertes significatives de chlorophylle a benthique causées par les deux engins de pêche. Les chaluts à chaînes ont réduit de façon significative la consommation d'oxygène dans les sédiments (57 %), la minéralisation de la matière organique totale (56 %), de la dénitrification (61 %), de la nitrification (60 %) et les densités totales du benthos (52 %), tandis que les chaluts à impulsions n'ont pas eu d'impact statistiquement significatif sur ces paramètres. Avant le chalutage, des relations significatives ont pu être trouvées entre *L. conchilega* et les fractions de sable très fin, les flux d'oxygène et de nitrate, les densités de macrobenthos, et la richesse en espèces ; cependant, les perturbations causées par le chalutage des deux engins ont perturbé ces liens. Nos résultats suggèrent que l'effet moyen des chaluts à percussion est moins important que celui des chaluts à perche pour plusieurs caractéristiques écologiques et biogéochimiques, bien que leur impact soit encore significatif pour *L. conchilega* et les espèces associées. Cette étude suggère également que les fonctions de l'écosystème liées à la faune dans les habitats dominés par *L. conchilega* peuvent être sensibles à la pénétration relativement peu profonde des engins de chalutage et devraient être prises en compte lors de l'évaluation de la vulnérabilité de l'habitat.

### **Fiche 11 : Luisetti et al. (2018)**

Quantifying and valuing carbon flows and stores in coastal and shelf ecosystems in the UK. *Ecosystem Services*, 35, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.10.013>

Résumé : Il est prouvé que les habitats susceptibles d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre, en absorbant et en stockant le CO<sub>2</sub>, sont en train de disparaître en raison des effets des activités humaines en cours et du changement climatique. Le stockage du carbone par les habitats terrestres (par exemple, les forêts tropicales) et le rôle des habitats côtiers (le "carbone bleu") en tant que puits de carbone sont bien connus. Les sédiments du plateau continental sont également un réservoir de carbone gérable, couvrant ~9% de la zone marine mondiale, mais ne sont pas actuellement protégés par des accords internationaux permettant leur conservation. Par le biais d'une analyse de scénario, nous explorons la valeur économique des dommages

que les activités humaines et le changement climatique peuvent infliger aux habitats marins du Royaume-Uni, y compris les sédiments marins du plateau continental. Dans un scénario d'augmentation des pressions humaines et climatiques sur une période de 25 ans, nous estimons les coûts des dommages jusqu'à 12,5 milliards de dollars américains pour le dégagement de carbone lié à la perturbation des réserves de carbone des sédiments marins côtiers et du plateau continental. Il peut être possible de gérer la pression socio-économique afin de maintenir le stockage de carbone sédimentaire, mais les compromis avec d'autres avantages sociaux mondiaux tels que la sécurité alimentaire devront être pris en compte. Pour développer des mécanismes d'incitation efficaces visant à préserver ces précieux écosystèmes côtiers et marins dans un cadre de gouvernance durable, des preuves solides sont nécessaires.

Commentaires: L'article traite des habitats côtiers (marais, zones humides, hors contexte pour notre étude) et des effets du chalutage sur le recyclage du carbone dans les sédiments des plateaux continentaux (zone UK uniquement). Elle a étudié l'effet du chalutage sur les 10 premiers centimètres, à une profondeur comprise entre 0 et 200 mètres. Elle estime que le chalutage a pour effet de reminéraliser du carbone organique stocké et donc à relâcher du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, et tente aussi d'évaluer le coût que représente cette « perturbation » au regard des bénéfices pour le « bien commun ». Les hypothèses sont fortes concernant la remise en suspension et la minéralisation du carbone:

- stock de carbone dans les 10 premiers sédiments allant de 360 à 900 gC/m<sup>2</sup>
- Remise en suspension de 20 kgC/ha (2 gC/m<sup>2</sup>, cf Dounas 2007) correspondant à <1mm de sédiment resuspendu (cf De Madron 2005)
- Total recyclage de ce carbone dans la colonne d'eau
- Toute la surface du plateau est chalutée 1 fois par an

Le bilan calculé est de 0.9MtC/yr (surface 0.5Mkm<sup>2</sup>). C'est un maximum car la minéralisation est considérée comme totale dans la colonne d'eau après resuspension. Extrapolée aux plateaux du globe (30Mkm<sup>2</sup>), la valeur du flux de carbone minéralisé est 54MtC/yr (0.05 GtC/y). Pour une surface chalutée de 5Mkm<sup>2</sup> (Sala 2021), la valeur serait de 9MtC/y (0.01 GtC/y), loin des estimations de Sala (2021) de 1.47GtC/yr. Mon avis est qu'elle demeure critiquable par les nombreuses hypothèses retenues : elle estime entre autres une reminéralisation de 100% du carbone organique stocké dans tous les sédiments perturbés par le passage d'un chalut, ce qui supposerait que toutes les zones sont chalutées avec un engin unique, mais aussi que le passage d'un chalut est réalisé sur un sédiment qui n'a jamais été chaluté ou perturbé par un autre forçage (tempête ?) précédemment.

## **Fiche 12 : Hiddink et al.,(2022)**

Trawl impacts on the relative status of biotic communities of seabed sedimentary habitats in 24 regions worldwide, PNAS, 119 (2) e2109449119. <https://doi.org/10.1073/pnas.21094491>

Résumé: Le chalutage de fond est l'activité humaine la plus répandue qui affecte les habitats des fonds marins. Ici, nous rassemblons toutes les données disponibles pour les études expérimentales et comparatives des impacts du chalutage sur des communautés entières de macroinvertébrés des fonds marins sur les habitats sédimentaires et nous développons des méthodes largement applicables pour estimer les taux d'épuisement et de récupération du biote après le chalutage. L'appauvrissement du biote et la pénétration du chalut dans le fond marin sont fortement corrélés. Les chaluts à panneaux ont causé le moins d'appauvrissement, retirant 6 % du biote par passage et pénétrant le fond marin en moyenne jusqu'à 2,4 cm, tandis que les dragues hydrauliques ont causé le plus d'appauvrissement, retirant 41 % du biote et pénétrant le fond marin en moyenne de 16,1 cm. Les temps de récupération médians après le chalutage (de 50 à 95 % de la biomasse non touchée) varient entre 1,9 et 6,4 ans. En tenant compte des effets de la profondeur de pénétration, de la variation environnementale et de l'incertitude, les modèles ont expliqué une grande partie de la variabilité des estimations d'épuisement et de récupération provenant d'études individuelles. Associées à des cartes à grande échelle et à haute résolution de la fréquence du chalutage et de

l'habitat, nos estimations des taux d'épuisement et de récupération permettent d'évaluer les impacts du chalutage à des échelles spatiales sans précédent.

### **Fiche 13 : Sciberras et al. (2016)**

Impacts of bottom fishing on the sediment infaunal community and biogeochemistry of cohesive and non-cohesive sediments. *Limnol. & Oceanogr.*, 61(6), 2076-2089. <https://doi.org/10.1002/lno.10354>

Résumé: Nous étudions l'effet du dragage des coquilles Saint-Jacques sur le sable et du chalutage sur la vase en mesurant les changements dans la communauté benthique et les processus biogéochimiques qu'ils médiatisent. Nous supposons que les changements biogéochimiques dus à la pêche seront plus importants dans la vase, où les processus médiés par la macrofaune devraient jouer un rôle plus important, que dans le sable, où l'hydrodynamisme est le médiateur du système redox. Nous avons échantillonné la faune benthique, les nutriments de l'eau de porosité des sédiments, l'oxygène, la chlorophylle a (Chl a), la couche de discontinuité du potentiel redox apparent, le carbone organique et la teneur en azote sur un gradient d'intensité de pêche dans le sable et la vase. Les effets de la pêche sur la biogéochimie étaient plus forts sur la vase que sur le sable, où la biogéochimie semblait être plus fortement influencée par les courants de marée et les vagues. Sur la vase, le chalutage a augmenté la concentration de Chl a et d'ammonium à la surface du sédiment au-delà de 5 cm de profondeur, mais a diminué la concentration d'ammonium et de silicate dans les couches supérieures du sédiment. Les effets de la faune et du potentiel de bioturbation sur la biogéochimie étaient très limités dans les habitats de vase et de sable. Nos résultats suggèrent que le chalutage des loutres peut affecter la reminéralisation de la matière organique et le cycle des nutriments par la remise en suspension des sédiments et l'enfouissement de la matière organique en profondeur plutôt que par la perte du potentiel de bioturbation de la communauté benthique. En conclusion, notre hypothèse selon laquelle les effets du chalutage sur la biogéochimie sont plus importants dans la vase est confirmée, mais l'hypothèse selon laquelle ces effets sont modulés par des changements dans la faune ne l'est pas. Ces résultats impliquent que la gestion du chalutage sur les sédiments vaseux devrait avoir une priorité plus élevée.

**Intérêt :** comparaison sédiment sableux (non cohésifs) et vaseux (cohésif). Mesures d'OPD, Carbone organique (%), Chl a, Nutriments. Effet de la fréquence de chalutage.

### **Fiche 14 : Dounas et al. (2007)**

Large-scale impacts of bottom trawling on shelf primary productivity, *Continental Shelf Research*, 27 (17), 2198-2210. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.05.006>

Résumé: La perturbation des fonds marins résultant du chalutage de fond affecte les processus des écosystèmes, tels que le taux et l'ampleur de la régénération des nutriments. Les réponses potentielles de la communauté planctonique résultant de tels effets peuvent être modélisées, à condition que des données fiables sur les effets sur les flux de nutriments soient disponibles. Dans une zone de pêche de la partie externe du plateau continental et de la et de la partie supérieure du plateau continental (baie d'Héraklion, Crète, Méditerranée orientale), nous avons appliqué un nouvel instrument de terrain qui peut simuler le passage des chaluts sur le fond de la mer et nous avons effectué des mesures saisonnières directes du taux de libération de nutriments dissous et particuliers résultant de la perturbation du fond marin. Ces données d'observation ont ensuite été intégrées dans un modèle d'écosystème en 3D. Les résultats ont révélé que le chalutage de fond peut déclencher des impulsions de productivité considérables, en plus des pulsations du cycle saisonnier naturel.

Commentaires: Les auteurs décrivent des mesures et des modèles de resuspension de particules et d'eau interstitielles et simulent les effets sur la production primaire. Le taux de resuspension du COP est de 2-3 gC/m<sup>2</sup> selon la profondeur et la teneur en Org-C du sédiment. Pour la remise en suspension des eaux interstitielles,

les flux sont situés entre 200-700  $\mu\text{molN}/\text{m}^2$  (Tableau 2), ce qui équivaudrait à 2-7  $\text{mmolC}/\text{m}^2$  (25-85  $\text{mgC}/\text{m}^2$ ; 0.02-0.08  $\text{gC}/\text{m}^2$ ) avec un rapport CID/DIN de 10. Ceci correspond donc à un apport 20-100 fois plus faible de CID que de COP.

### **Fiche 15 : Diesing et al. (2017)**

Predicting the standing stock of organic carbon in surface sediments of the North–West European continental shelf. *Biogeochemistry* 135, 183-200. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0310-4>

**Résumé:** Les mers épicontinentales et les habitats benthiques qui leur sont associés représentent des systèmes clés dans le cycle mondial du carbone. Cependant, la quantification des stocks et des flux de carbone qui y sont liés est souvent mal maîtrisée. Pour étudier le stockage du carbone benthique sur le plateau continental du nord-ouest de l'Europe, nous avons prédit spatialement la masse de carbone organique particulaire (POC) stockée dans les 10 cm supérieurs des sédiments du plateau dans certaines parties de la mer du Nord, de la Manche et de la mer Celtique en utilisant un modèle Random Forest, des mesures de POC sur les sédiments de surface de ces mers et des variables prédictives pertinentes. Le modèle présenté explique 78% de la variance des données et nous estimons qu'environ 250 millions de tonnes de POC sont stockées dans les sédiments superficiels de la zone d'étude (633 000  $\text{km}^2$ ). L'extrapolation à la zone du plateau continental du nord-ouest de l'Europe (1 111 812  $\text{km}^2$ ) a donné une fourchette de 230 à 882 Mt de POC. 230-882 Mt de POC, l'estimation la plus probable étant de l'ordre de 476 Mt. Nous démontrons que les stocks de POC les plus importants sont associés aux sédiments à gros grains en raison de leur présence étendue et de leurs densités élevées de matière sèche. Nos résultats soulignent également l'importance des sédiments côtiers pour le stockage et la séquestration du carbone. Les prédicteurs importants pour le POC comprennent la teneur en vase des sédiments superficiels, la température moyenne annuelle du fond et la distance par rapport au littoral, cette dernière pouvant être une approximation des apports terrestres. Maintenant que les variables clés de la détermination de la distribution spatiale du POC ont été identifiées, il est possible de prédire les changements futurs du stock de POC, les cartes présentées fournissant une base de référence précise pour évaluer les changements prévus.

**Commentaires:** Cet article s'intéresse davantage à l'évaluation du stock de carbone que des effets sur la libération de ce carbone organique stocké, intéressant toutefois pour démontrer l'existence d'une grande variabilité entre les différents types de sédiments qui composent le plateau continental. Le stock de carbone dans les mers européennes est estimé à 476 MtC pour une surface de 1.1M $\text{km}^2$  pour une profondeur de 10 cm. Les valeurs rapportées au  $\text{m}^2$  sont de 390  $\text{g}/\text{m}^2$ . Une extrapolation de ce chiffre nous donne au niveau global (30M $\text{km}^2$ ) environ 13 GtC stockés dans les plateaux continentaux au niveau global. Ce chiffre contraste avec Atwood (2020) qui estime à 266 GtC le stock de carbone des plateaux continentaux (pour 1 mètre de sédiment) soient 26 GtC pour 10 cm car ils font l'hypothèse de teneur en COP constante avec la profondeur dans les sédiments jusqu'à 1 mètre.

### **Fiche 16: Atwood et al. (2020)**

Global patterns in marine sediment carbon stocks, *Frontiers in Marine Science*, 7, <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00165> (version révisée)

**Résumé:** Pour établir des bilans mondiaux plus précis du carbone (C) et mieux informer la gestion des activités humaines dans l'océan, nous avons besoin d'estimations à haute résolution des stocks de C marin. Nous quantifions ici les stocks mondiaux de carbone sédimentaire marin à une résolution de 1 km et constatons que les sédiments marins stockent 2322 (2239–2391) Pg C dans les 1 m supérieurs (plus du double des sols terrestres). Les sédiments des abysses et des bassins représentent 75 % du stock mondial de carbone dans les

sédiments marins, et 52 % de ce stock se trouve dans les zones économiques exclusives de 200 milles des pays. Actuellement, seuls 2% des stocks de C sédimentaire sont situés dans des zones hautement ou totalement protégées qui empêchent la perturbation du fond marin. Nos résultats montrent que les sédiments marins représentent un puits de carbone important à l'échelle mondiale. Cependant, le manque de protection des stocks de carbone marin les rend très vulnérables aux perturbations humaines qui peuvent conduire à leur reminéralisation en CO<sub>2</sub>, aggravant encore les impacts du changement climatique.

Commentaires: Pour le plateau continental les auteurs adoptent des teneurs intégrées de 19000 gC/m<sup>2</sup> pour 1 m de profondeur. Rapportée à 10 cm (1900 gC/m<sup>2</sup>), cette teneur est environ 5 fois plus grande que celle de Diesing (2017) qui est de 390 gC/m<sup>2</sup>. Avec ces teneurs, ils calculent un stock de 266 GtC (sur 1 m de profondeur) pour les plateaux continentaux au niveau global, soient 26 GtC pour 10 cm. C'est 2 fois plus que l'extrapolation de Diesing 2017, mais cela dépend du type de sédiment, notamment Arctique qui représentent une forte proportion de plateaux continentaux peu échantillonnée.

Il est estimé que seule une petite fraction des sédiments est située dans une zone marine totalement protégée (2%) et qu'il faudrait étendre la protection contre la resuspension pour préserver ce stock de carbone.

### **Fiche 17 : Warnken et al., (2003)**

The effects of shrimp trawling on sediment oxygen consumption and the fluxes of trace metals and nutrients from estuarine sediments, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57 (1–2),: 25-42. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00316-5](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00316-5)

Résumé: Les effets du chalutage des crevettes sur la consommation d'oxygène des sédiments et les flux d'échange sédiments-eau des nutriments (ammonium, phosphate et silicate) et des métaux traces (Mn, Ni, Cu, Cd et Pb) ont été déterminés pour deux expériences distinctes menées en juillet 1998 et mai 1999. Les mesures de microélectrodes d'oxygène ont montré que pendant l'expérience de 1998, les sédiments de surface étaient oxygènes jusqu'à des profondeurs d'environ 15 mm, ce qui suggère que la zone d'étude n'avait pas été récemment chalutée. Cependant, après le passage de l'engin de chalutage, l'oxygène était présent à des profondeurs de seulement 5 mm. Ceci suggère une remise en suspension des 1 cm supérieurs de sédiments et a entraîné une augmentation des flux d'ammonium et de manganèse par un facteur de 2 à 3, ce qui a été attribué à un mécanisme similaire, c'est-à-dire un renforcement du gradient diffusif. Les flux mesurés d'oxygène, de phosphate et des métaux traces Ni, Cu et Pb n'ont pas été affectés par le chalutage, alors que le flux de Cd a été affecté.

Au cours de l'expérience de chalutage de crevettes de 1999, la pénétration de l'oxygène avant et après le chalutage était limitée aux 1 mm supérieurs de sédiments, ce qui suggère que la zone avait été récemment chalutée. Les flux diffusifs d'oxygène étaient en accord avec les flux d'oxygène mesurés directement, à la fois avant et après le chalutage ; une indication supplémentaire que le chalutage a eu peu ou pas d'effet sur l'échange d'oxygène à travers l'interface sédiment-eau pendant cette période. L'abondance de la macrofaune a été considérablement réduite en 1999, ce qui est cohérent avec les taux de consommation d'oxygène des sédiments, qui étaient également plus faibles à cette époque. Il en résulte que les flux d'oxygène, qui ont été augmentés par des processus biologiques en 1998, sont devenus contrôlés par diffusion en 1999. Les flux d'oxygène, d'ammonium, de silicate, de Mn, de Ni, de Cu et de Pb avant et après le chalutage ne différaient donc pas de manière significative, si l'on tient compte de l'erreur de mesure. Le Cd semble à nouveau affecté par les activités de chalutage des crevettes.

Une augmentation ou une diminution du temps de renouvellement d'un métal trace (le temps en jours nécessaire pour reconstituer la concentration dans la colonne d'eau) peut avoir des implications importantes sur la santé globale d'un estuaire. Dans la baie de Galveston, les temps de renouvellement des métaux traces étaient en moyenne de 0,4±0,5, 52±32, 27±15, 22±23 et 5,3±3,0 jours pour Mn, Ni, Cu, Cd et Pb, respectivement. Ces temps de renouvellement relativement courts indiquent que les sédiments peuvent être une source importante de métaux traces pour la colonne d'eau sus-jacente, en particulier pendant les périodes d'étiage de la rivière Trinity, qui peuvent parfois durer plus d'un an. Ceci, à son tour, pourrait éventuellement conduire aux comportements de mélange non-conservatifs, à la fois pour les nutriments et les métaux traces, précédemment rapportés pour la région de la baie de la Trinité de la baie de Galveston, alors qu'un mélange conservatif est observé dans la partie inférieure de l'estuaire.

Notre étude montre que les effets du chalutage des crevettes dépendent largement des conditions redox qui

règnent dans les sédiments, en raison de la faible profondeur de pénétration de l'oxygène et de l'engin de chalutage. Il est donc peu probable que les activités de chalutage nuisent à la santé générale de la baie de Galveston. Cependant, le chalutage répété avec enlèvement des couches supérieures de sédiments oxiques pourrait faire évoluer les sédiments de surface vers l'anoxie et, en fin de compte, entraîner des changements dans le couplage benthique-pélagique.

Commentaires: Cette étude montre des flux d'oxygène constants avant et après le chalutage au printemps et en été, que la zone ait été chalutée récemment ou non. Les profils ont été acquis juste après ou le jour suivant le chalutage, ce qui montre que l'effet sur la minéralisation n'est probablement pas marqué dans ce cas.

Par ailleurs, les auteurs indiquent une augmentation du flux de  $\text{NH}_4$  d'un facteur 2-3 immédiatement après le chalutage (+4 mmol/m<sup>2</sup>/d). Ils l'attribuent au décapage de la couche de surface du sédiment et à l'exposition d'eau interstitielles plus riches en sels nutritifs (et également en CID, non mesurés dans cette étude).

### **Fiche 18 : Smeaton and Austin (2022)**

Quality not quantity: Prioritizing the management of sedimentary organic matter across continental shelf seas. *Geophysical Research Letters*, e2021GL097481, <https://doi.org/10.1029/2021GL097481>

Résumé: La perturbation des sédiments marins entraîne la reminéralisation de la matière organique sédimentaire (MO) et a un impact sur les processus d'enfouissement naturel. Les interventions de gestion qui limitent ou suppriment les activités causant des perturbations du fond marin peuvent offrir des stratégies efficaces pour protéger les plus vulnérables de ces stocks de MO des mers épicontinentales, offrant ainsi de nouvelles possibilités de mettre en œuvre des mesures d'atténuation du changement climatique. Si les plus grandes quantités de MO sont souvent stockées dans les vastes régions au large des plateaux continentaux et pourraient donc suggérer des zones appropriées pour des interventions de gestion visant à protéger les stocks vulnérables de MO, nos résultats soulignent que ces régions offshore contiennent généralement de la MO à faible réactivité. À l'inverse, les sédiments côtiers stockent des quantités significatives de MO hautement réactive, qui n'est pas à l'abri d'un risque de contamination. En revanche, les sédiments côtiers stockent d'importantes quantités de MO hautement réactive qui présente un risque accru de reminéralisation lorsqu'elle est perturbée. Les disparités spatiales marquées entre la réactivité de la MO dans les environnements sédimentaires des mers épicontinentales soulignent la nécessité d'orienter les politiques émergentes et les futures interventions de gestion vers la protection des sédiments côtiers.

### **Fiche 19 : Paradis et al. (2021)**

Persistence of biogeochemical alterations of deep-sea sediments by bottom trawling. *Geophysical Research Letters*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2020GL091279>

Résumé: Les zones de chalutage de fond se sont étendues aux zones plus profondes des océans depuis le milieu du XXe siècle, et des stratégies d'atténuation visant à protéger les stocks de poissons, telles que les fermetures temporelles du chalutage, ont récemment été mises en œuvre. Nous avons étudié les propriétés biogéochimiques des sédiments provenant d'une zone de chalutage en eaux profondes dans le canyon de Palamós (Méditerranée du Nord-Ouest) afin d'évaluer les effets d'une fermeture du chalutage pendant deux mois sur la récupération de la matière organique sédimentaire. Par rapport aux zones non chalutées, l'érosion continue et le mélange des sédiments dans les zones de chalutage ont conduit à des sédiments remaniés plus grossiers appauvris en carbone organique (~30% de perte) et ont favorisé la dégradation des composés labiles (52-70% de perte). Ces impacts ont persisté après la fermeture temporaire du chalutage, soulignant que cette stratégie de gestion est insuffisante pour restaurer les fonds marins. Compte tenu de l'expansion continue des zones de chalutage de fond, cette activité pourrait avoir des impacts biogéochimiques significatifs et irréversibles sur les marges océaniques à l'échelle mondiale, entravant leur capacité d'enfouissement du carbone.

Commentaires: étude de deux sites par carottage, situés à la même profondeur de part et d'autre d'un canyon

en Méditerranée. Le site non chaluté possède 30% de plus de carbone et est beaucoup plus riche en carbone labile (sujet à dégradation) que le site chaluté. Il y a une perte nette de matière fine (le sédiment est largement plus grossier du côté chaluté).

Par ailleurs, deux mois non chalutés (sur le site chaluté) ont permis de recomposer une partie des stocks de crevette, mais le sédiment n'a pas récupéré son carbone initial. D'après les auteurs, il faudrait plusieurs décades pour accumuler assez de sédiments fins pour retrouver une concentration de carbone organique des sédiments non chalutés (attention, cette approche ne prend pas en compte la bioturbation).

### **Fiche 20: Epstein et al. (2022)**

The impact of mobile demersal fishing on carbon storage in seabed sediments. *Global Change Biology*, 28(9), 2875-2894. <https://doi.org/10.1111/gcb.16105>

**Résumé:** Les sédiments marins subtidaux constituent l'une des principales réserves de carbone de la planète et influencent fortement le puits océanique de CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'activité humaine de loin la plus répandue sur les fonds marins est le chalutage et le dragage de fond pour la pêche et la conchyliculture. Selon une estimation mondiale de premier ordre, les activités de pêche démersale mobile pourraient entraîner la reminéralisation annuelle de 0,16 à 0,4 Gt de carbone organique (CO) provenant des réserves de carbone des sédiments marins (Sala et al., 2021). Ce calcul comporte toutefois de nombreuses incertitudes. Ici, nous discutons des facteurs potentiels de changement dans les réserves de CO des sédiments marins dus aux activités de pêche démersale mobile et nous effectuons une revue de la littérature, synthétisant les études où cette interaction a été directement étudiée. Dans certains contextes environnementaux, nous émettons l'hypothèse que la pêche démersale mobile réduirait le CO dans les réserves des fonds marins en raison d'une production plus faible de flore et de faune, de la perte de matériaux flocculants fins, d'une augmentation de la remise en suspension, du mélange et du transport des sédiments et d'une exposition accrue à l'oxygène. Ces réductions seraient compensées, à des degrés divers, par une diminution de la bioturbation de la faune et de la respiration des communautés, une augmentation du transport hors du plateau continental et une augmentation de la production primaire due à la remise en suspension des nutriments. Les études qui ont directement examiné l'impact de la pêche démersale sur les stocks de CO ont donné des résultats mitigés. Dans 61 % des 49 études, aucun effet significatif n'a été constaté ; 29 % ont fait état d'une diminution de la teneur en CO due aux activités de pêche, et 10 % d'une augmentation du CO. En ce qui concerne les taux de reminéralisation dans les fonds marins, quatre enquêtes ont indiqué que les activités de pêche démersale réduisaient la reminéralisation, tandis que trois autres ont fait état de taux de reminéralisation plus élevés. Les modèles des caractéristiques environnementales et expérimentales entre les différents résultats étaient largement indistincts. Il est urgent d'obtenir davantage de preuves pour quantifier avec précision l'impact des perturbations physiques anthropiques sur le carbone des fonds marins dans différents contextes environnementaux et pour intégrer des considérations sur le carbone fondées sur des preuves complètes dans la gestion globale des fonds marins.

**Commentaires:** une review complète et équilibrée des processus importants pour le contrôle des flux et de la préservation du carbone dans les sédiments chalutés. La conclusion est que la majorité des études menées montre un effet net proche de zéro du chalutage/dragage sur les bilans de carbone dans les sédiments (61% des études). 30% des études indiquent une diminution du stockage de carbone, donc une source de CO<sub>2</sub> et 10% d'une augmentation du stockage. L'article conclut sur le fait qu'on manque d'étude de long terme intégrées pour aborder les questions de bilan avec plus de certitude.

### **Fiche 21 - Van der Velde et al. (2018)**

Anthropogenic disturbance keeps the coastal seafloor biogeochemistry in a transient state, *Scientific Rep.*, 8:5532, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23925-y>

Résumé: Les sédiments côtiers et les plateaux continentaux jouent un rôle crucial dans la biogéochimie mondiale, car ils constituent le principal site d'enfouissement du carbone organique. On sait que le chalutage de fond et le dragage ont un impact croissant sur les fonds marins côtiers en raison du déplacement et de l'homogénéisation des sédiments, mais on sait peu de choses sur les effets de ce remaniement anthropique des sédiments sur le cycle global du carbone et d'autres éléments dans les fonds marins côtiers. Nous documentons ici le rétablissement transitoire de la biogéochimie des fonds marins après une perturbation in situ. Les données sur l'eau interstitielle et les simulations de modèles révèlent une augmentation à court terme du taux global de minéralisation du carbone, ainsi qu'un changement à plus long terme des voies d'oxydoréduction de la minéralisation de la matière organique, favorisant la réduction des sulfates organoclastiques au détriment de la formation de méthane. Ces données suggèrent que le remaniement anthropique des sédiments pourrait avoir un impact considérable sur le cycle du carbone dans les sédiments cohésifs des plateaux continentaux. Cet impact augmentera dans un avenir proche, parallèlement à l'exploitation économique croissante de l'océan côtier.

#### Commentaires:

- En utilisant l'analyse de modélisation, le potentiel chalutage de sédiments résultant à la remise en suspension des matériaux conduisent à une augmentation soudaine et temporaire de la minéralisation de la matière organique.
- Les mécanismes possibles pour ce taux accru comprennent "l'auto-amorçage" du CO réfractaire à l'état oxydé, la promotion du cycle redox du Fe et du Mn du carbone réfractaire.
- Avant la perturbation, les voies de réduction des sulfates (47,5 %) et de méthanogénèse (51,9 %) étaient responsables de la minéralisation. La perturbation après chalutage a montré un changement dans la voie de minéralisation dominante d'une voie de réduction des sulfates (8,1% après) à une voie dominée par l'aérobie (>90%).
- Le profil de SO<sub>4</sub> après chalutage (5 mois après la perturbation) indique une concentration élevée en profondeur, soulignant la récupération transitoire continue du système.
- Avec l'augmentation de la fréquence des perturbations (de 1 à 5 par an), la respiration aérobie, la réduction dissimilaire du gène et la réduction dissimilaire du fer sont stimulées au détriment de la réduction des sulfates.
- Il faut noter que dans cet exemple, le type de perturbation subi par le sédiment de la Mer du Nord ressemble plus à un dépôt soudain (crue, dépôt de dragage) qu'à une perturbation liée au chalutage