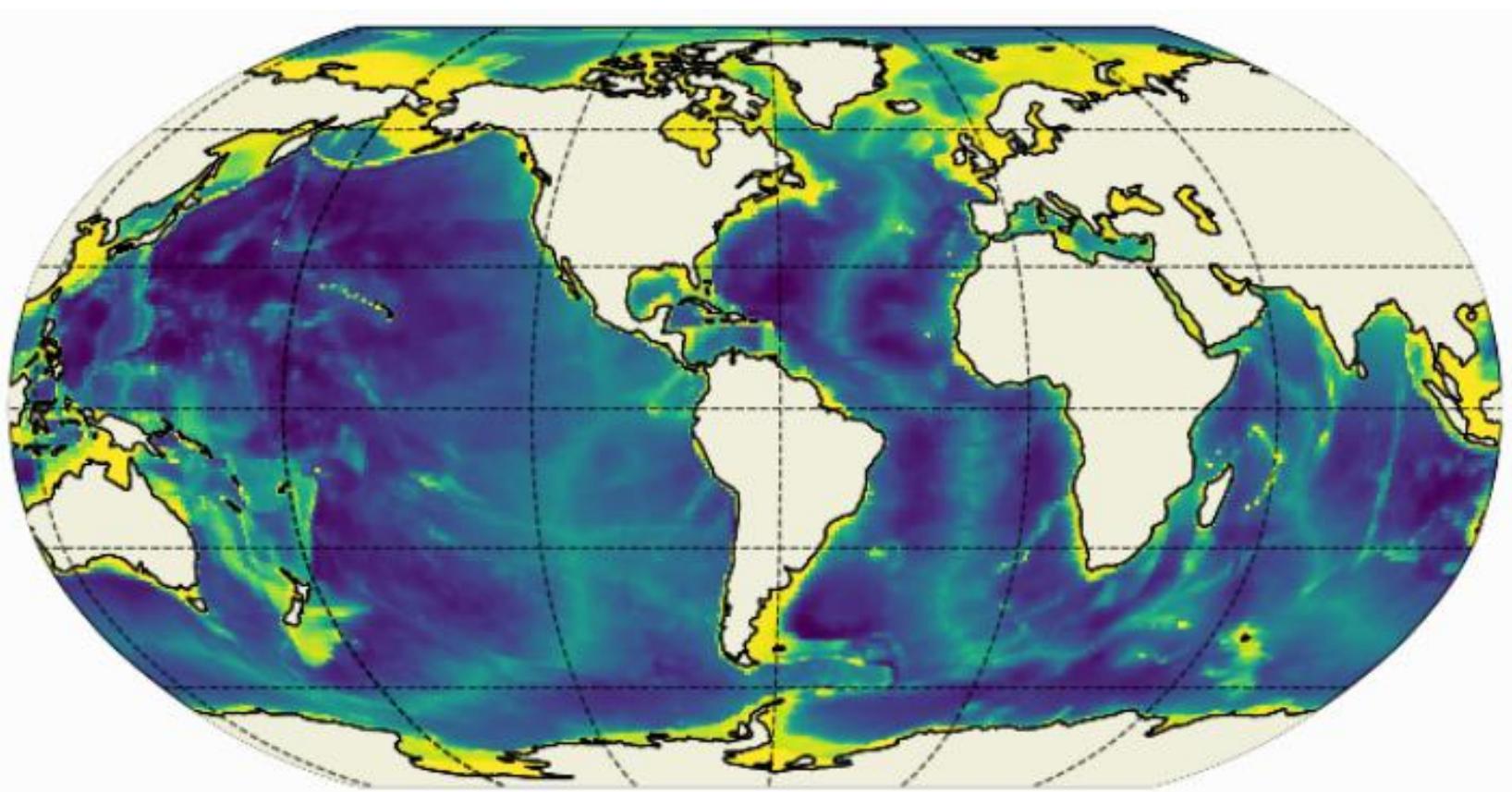


Analyse par modélisation océanique et biogéochimique 2D+1D de l'efficacité régionale de l'élimination du dioxyde de carbone marin (mCDR) par la méthode d'augmentation de l'alcalinité (OAE)

Encadrant(e)s : Océanne Bousquet, Catherine Choquet et
Souleyman Kadri-Harouna



PLAN



- 1 Contexte
- 2 Problématique du modèle 2D horizontal
- 3 Pré-traitement des données
- 4 Modèle Lagrangien 2D horizontal
- 5 Analyse des résultats 2D en surface
- 6 Conclusion et introduction de l'objectif 3D
- 7 Plan de la semaine



1. Spécialité de l'entreprise

- Développer des **outils de quantification et de modélisation biogéochimique** pour le captage de carbone océanique (méthode mCDR).
- Fournir des solutions scientifiques pour **comprendre et prédire le comportement du carbone dans l'océan**.

2. Objectifs principaux

- Rendre les solutions mCDR **fiables et réduire leurs incertitudes**.
- Permettre aux modèles mCDR de jouer un rôle concret dans **l'atténuation du réchauffement climatique**.

3. Solutions développées par Clima-Tek

- Quantifier les **flux de CO₂ capté ou relâché par l'océan** et suivre leur **évolution dans le temps**, ainsi que leurs **déplacements**, pour évaluer l'impact réel d'un déploiement mCDR dans l'océan.
- Identifier les **zones les plus favorables au captage de CO₂** en tenant compte des **courants océaniques, des dynamiques régionales** et de la **biogéochimie locale**.

- Ajouter de l'Alcalinité (ALK) modifie l'équilibre du Carbone Inorganique Dissous (DIC) dans l'océan :

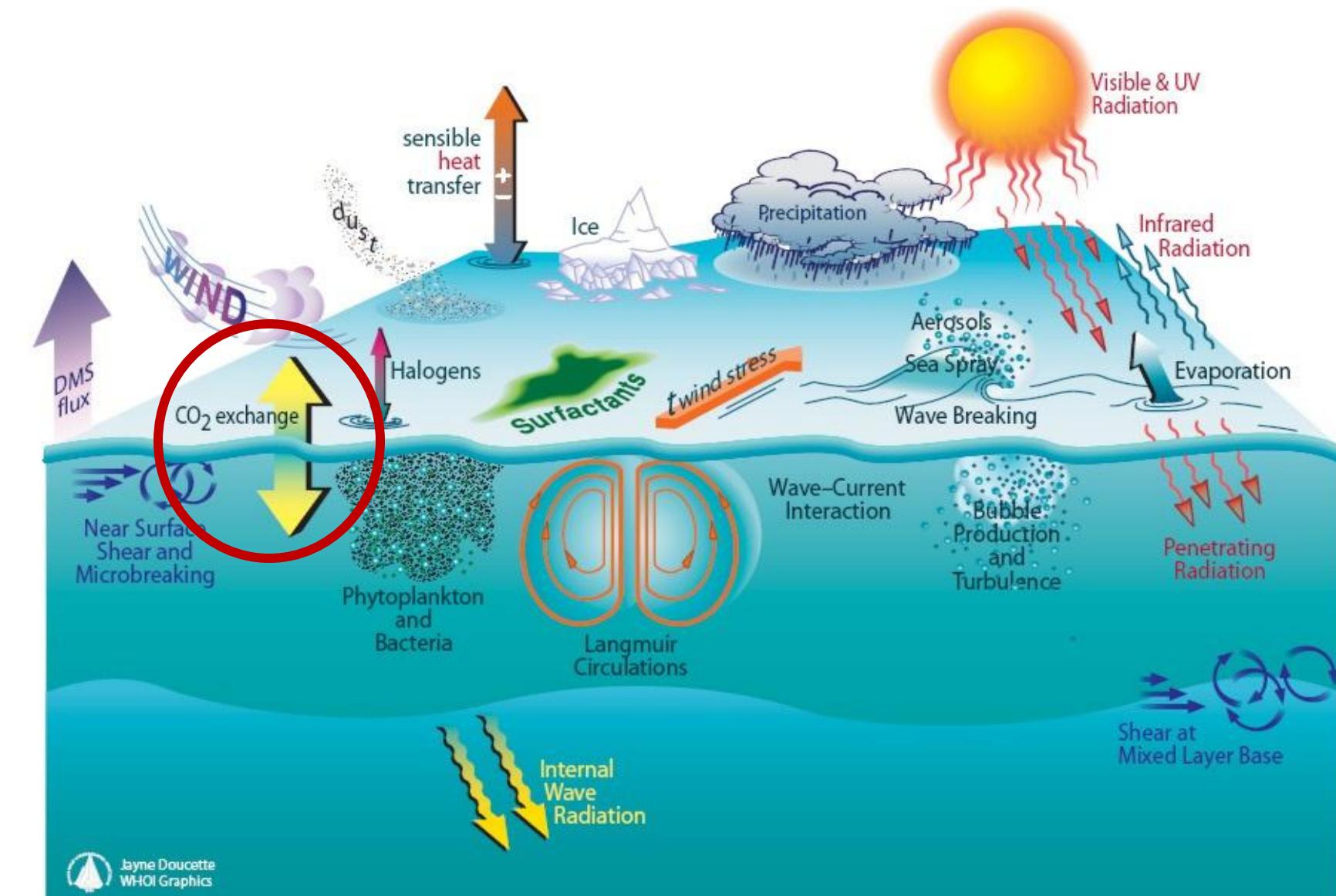
$$\text{DIC} = [\text{CO}_2^{\text{(aq)}}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

$$\text{ALK} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] + [\text{B(OH)}_4^-] - [\text{H}^+]$$

- La concentration de CO_2^{aq} diminue et donc la pression partielle de CO_2 dans l'eau ($p\text{CO}_2^{\text{aq}}$) baisse,
- Création d'un gradient de pression qui favorise l'entrée de CO_2 dans l'océan depuis l'atmosphère :

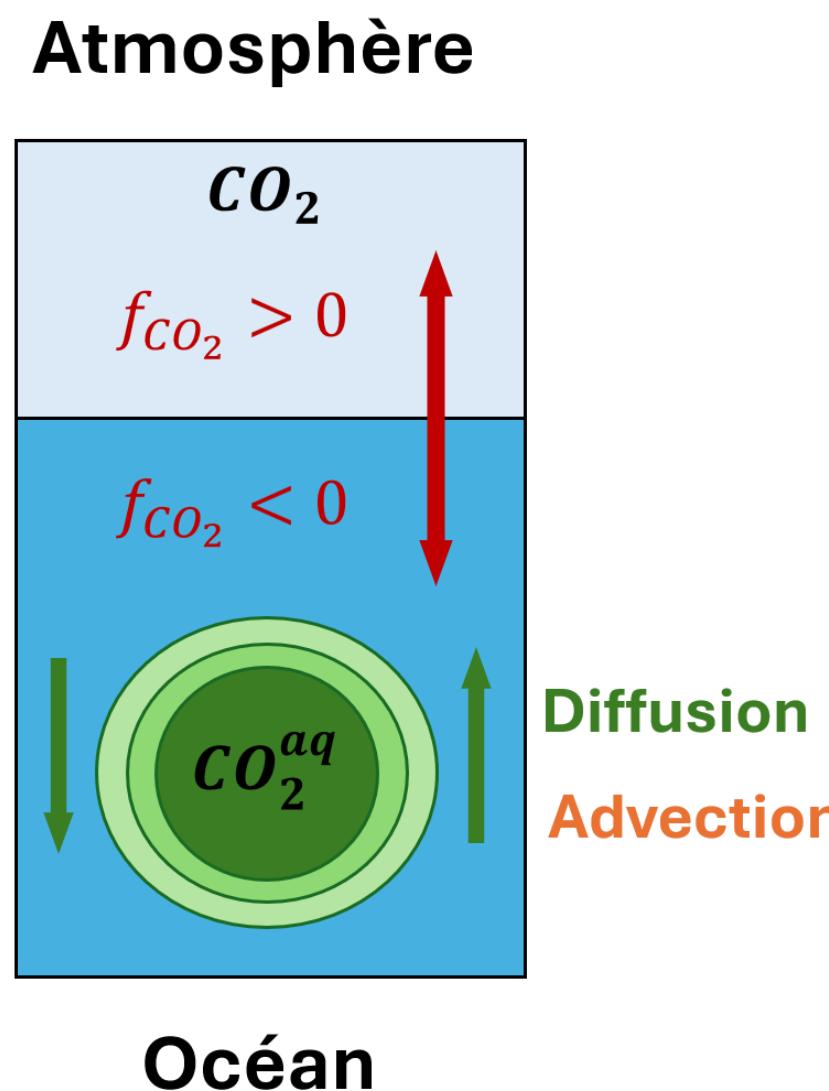
$$F_{\text{CO}_2} = -\rho_0 \kappa_g \kappa_0 (p\text{CO}_2^{\text{aq}} - p\text{CO}_2^{\text{atm}})$$

$\Rightarrow \text{CO}_2$ est ensuite stocké à long terme sous forme de HCO_3^- et CO_3^{2-} , renforçant le rôle de l'océan comme puits de carbone



Échange de CO_2
entre air-mer

Domaine
du modèle
1D vertical



→ Équations de conservation qui décrivent l'évolution de l'alcalinité c et du Carbone Inorganique Dissous dic dans la colonne d'eau:

- Diffusion et advection verticales des concentrations de l'alcalinité c et du dic (Dissolved Inorganic Carbon)
- Terme source : ajout d'un flux d'alcalinité f_{source} à la surface (méthode OAE)
- Terme biogéochimique : ajout du flux net de CO_2 de l'atmosphère vers l'océan car f_{CO_2} devient négatif avec l'ajout d'alcalinité f_{source}

⇒ Augmentation du CO_2 atmosphérique absorbé par l'océan due à l'ajout d'alcalinité.

Suselj K. and al. (2025) Quantifying marine Carbon Dioxide Removal (mCDR) via Alkalinity Enhancement Across Circulation Regimes Using ECCO-Darwin and 1D Models

$$\partial_t c = -\partial_z(w c) + \partial_z(K \partial_z c) + f_{source}$$

$$\partial_t(dic) = -\partial_z(w dic) + \partial_z(K \partial_z(dic)) - f_{CO_2}$$

$$f_{CO_2} = \kappa (1 - a_{ice}) (\partial_c(pCO_2^{aq}) c + \partial_{dic}(pCO_2^{aq}) dic)$$

Problématique du modèle 2D horizontal

4

Développer un **modèle océanographique 2D horizontal simplifié** pour simuler l'impact d'un **flux quotidien d'alcalinité (f_{source}) ajouté localement à la surface de l'océan (OAE) sur la capacité d'absorption du CO_2 par l'océan**, en prenant en compte les **courants horizontaux**.

Modèle Lagrangien horizontal :

Équation de conservation pour simuler l'évolution de la concentration d'alcalinité c induite par l'ajout f_{source}

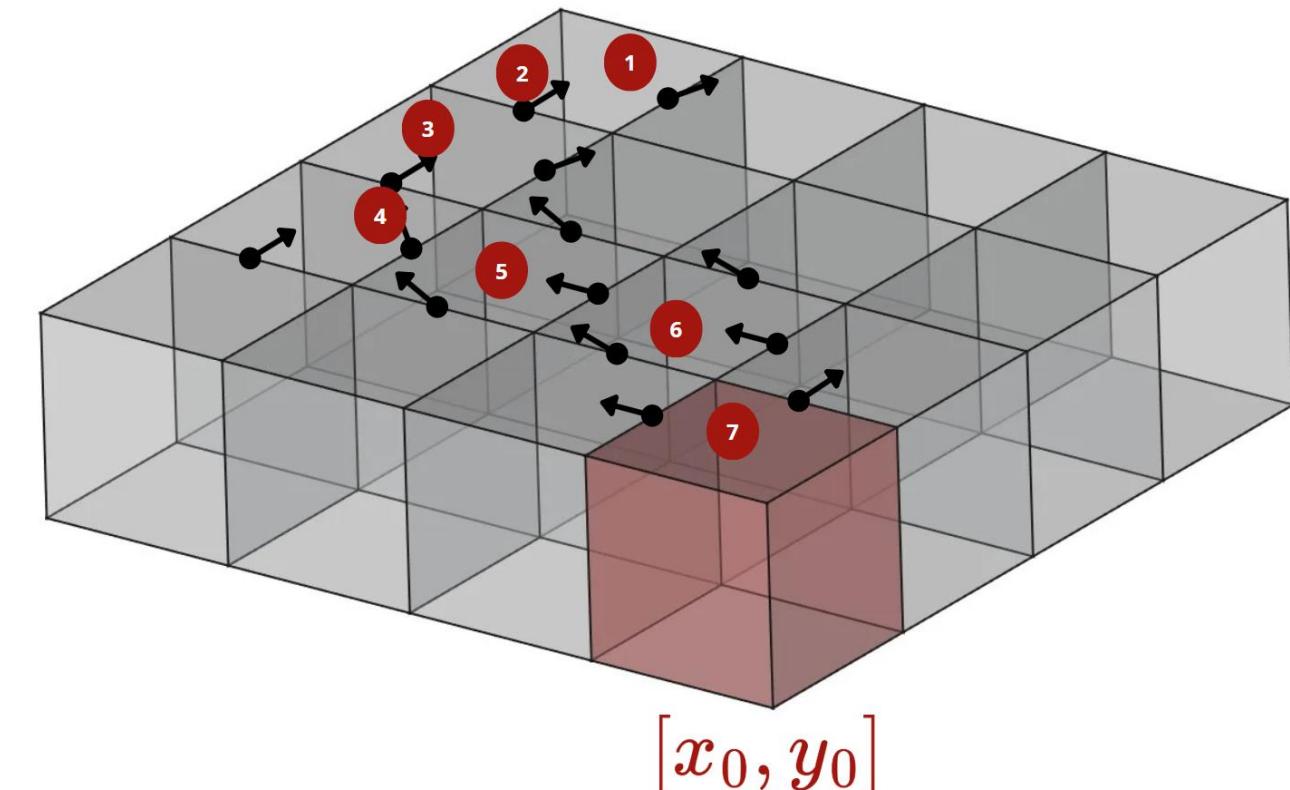
$\partial_t c + \partial_x(uc) + \partial_y(vc) = f_{source}$ sur la cellule initiale $[x_0, y_0]$ uniquement,

$\partial_t c + \partial_x(uc) + \partial_y(vc) = 0$ ailleurs,

$c|_{t=0} = 0$

⇒ Diffusion négligeable en surface par rapport aux courants horizontaux, donc les équations de conservation sont conservatives

⇒ Modèle Lagrangien est suffisant



Représentation schématique de cette simulation Lagrangienne horizontale avec l'ajout de f_{source} à chaque pas de temps à la surface de la cellule initiale $[x_0, y_0]$

Données provenant de modèles couplés océanographie et biogéochimie:

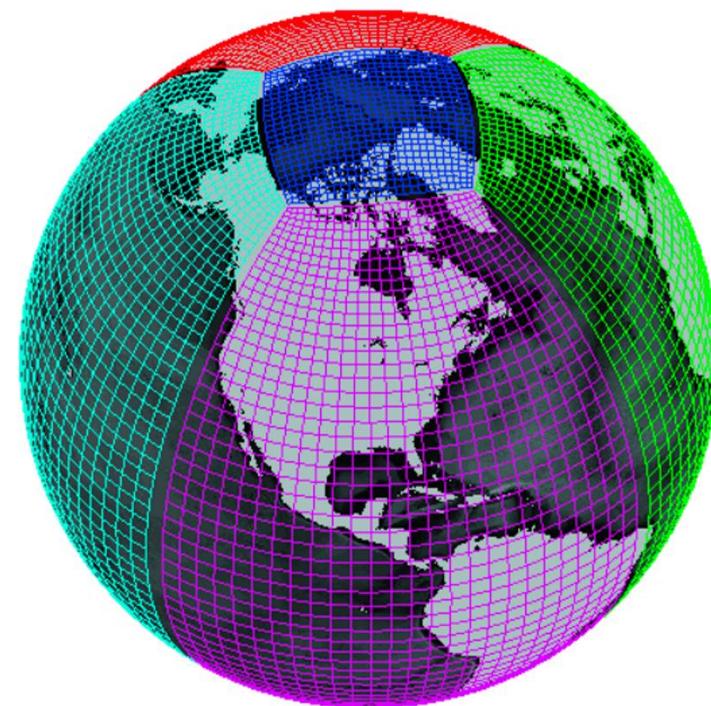
→ **Modèle de circulation et de physique océanique (ECCO : Estimating the Circulation and Climate of the Ocean)** appelé **MITgcm** (MIT general circulation model)

→ **Modèle biogéochimique (Darwin)** qui simule les cycles du carbone, de l'azote, du fer, du silicium, de l'oxygène, ainsi que la dynamique du plancton

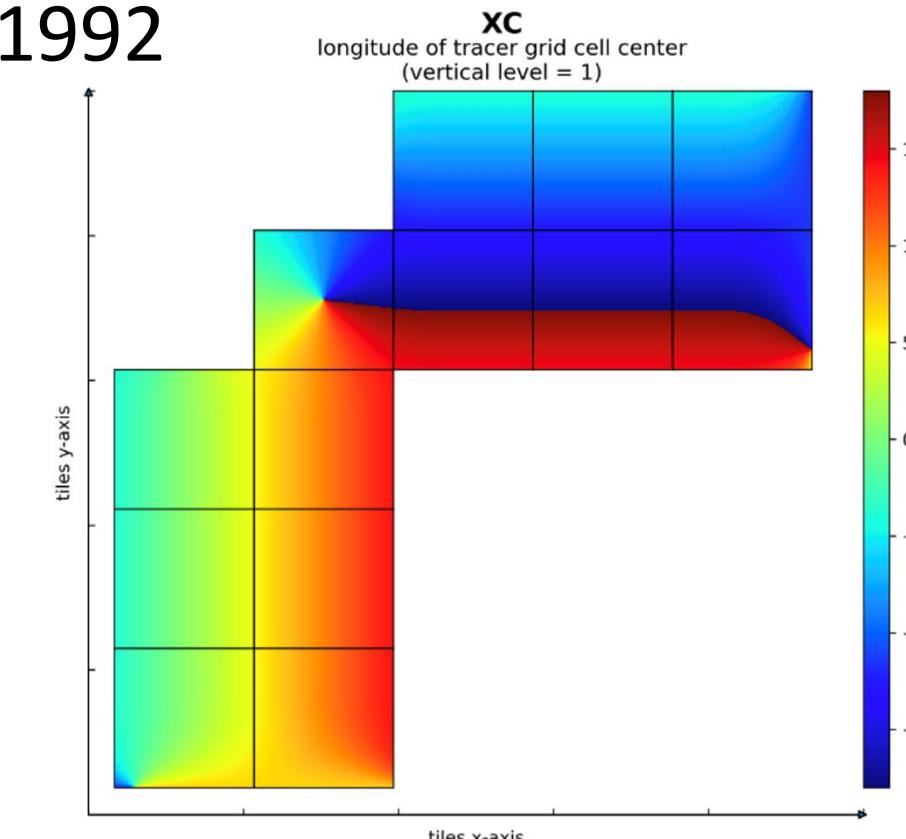
Format des données :

- Grille native **Lat-Lon-Cap en 13 tuiles** pour optimiser la résolution en hautes latitudes
- Résolution horizontale minimale de 1° et 50 niveaux verticaux allant jusqu'à 6000m de profondeur
- Données disponibles **mensuellement, quotidiennement ou oneshot** en format **binaire** sur le site

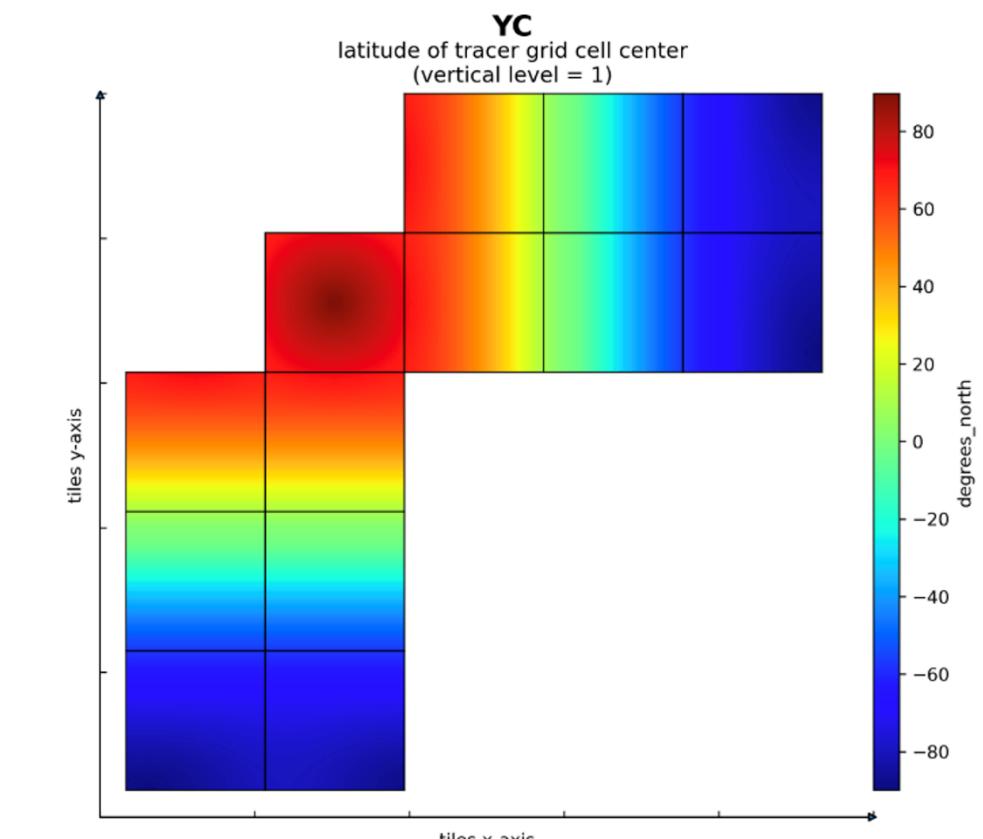
ECCO Data Portal → début des données en 1992

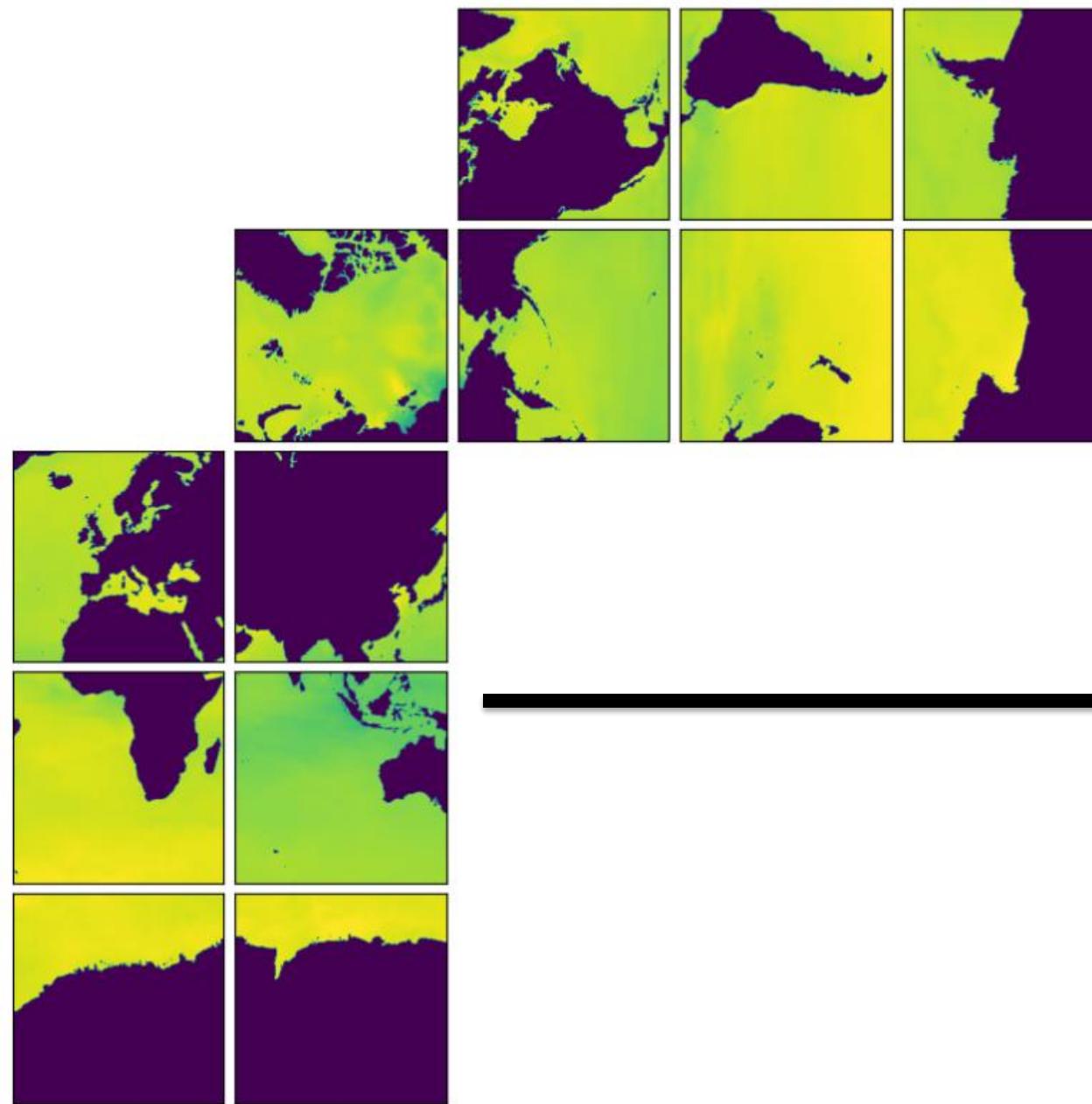


Grille Lat-Lon-Cap de ECCO

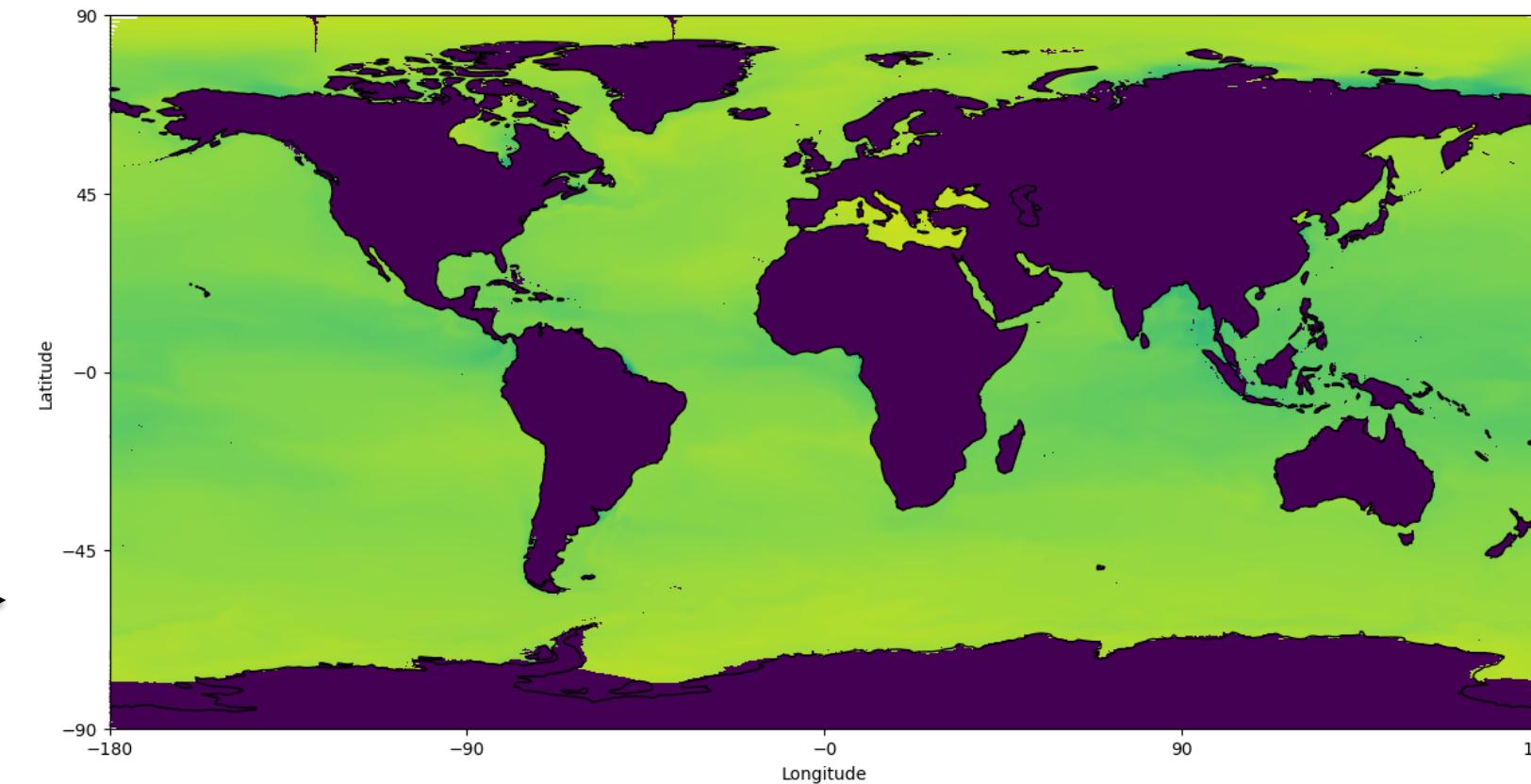


Grille géométrique native de ECCO

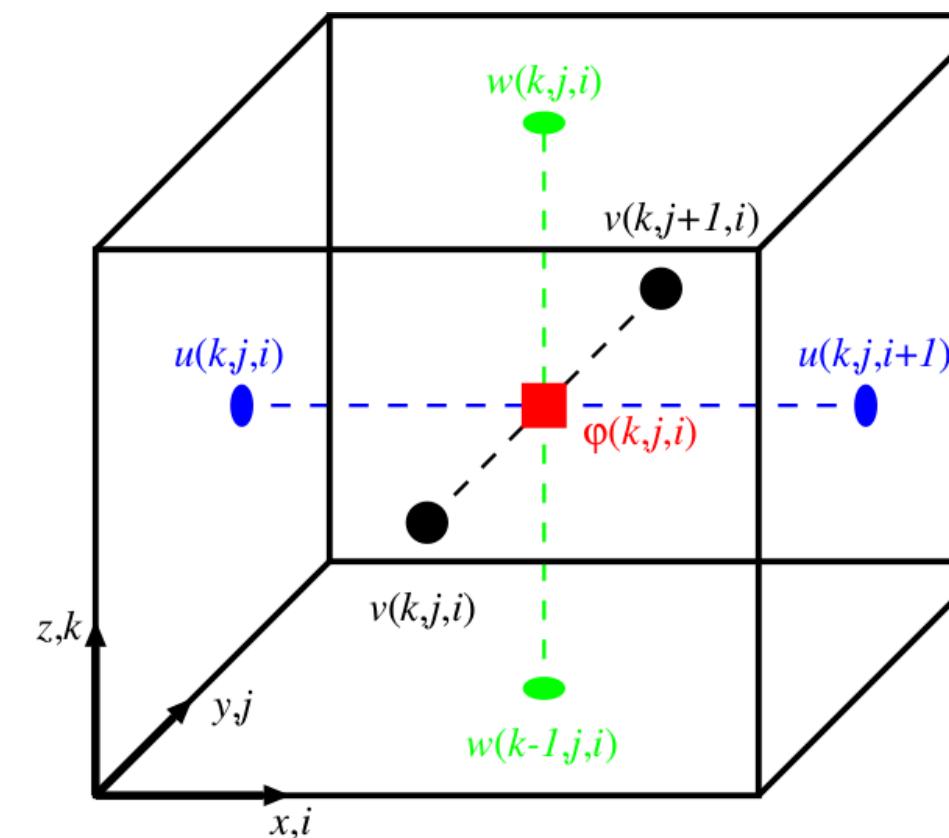




1 Grille native LLC (Lat-Lon-Cap)
des données d'ECCO-Darwin
est divisée en 13 tuiles
=> "butterfly grid"

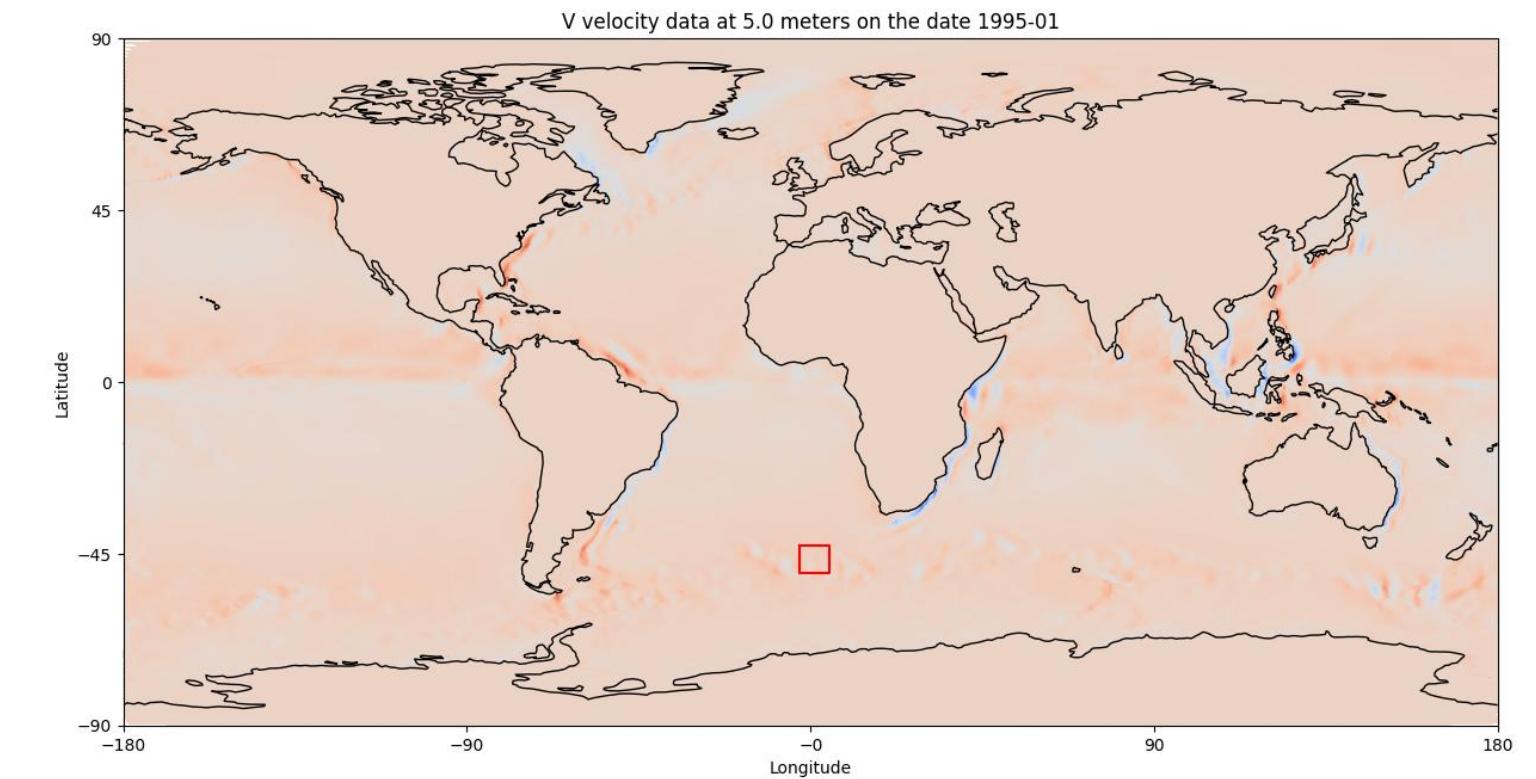
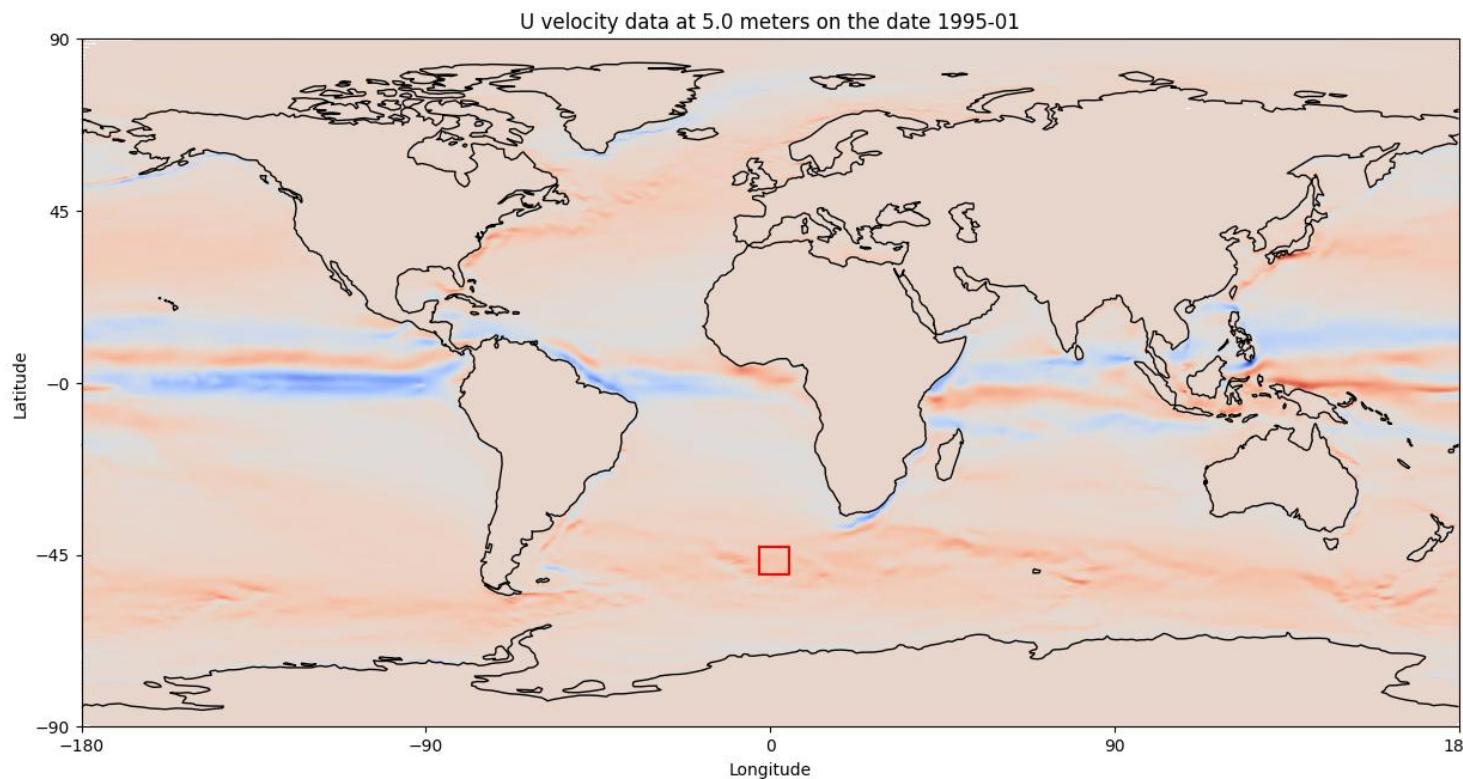
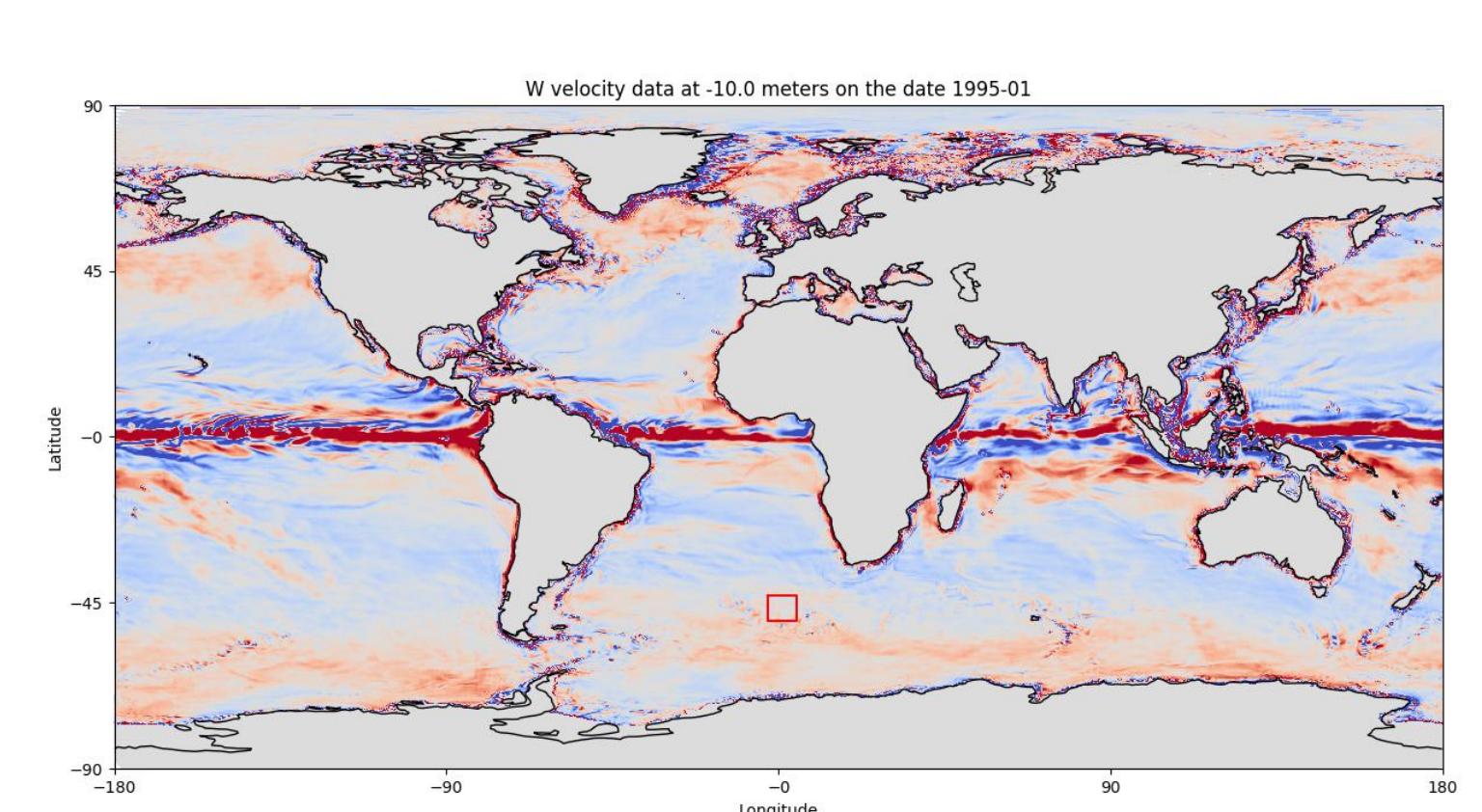
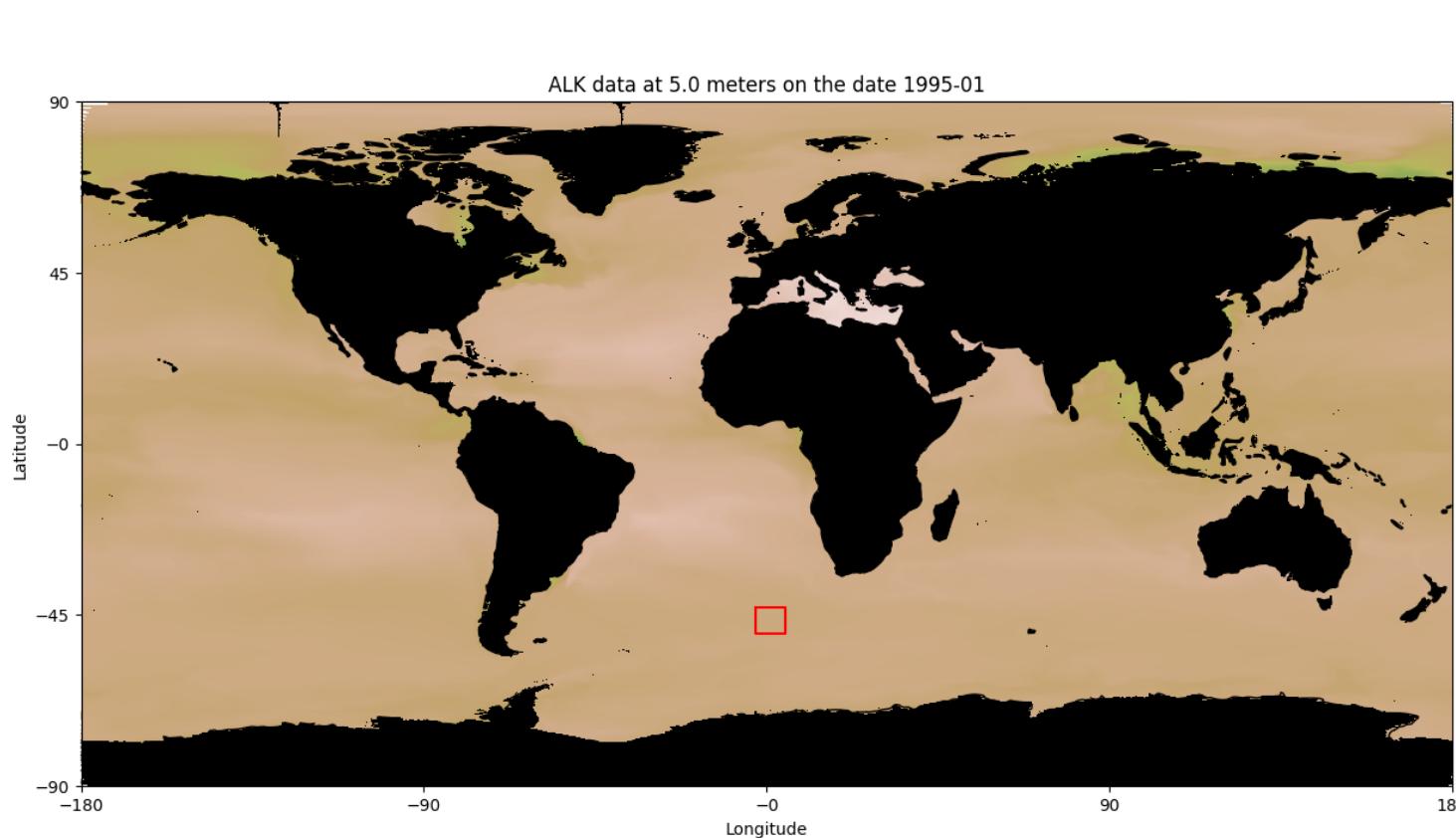


2 Aplatissement
des grilles

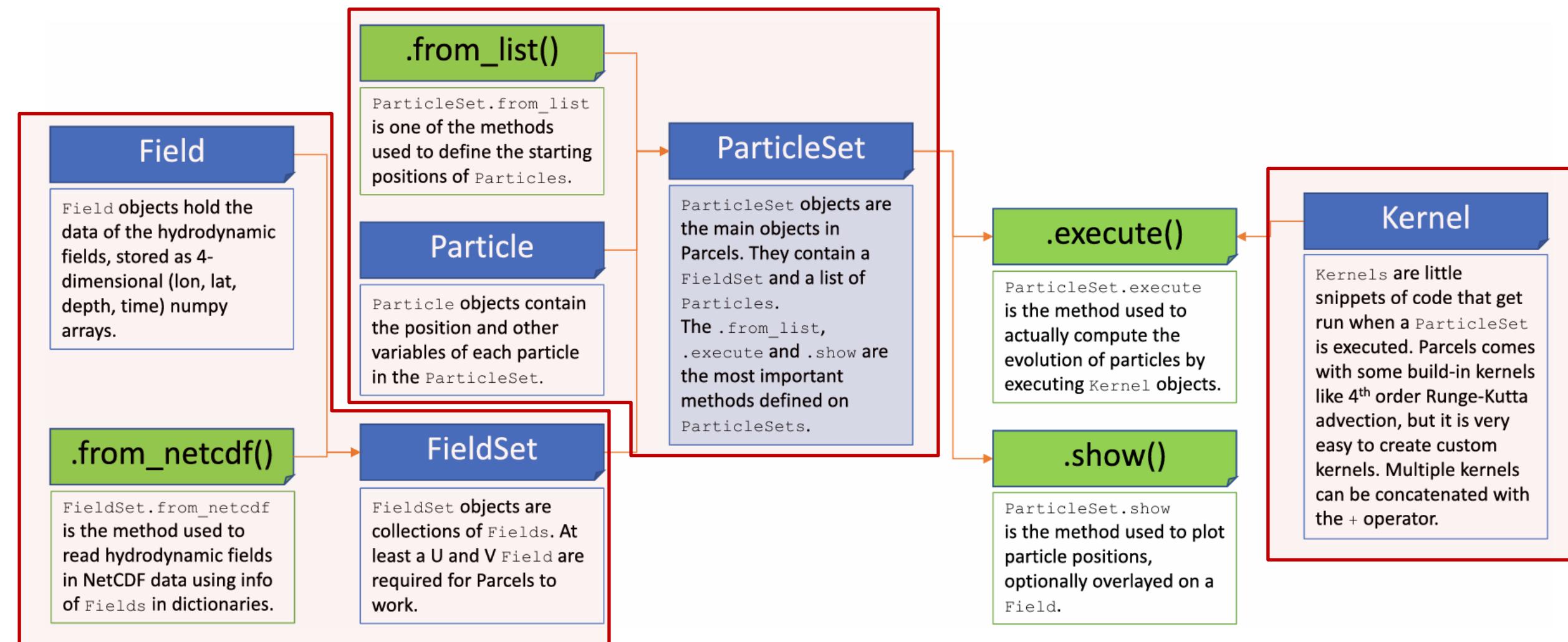


Grille Arakawa C utilisée en
océanographie : Positionnement des
variables scalaires φ comme l'alcalinité
ou le DIC et des composantes de
vitesse u, v, w

Sorties mensuelles de surface du modèle **ECCOV5** avec une grille **LLC270** aplatie
=> 13 tuiles de taille 270×270 avec une résolution horizontale de 1/3° sur 50 niveaux verticaux



Simulations de la dispersion d'une perturbation d'alcalinité (f_{source}) en surface en se basant sur une approche Lagrangienne via l'outil OceanParcels à partir de fichiers NetCDF



- FieldSet : sorties du modèle ECCO-Darwin en 4D (time, depth, lat, lon) = champs de concentration d'alcalinité c et des vitesses u, v, w
- ParticleSet : particules virtuelles => position + attributs = passive ou active
- Kernel : fonctions exécutées à chaque pas de temps Δt = transport de particule avec Runge-Kutta à l'ordre 4 + équations d'advection sur la concentration c de l'alcalinité avec l'ajout f_{source}

Modèle 2D rapid-mCDR horizontal :

Simuler la propagation d'une **injection continue d'un flux d'alcalinité** f_{source} (perturbation OAE) en un point fixe et son **impact sur le flux de CO_2** tout au long de la trajectoire de la particule à la surface de l'océan.

À chaque pas de temps Δt (n) :

1. Interpolation de la grille pour définir les indices de cellule la plus proche de la position géographique de la particule

2. Injection de f_{source} dans la cellule initiale $[x_0, y_0]$ et mise à jour des champs de concentration d'alcalinité c :

$$c^{n+1} = c^n + f_{source} \times \Delta t$$

3. Calcul de l'échange de CO_2 à l'interface air-mer et mise à jour des champs de concentration de dic :

$$f_{CO_2} = \kappa(1 - a_{ice}) (\partial_c(pCO_2^{\text{aq}}) c + \partial_{dic}(pCO_2^{\text{aq}}) dic)$$

4. Transport conservatif horizontal : chaque particule transporte la concentration d'alcalinité c sans pertes numériques en utilisant un schéma de Runge-Kutta à l'ordre 4 (RK4) :

$$x^{n+1} = x^n + \frac{\Delta t}{6} (\vec{k}_1 + 2\vec{k}_2 + 2\vec{k}_3 + \vec{k}_4)$$

Analyse des résultats 2D de surface

Évolution des champs ALK et DIC induit par OAE

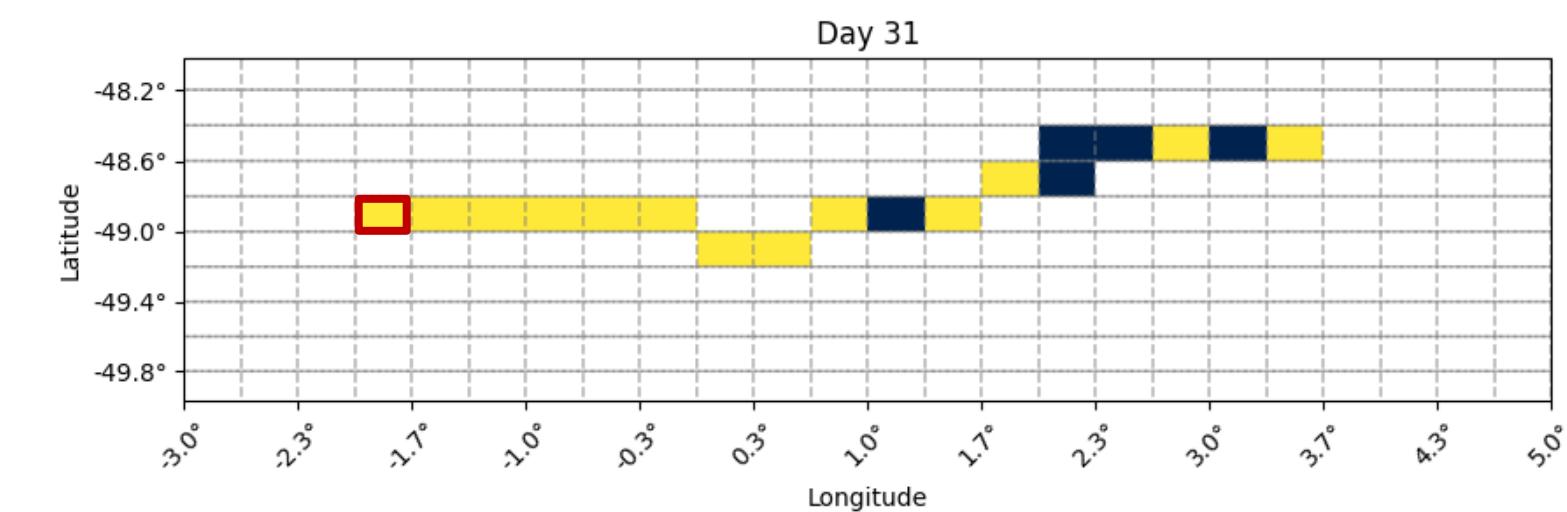
Avec OAE :

$$\begin{aligned} f_{source} \times dx \times dy \times dz &= 3,3 \times 10^7 \text{ meq/s} \\ \Leftrightarrow f_{source} \times dz &= 1,25 \times 10^{-4} \text{ meq/(m}^2 \text{s)} \\ \Leftrightarrow f_{source} &= 1,25 \times 10^{-5} \mu\text{mol/(L s)} \\ &= 1,25 \times 10^{-5} \mu\text{Mol/s} \end{aligned}$$

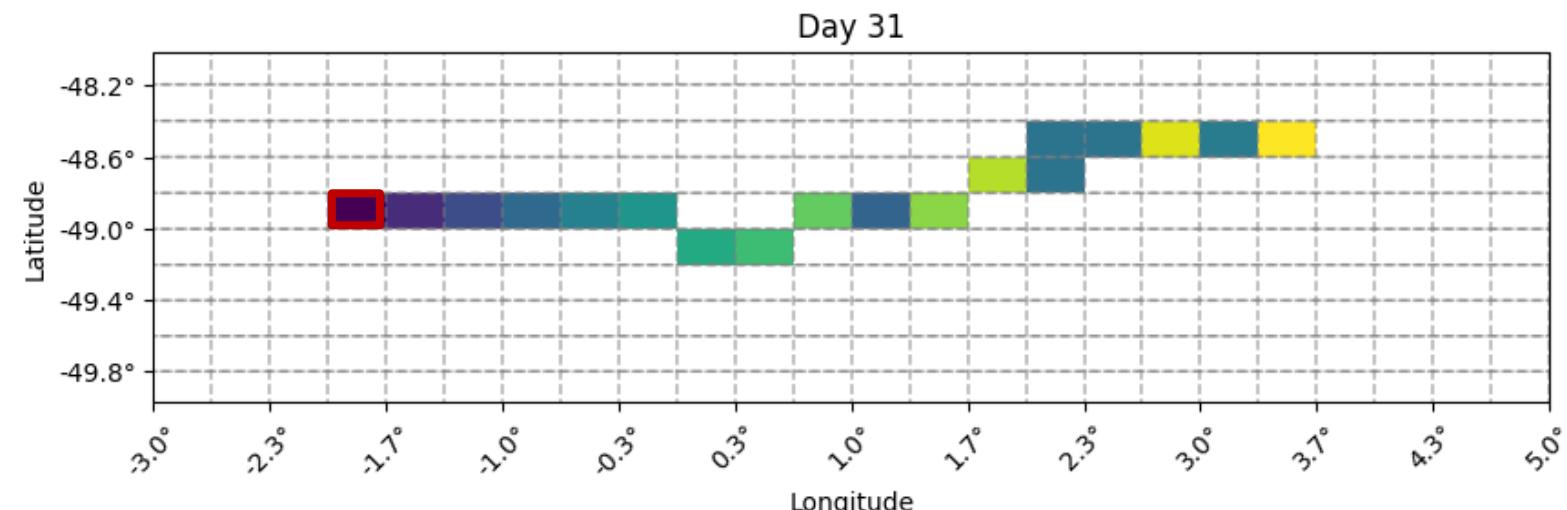
Paramètres de la simulation pour quantifier les effets de la perturbation OAE :

- **Zone étudiée :**
Antarctic Circumpolar Current (ACC) =
région à forts courants horizontaux
- Injection de **1 particule/jour** pendant **31 jours** à la position **[2°W, 49°S]** à partir du **3^{er} Janvier 1995**
- **Modèle horizontal 2D à la surface :**
 - Transport Lagrangien (advection horizontale) avec **OceanParcels**
 - Source Biogéochimique (ajout d'alcalinité f_{source} & puit de carbone f_{CO_2}) avec **modèle rapid-mCDR**

□ Cellule initiale $[x_0, y_0]$



Champ de concentration en alcalinité à la fin de la simulation



Champ de concentration en DIC à la fin de la simulation

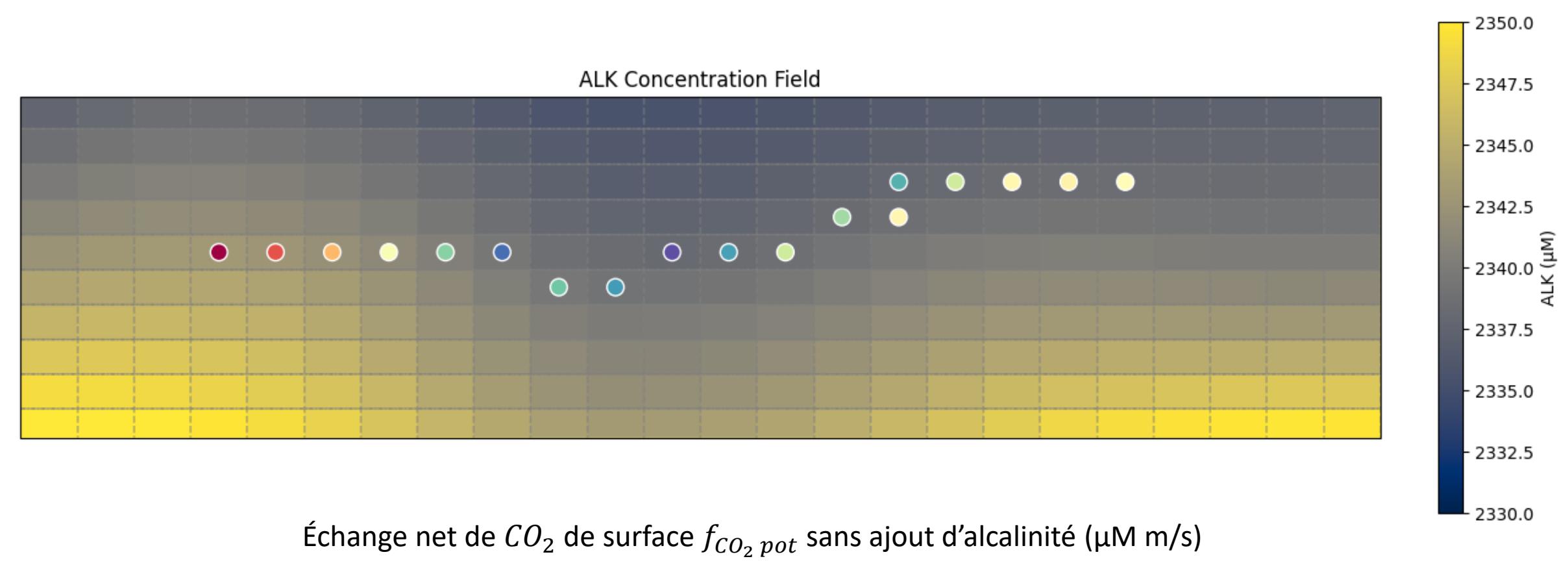


Sans ajout d'alcalinité

= sans méthode OAE

= condition initiale

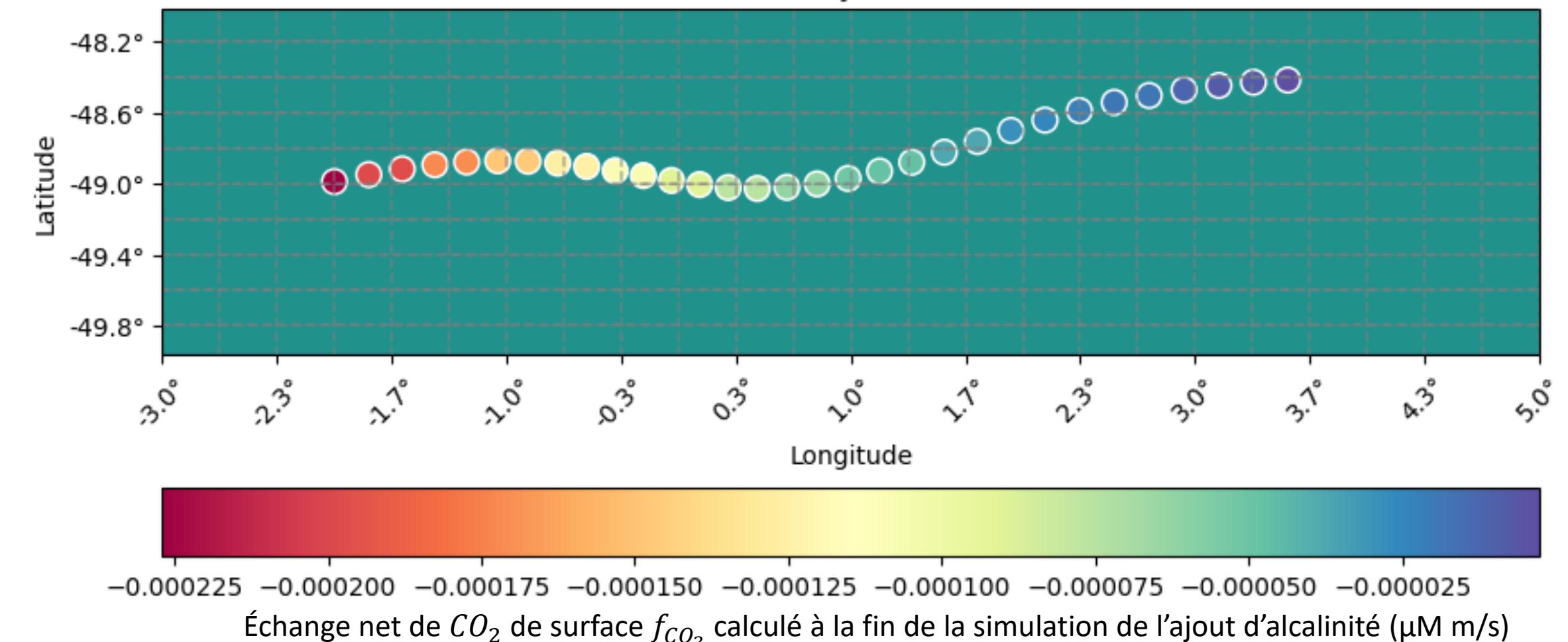
$\Rightarrow f_{CO_2 \text{ pot}} > 0$: Dégazage naturel de CO_2 vers l'atmosphère



Avec ajout d'alcalinité

= méthode OAE

$\Rightarrow f_{CO_2} < 0$: Augmentation de la capacité de l'océan à absorber le CO_2



- Conclusion : Simuler, dans un cadre Lagrangien avec OceanParcels, les variations horizontales de concentration d'alcalinité et de DIC en surface, induites par les **apports quotidiens en alcalinité** f_{source} et les **puits de carbone** f_{CO_2} => **Modèle 2D horizontal rapid-mCDR**
- GitHub : [ocebousquet/rapid_mCDR_horizontal](https://github.com/ocebousquet/rapid_mCDR_horizontal)
- Perspectives : Ajouter la simulation **1D verticale** des équations de conservation d'alcalinité et de DIC (**diffusion et advection**) sur la trajectoire de la particule dans la colonne d'eau
- Difficulté : Diffusion verticale est non nulle, le **système n'est plus conservatif !**
- ⇒ **Objectif de cette semaine** : Représenter les variations **horizontales et verticales** d'un ajout quotidien d'alcalinité (f_{source}) à l'aide d'un **modèle 3D simplifié**, afin d'évaluer par la suite son impact sur la capacité de l'océan à absorber le CO_2 atmosphérique !

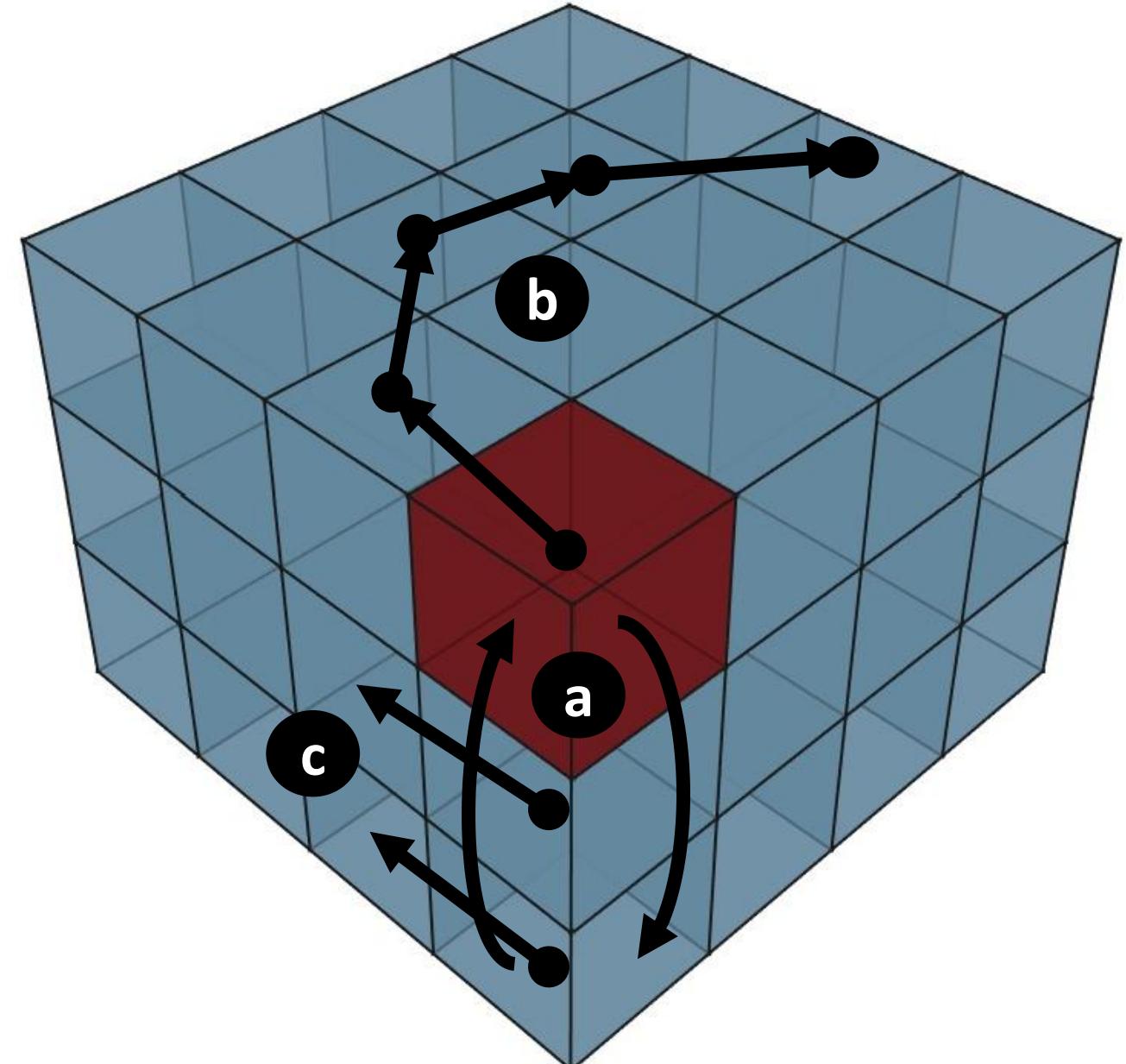
Idée 1:

a) Appliquer les **équations de conservation d'advection et de diffusion verticales**, à l'aide d'un **modèle Eulérien 1D**, sur la concentration d'alcalinité de la cellule contenant la particule dans la colonne d'eau.

b) Appliquer **l'advection horizontale du modèle conservatif Lagrangien 2D** pour faire évoluer **la position et la concentration des particules**, dont la concentration initiale correspond à l'ajout quotidien d'alcalinité f_{source} .

c) Après avoir simuler les concentrations d'alcalinité en surface, appliquer **l'advection horizontale sur chacune des couches en profondeur**.

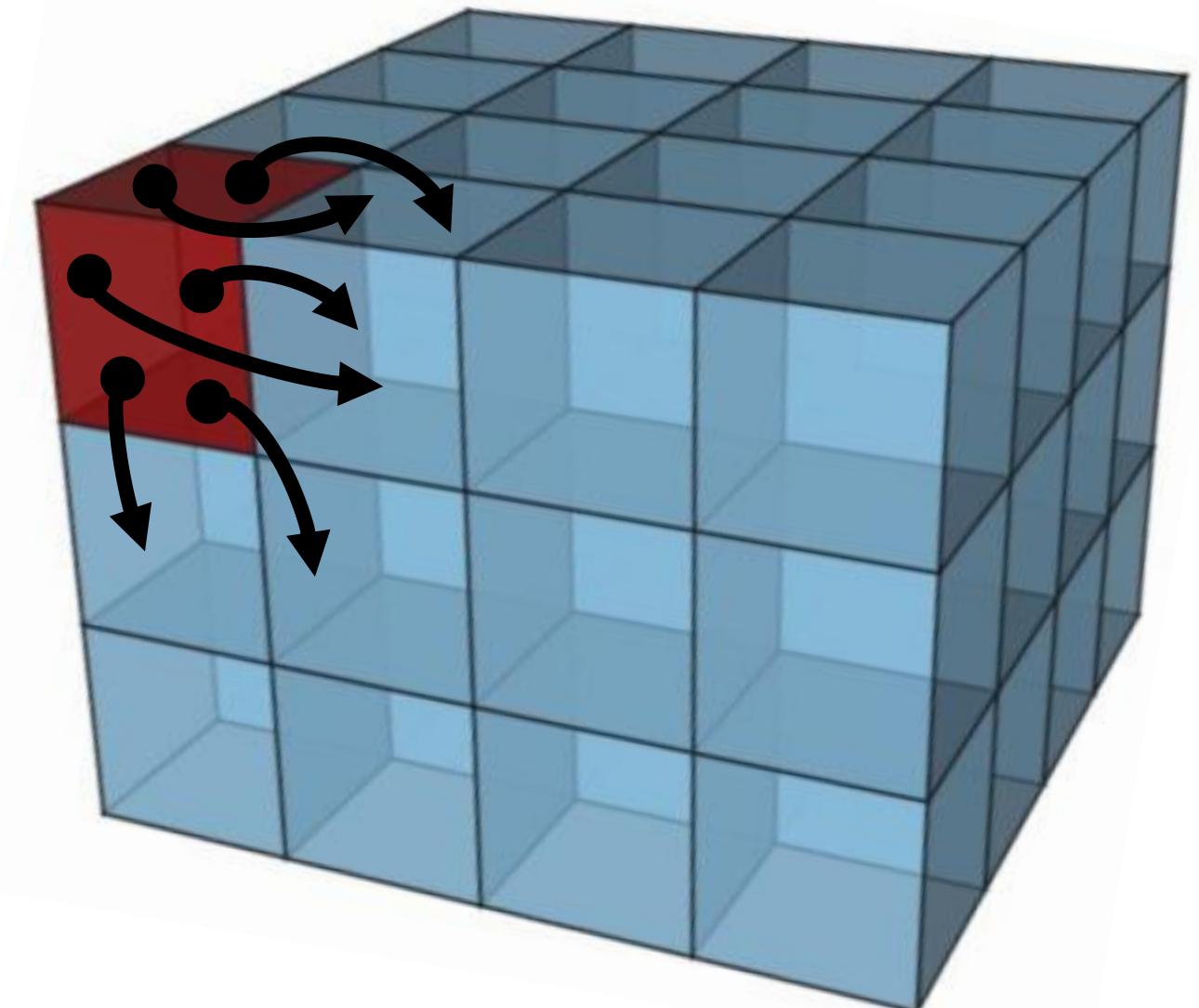
Déplacement d'un ajout d'alcalinité au cours du temps



Idée 2 :

- a) Utiliser les **outils d’OceanParcels** pour appliquer l’advection et la diffusion, à la fois horizontales et verticales, sur la position des particules.
- b) Ajouter chaque jour plusieurs particules de concentration identique, dont la somme représente l’ajout quotidien d’alcalinité f_{source} .
- c) Calculer la concentration moyenne d’alcalinité de toutes les particules présentes dans chaque cellule de la grille 3D.

Premier ajout d’alcalinité





Merci de votre attention !

Avez-vous des questions ?