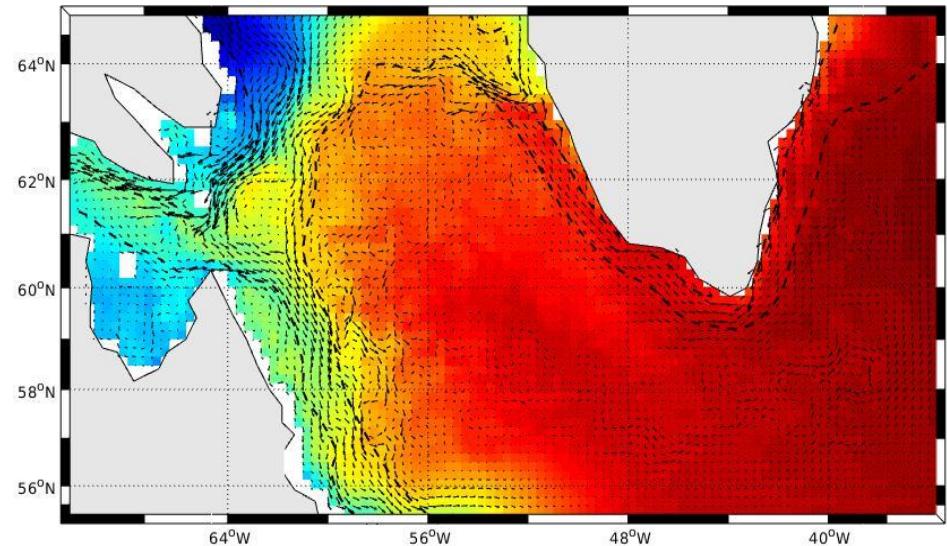


Simulation climatologique décennale de la circulation océanique en mer du Labrador à l'aide du modèle CROCO

- 07 Avril 2023 -



Tino BELLAYER
Master Sciences de la Mer, parcours OPB :
Présentation finale
UE [OPB205] : Modélisation 3D Océanique

- (1) **I. Fenty, P. Heimbach**, *Coupled sea ice–ocean-state estimation in the labrador sea and baffin bay*. Journal of Physical Oceanography, 43(5) :884 – 904, 2013.
- (2) **G. Han, Z. Lu, Z. Wang, J. Helbig, N. Chen, B. de Young**, *Seasonal variability of the labrador current and shelf circulation off newfoundland*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 113(C10), 2008.
- (3) **H-C. Lee, A. Rosati, M. J. Spelman**, *Barotropic tidal mixing effects in a coupled climate model : Oceanic conditions in the northern atlantic*. Ocean Modelling, 11(3) :464–477, 2006.
- (4) **M. Müller, H. Haak, J.H. Jungclaus, J. Sündermann, M. Thomas**. *The effect of ocean tides on a climate model simulation*. Ocean Modelling, 35(4) :304–313, 2010.
- (5) **Z. Wang, D. Brickman, B. J. W. Greenan, I.Yashayaev**. *An abrupt shift in the labrador current system in relation to winter nao events*. Journal of Geophysical Research : Oceans, 121(7) :5338–5349, 2016.

Généralités et intérêt de la modélisation numérique

Généralités et intérêt de la modélisation numérique

- XXe siècle : **essor** considérable *(Richardson, usine à prévoir le temps...)*
- **Facilité de mise en oeuvre** : coût logistique de plus en plus faible
- Aujourd’hui : études **complémentaires** aux campagnes de mesures *in situ*

Généralités et intérêt de la modélisation numérique

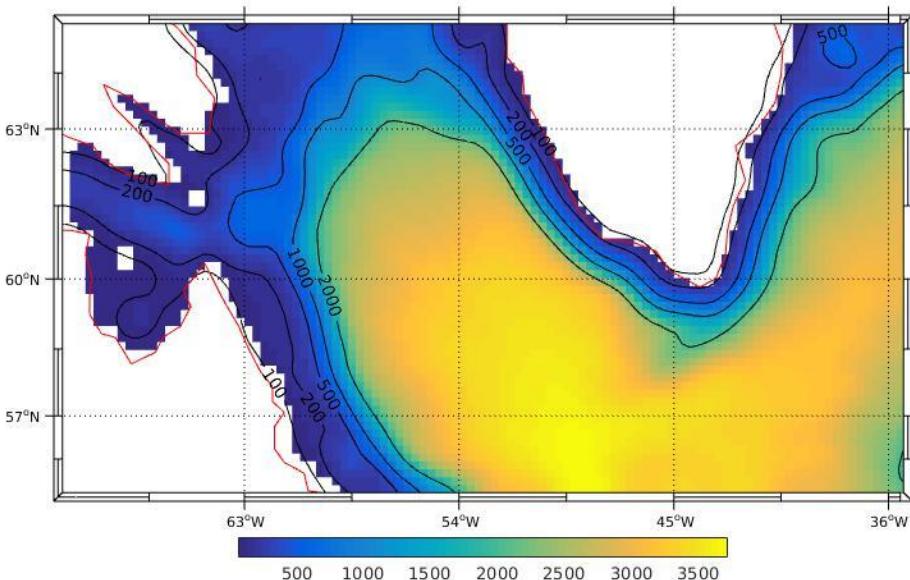
- XXe siècle : **essor** considérable *(Richardson, usine à prévoir le temps...)*
- **Facilité de mise en oeuvre** : coût logistique de plus en plus faible
- Aujourd'hui : études **complémentaires** aux campagnes de mesures *in situ*

En océanographie / sciences naturelles :

- Modèles météorologiques (e.g. AROME, WRF), puis modèles de circulation (e.g. ROMS)
- Mise en évidence de processus parfois mal compris

Une région-test : la mer du Labrador

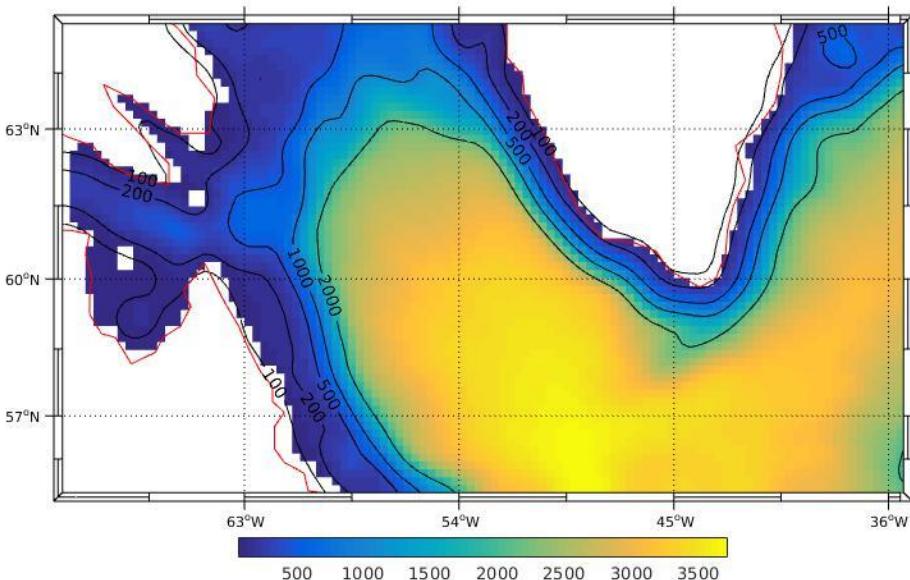
Une région-test : la mer du Labrador



- Mer bordière : large ouverture sur le bassin principal Atlantique, **larges plateaux continentaux**

Fig.1 : Carte bathymétrique de la mer du Labrador, générée en pré-simulation avec *make_grid.m*.

Une région-test : la mer du Labrador



- Mer bordière : large ouverture sur le bassin principal Atlantique, **larges plateaux continentaux**
- Haute latitude (55-65°N) : influence de la cryosphère (**banquises**, *inlandsis*)

Fig.1 : Carte bathymétrique de la mer du Labrador, générée en pré-simulation avec *make_grid.m*.

Une région-test : la mer du Labrador

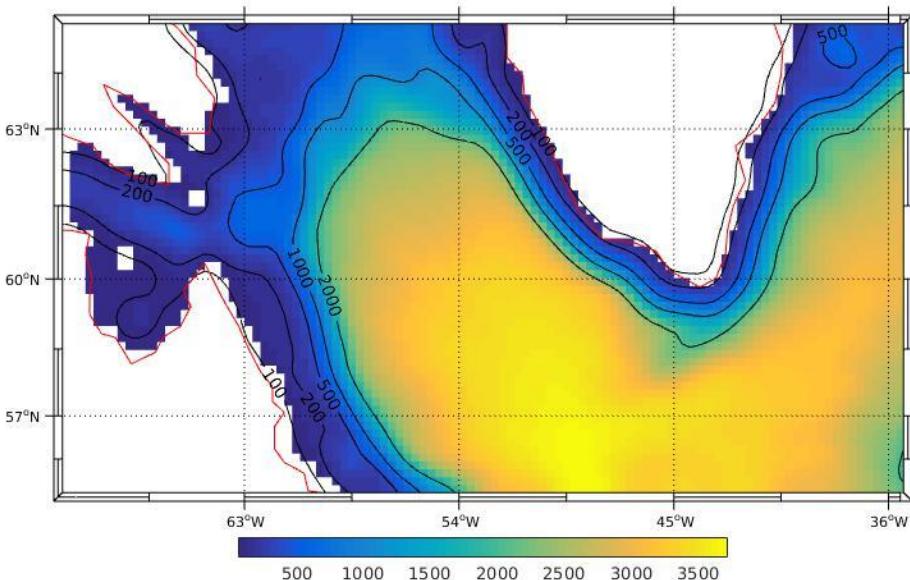


Fig.1 : Carte bathymétrique de la mer du Labrador, générée en pré-simulation avec *make_grid.m*.

- Mer bordière : large ouverture sur le bassin principal Atlantique, **larges plateaux continentaux**
- Haute latitude (55-65°N) : influence de la cryosphère (**banquises, inlandsis**)
- **Cisaillement** de forçages éoliens (vents catabatiques & vents d'ouest)

Le modèle CROCO : son fonctionnement, ses hypothèses

- Modèle de CIRCULATION :
équations du **mouvement**
(Navier-Stokes) + **conservation** de
la chaleur et du sel, de la masse,
éq. d'état de l'eau de mer)

Le modèle CROCO : son fonctionnement, ses hypothèses

- Modèle de CIRCULATION : équations du **mouvement** (Navier-Stokes) + **conservation** de la chaleur et du sel, de la masse, éq. d'état de l'eau de mer)
- Hypothèses **simplificatrices** : Boussinesq, hydrostatique, mouvements quasi-horizontaux, fermeture de Reynolds, isotropie horizontale

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_H \nabla_H^2 u + A_Z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_H \nabla_H^2 v + A_Z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} - g = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho = \rho(T, S, z)$$

Discrétisation numérique, conditions de stabilité

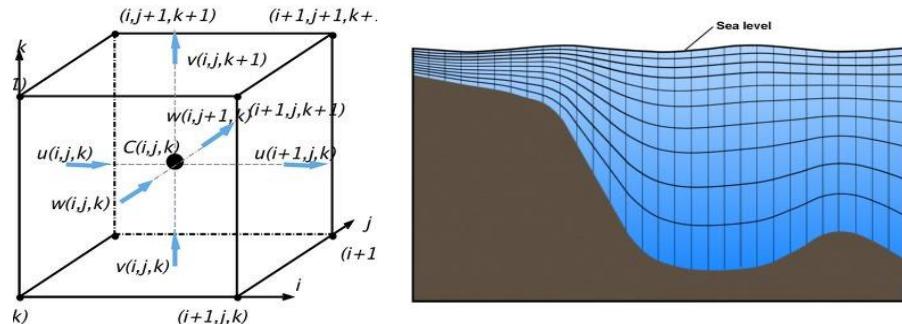


Fig.2 : Schémas généraux représentant une grille d'Arakawa-C et une grille verticale en coordonnées-sigma (Reasearchgate).

Discrétisation numérique, conditions de stabilité

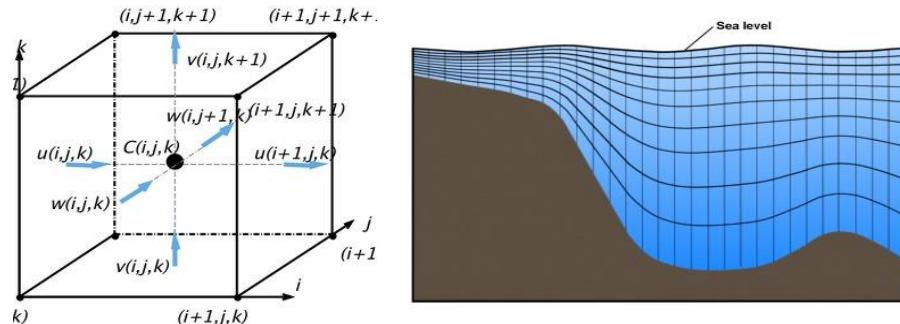


Fig.2 : Schémas généraux représentant une grille d'Arakawa-C et une grille verticale en coordonnées-sigma (Reasearchgate).

- Schéma numérique : Arakawa-C / coordonnées-sigma + time-splitting

Discrétisation numérique, conditions de stabilité

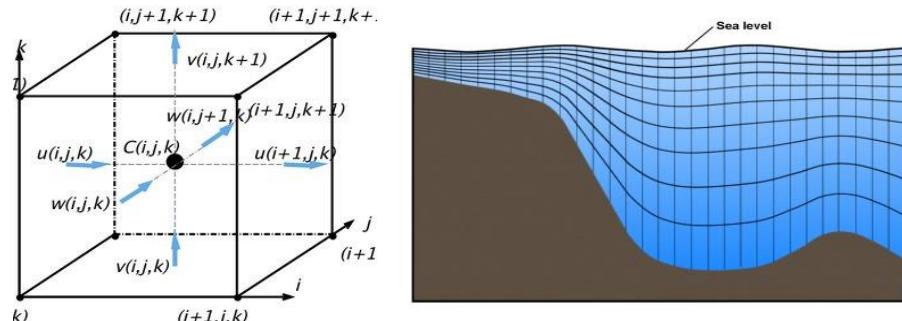


Fig.2 : Schémas généraux représentant une grille d'Arakawa-C et une grille verticale en coordonnées-sigma (Reasearchgate).

- Schéma numérique : Arakawa-C / coordonnées-sigma + time-splitting

- **Critère de Courant - Friedrichs - Lewy (CFL) :**

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{\sqrt{gh_{\max}}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta t_I \leq \frac{1}{C_I} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Calcul des conditions-limite et des forçages

- **Simulation climatologique** : assemblage de campagnes menées à des endroits et des époques très différents (\neq temps réel, prévisions)

Calcul des conditions-limite et des forçages

- **Simulation climatologique** : assemblage de campagnes menées à des endroits et des époques très différents (\neq temps réel, prévisions)
- Bases de données : **COADS-05** (variables de forçage), **WOA-09** (conditions-limite)

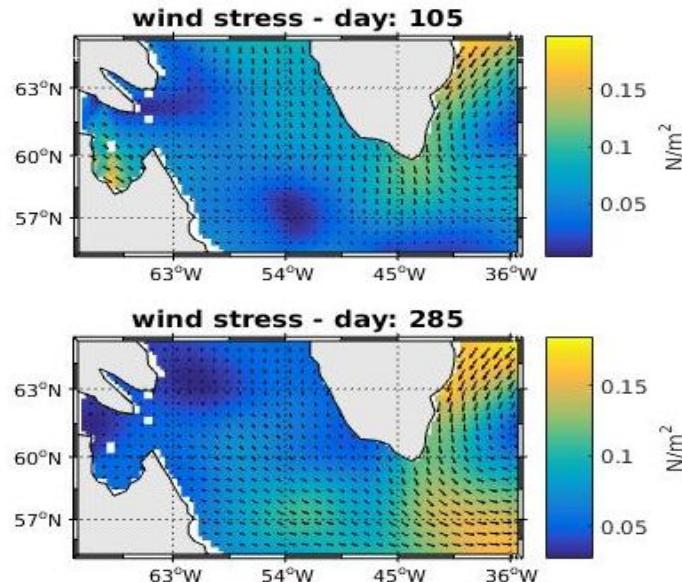


Fig.3 : Rendu graphique d'une variable de forçage (tension de vent) calculée en mer du Labrador avec COADS-05 (*make_forcing.m*).

Calcul des conditions-limite et des forçages

- **Simulation climatologique** : assemblage de campagnes menées à des endroits et des époques très différents (\neq temps réel, prévisions)
- Bases de données : **COADS-05** (variables de forçage), **WOA-09** (conditions-limite)
- Implémentation à la région par **interpolation** (ou moyennage si données multiples)

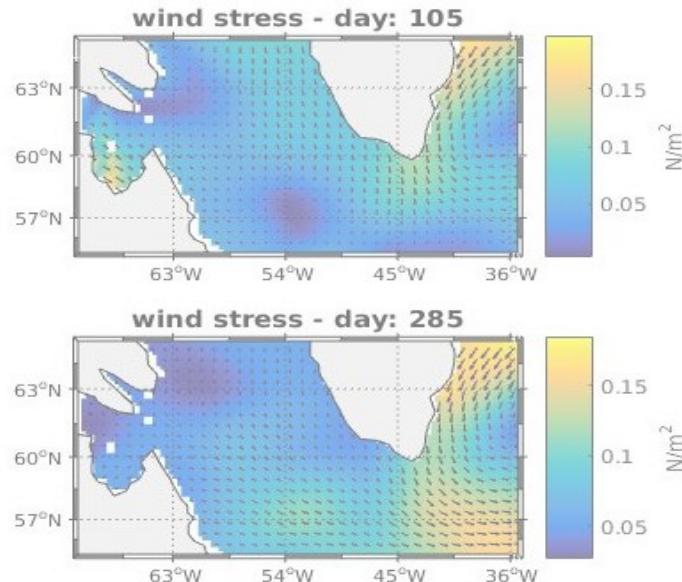


Fig.3 : Rendu graphique d'une variable de forçage (tension de vent) calculée en mer du Labrador avec COADS-05 (*make_forcing.m*).

Stabilisation des variables de diagnostic

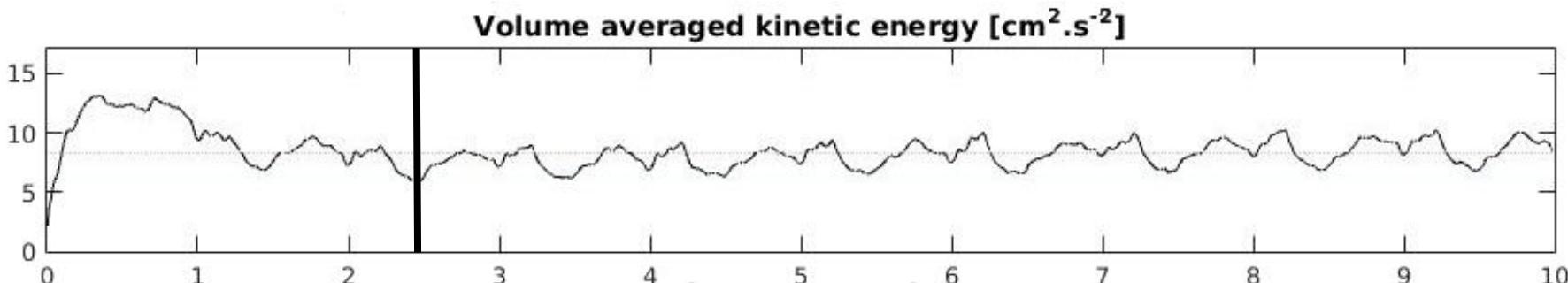


Fig.4 : Affichage de l'évolution au cours des 10 années de simulation d'une variable de diagnostic, ici l'énergie cinétique puis la température moyennées au volume (*croco_diags.m, plot_diags.m*).

Stabilisation des variables de diagnostic

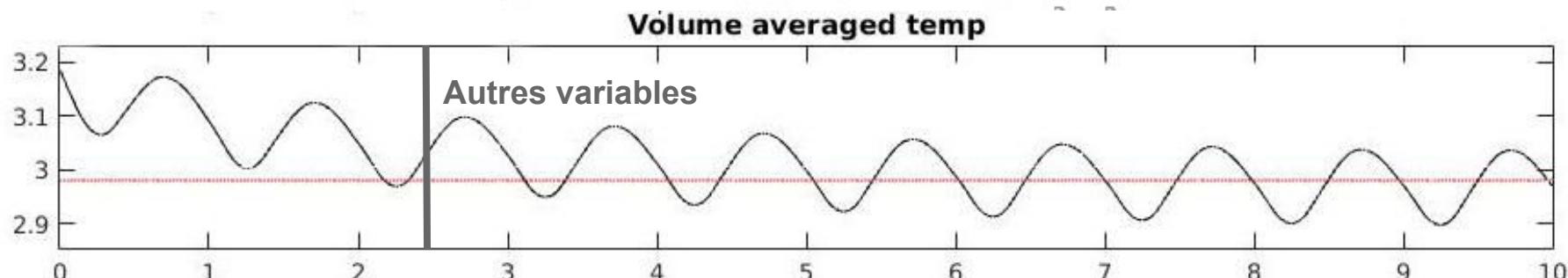


Fig.4 : Affichage de l'évolution au cours des 10 années de simulation d'une variable de diagnostic, ici l'énergie cinétique puis la température moyennées au volume (*croco_diags.m*, *plot_diags.m*).

Stabilisation des variables de diagnostic

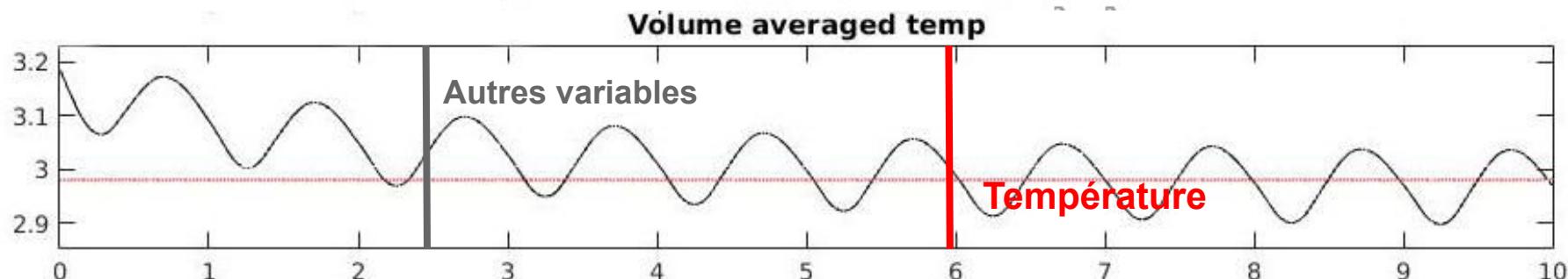


Fig.4 : Affichage de l'évolution au cours des 10 années de simulation d'une variable de diagnostic, ici l'énergie cinétique puis la température moyennées au volume (*croco_diags.m, plot_diags.m*).

- Stabilisation globalement rapide, mais longue pour la **température** et l'**anomalie de volume** (raisons ?)

Principales observations :

Principales observations : (1) Gradients thermo-halins

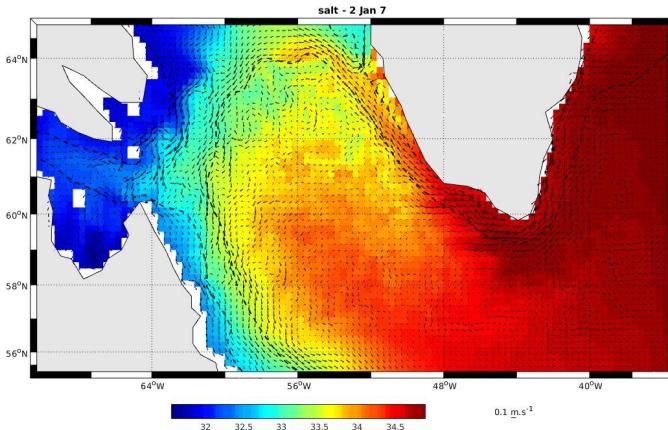


Fig.5 : Champ de salinité et section verticale de température moyennées sur trois jours, lors de l'année 07 de la simulation.

Principales observations : (1) Gradients thermo-halins

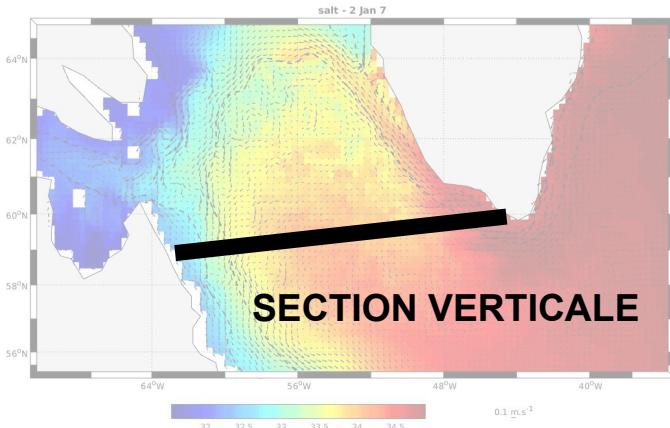


Fig.5 : Champ de salinité et section verticale de température moyennées sur trois jours, lors de l'année 07 de la simulation.

Principales observations : (1) Gradients thermo-halins

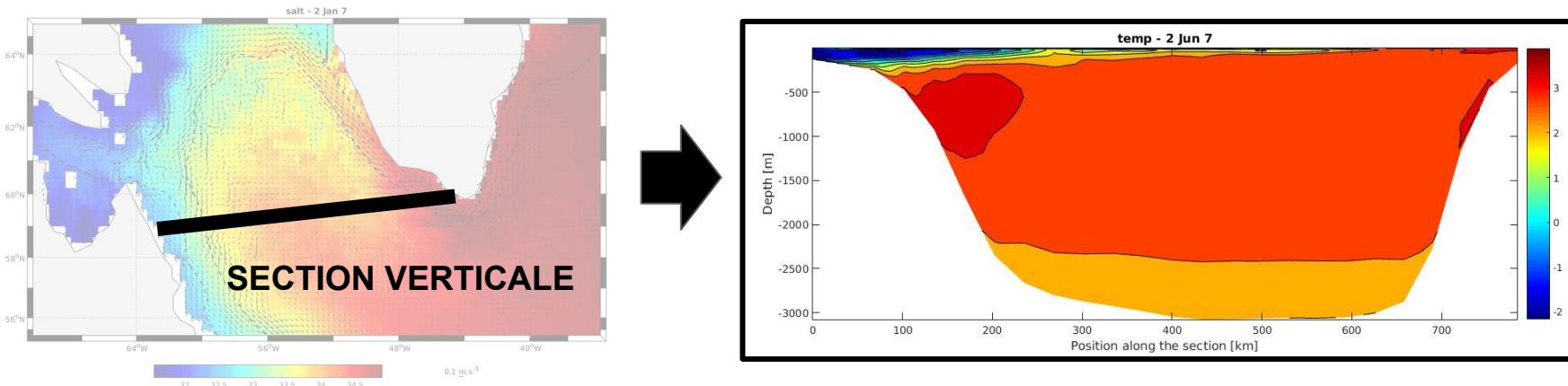


Fig.5 : Champ de salinité et section verticale de température moyennées sur trois jours, lors de l'année 07 de la simulation.

- **Échanges** de chaleur entre hautes et basses latitudes
- Gradients de masse volumique : mise en circulation des masses d'eau

Principales observations : (2) Courant(s) de bord continental

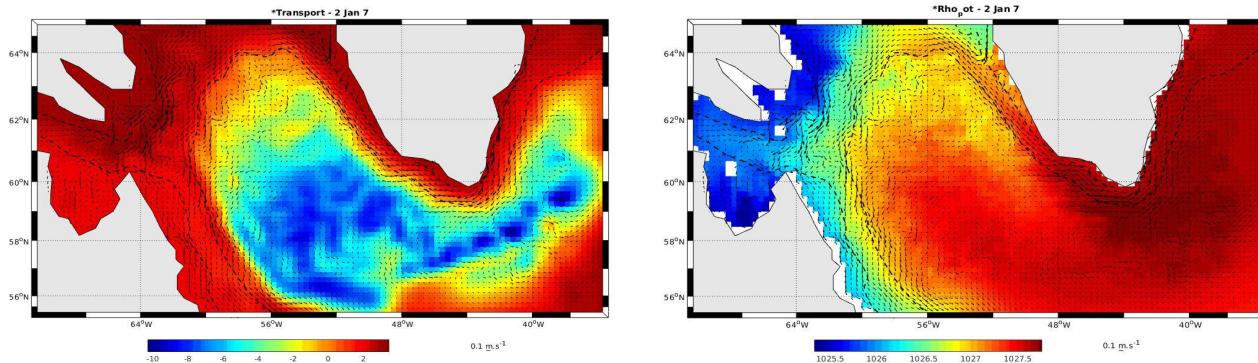


Fig.6 : Représentations du transport volumique et de la densité de l'eau moyennées sur trois jours, à l'année 07 de la simulation.

Principales observations : (2) Courant(s) de bord continental

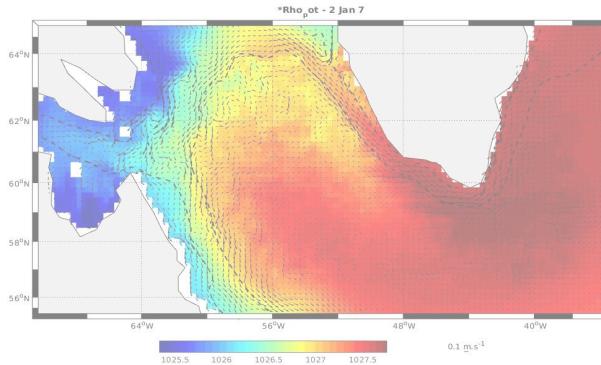
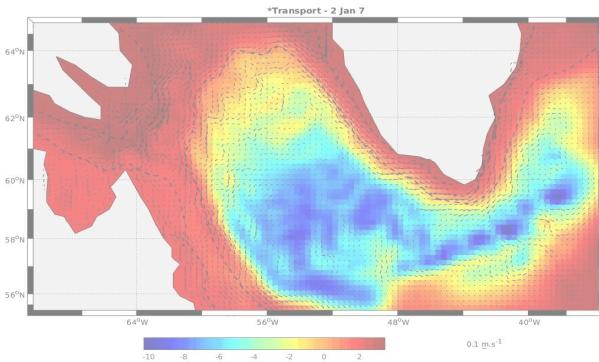


Fig.6 : Représentations du transport volumique et de la densité de l'eau moyennées sur trois jours, à l'année 07 de la simulation.

- Accumulation de masse sur les bords du bassin : divergence centrale
- **Transport d'eau froide, peu salée** vers les régions tempérées

Principales observations : (2) Courant(s) de bord continental

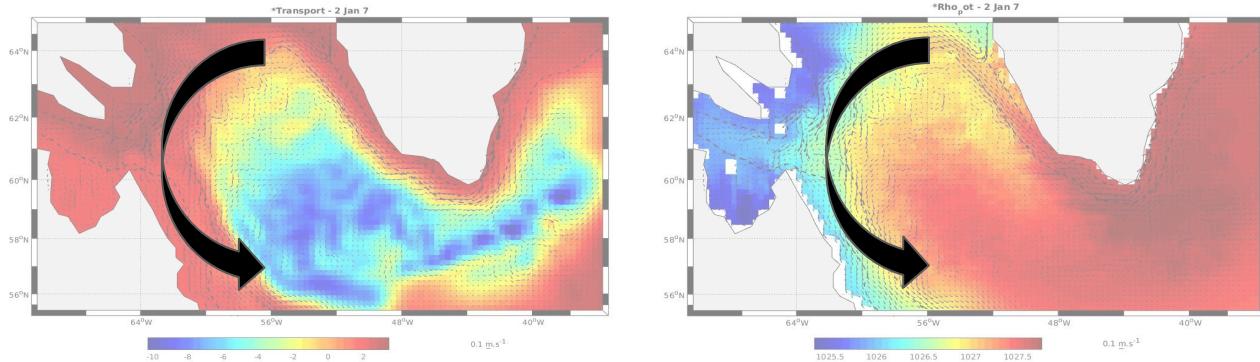


Fig.6 : Représentations du transport volumique et de la densité de l'eau moyennées sur trois jours, à l'année 07 de la simulation.

Courant de bord
Ouest en
surface :
intense, stable

- Accumulation de masse sur les bords du bassin : divergence centrale
- **Transport d'eau froide, peu salée** vers les régions tempérées

Fluctuations saisonnières du courant du Labrador (WLC)

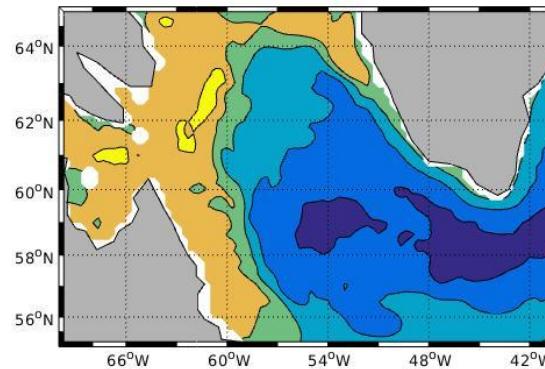
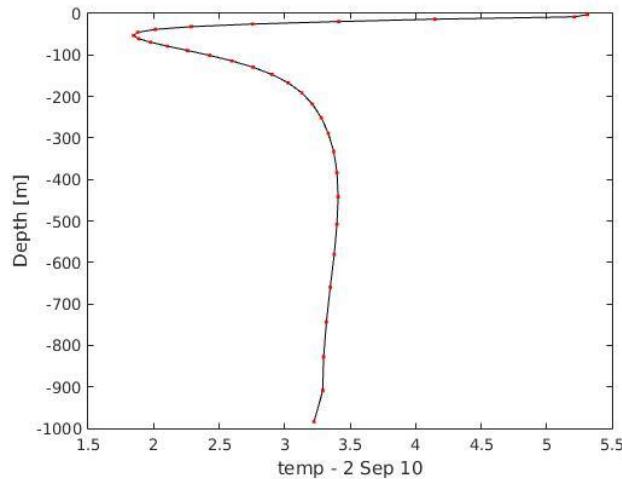


Fig.7 : Profils verticaux de température et champs de pente de la surface libre (script MATLAB d'Eva Lefèvre) moyennés sur trois jours, en saison chaude puis en saison froide.

Fluctuations saisonnières du courant du Labrador (WLC)

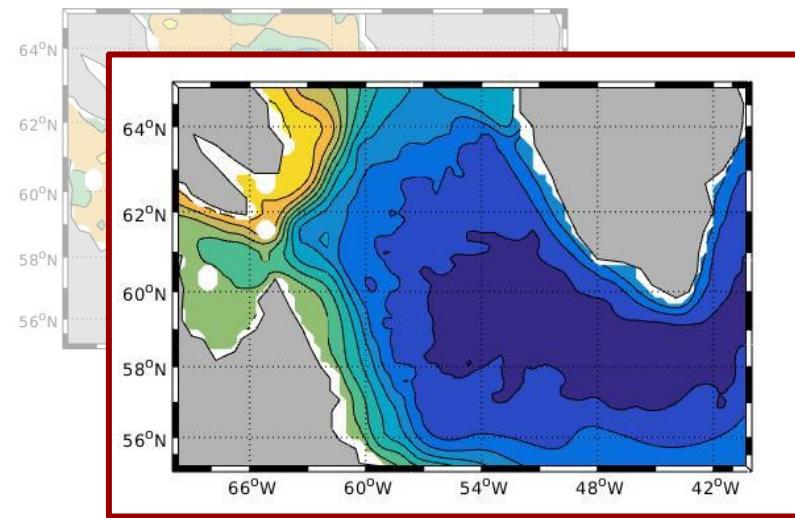
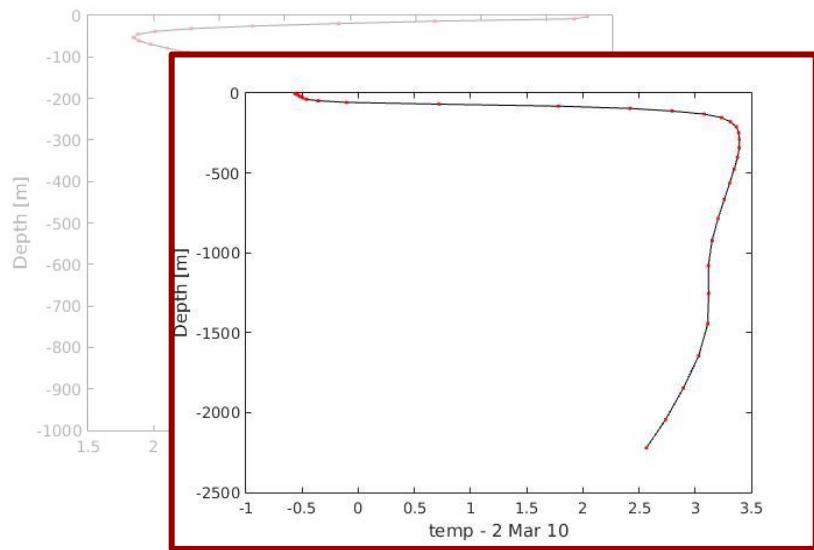


Fig.7 : Profils verticaux de température et champs de pente de la surface libre (script MATLAB d'Eva Lefèvre) moyennés sur trois jours, en saison chaude puis en saison froide.

Fluctuations saisonnières du courant du Labrador (WLC)

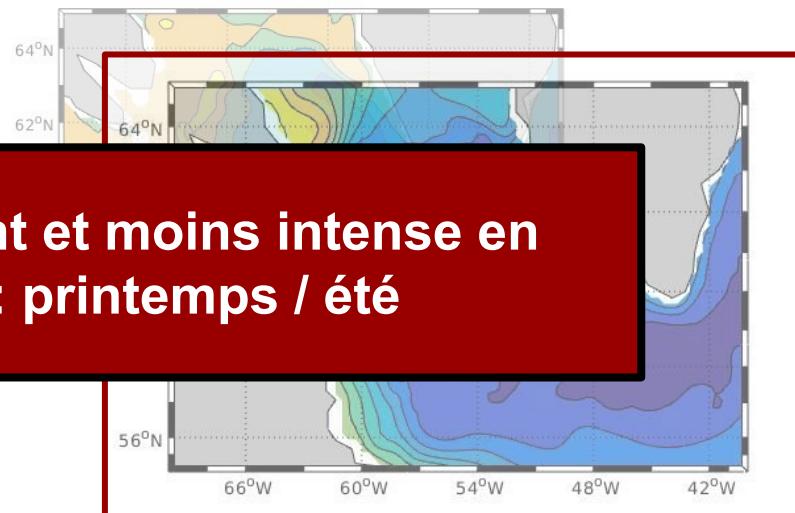
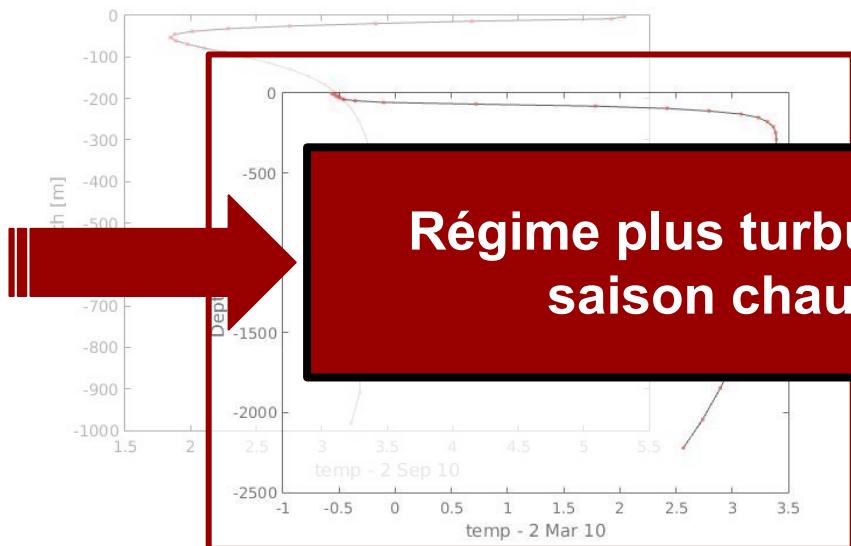


Fig.7 : Profils verticaux de température et champs de pente de la surface libre (script MATLAB d'Eva Lefèvre) moyennés sur trois jours, en saison chaude puis en saison froide.

Une simulation à affiner ?

Une simulation à affiner ?

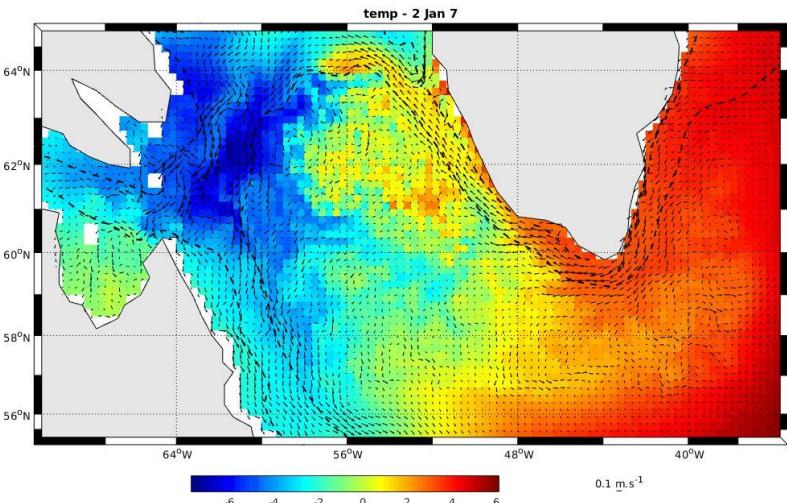


Fig.8 : Champ de température de surface moyen sur trois jours, en Janvier de l'année 07 de la simulation..

- Valeurs de température de surface : généralement cohérentes, mais **localement parfois très basses** au plus fort de la saison froide
- Hypothèses de fermeture du bassin trop fortes ? Mauvais paramétrage ?

Une simulation à affiner ?

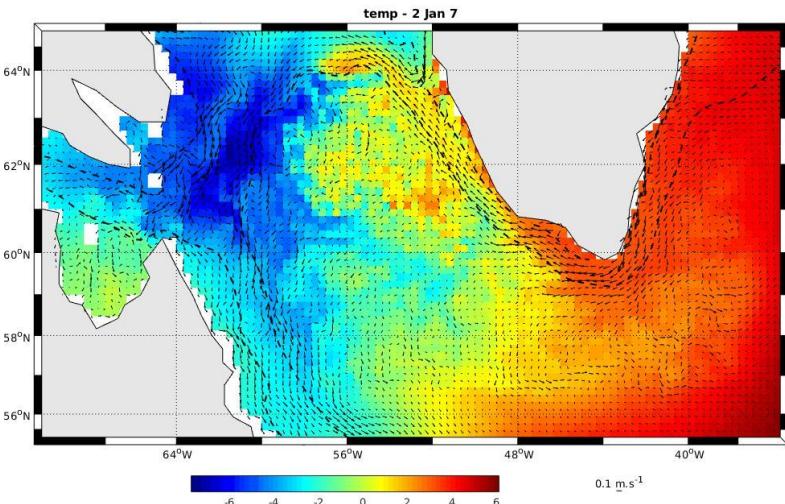


Fig.8 : Champ de température de surface moyen sur trois jours, en Janvier de l'année 07 de la simulation..

- Valeurs de température de surface : généralement cohérentes, mais **localement parfois très basses** au plus fort de la saison froide
- Hypothèses de fermeture du bassin trop fortes ? Mauvais paramétrage ?

Possible présence de détachements de la banquise Arctique ou d'icebergs Groënländais

Une simulation à affiner ? - Le rôle des marées

Une simulation à affiner ? - Le rôle des marées

- Région du Labrador : **estuaries et marnages importants** (plateaux continentaux larges)
- Point amphidromique éloigné du bassin
- **Mélange vertical de la colonne d'eau** renforcé, convection donc eau réchauffée

Une simulation à affiner ? - Le rôle des marées

- Région du Labrador : **estrans et marnages importants** (plateaux continentaux larges)
- Point amphidromique éloigné du bassin
- **Mélange vertical de la colonne d'eau renforcé**, convection donc eau réchauffée

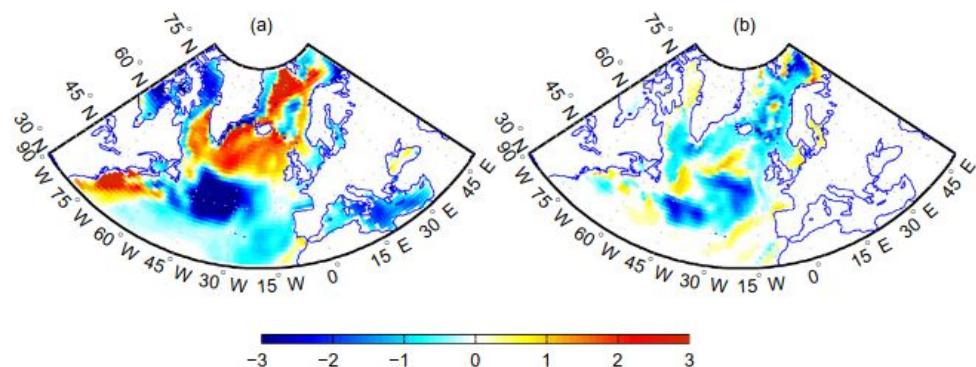


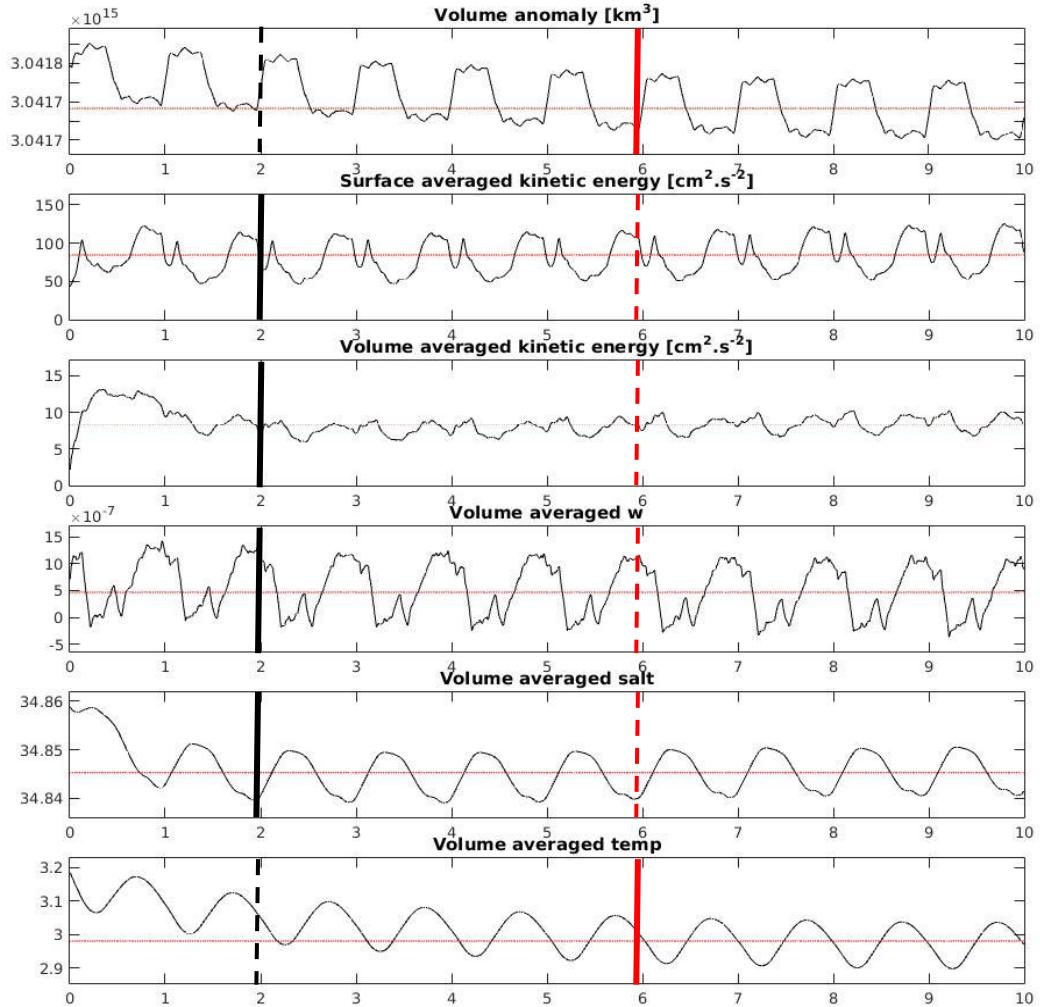
Fig.9 : Représentation en projection conique de l'effet des marées sur la température de surface dans le bassin Atlantique Nord (gauche : différence insitu / modèle sans marées, droite : différence modèle avec / sans ondes de marée).

EN BREF :

- Modélisation d'une région océanique : procédure complexe (paramétrisation, pré-simulation, gestion des résultats...)
- Dans le cas présent : simulation globalement réaliste en concordance avec les données *in situ* (gradients thermo-halins importants, Courant de bord Ouest du Labrador - WLC)
- Divergences locales de la température de surface probablement dues à la présence de la banquise Arctique, ou la non-prise en compte des ondes de marée

DES QUESTIONS ?

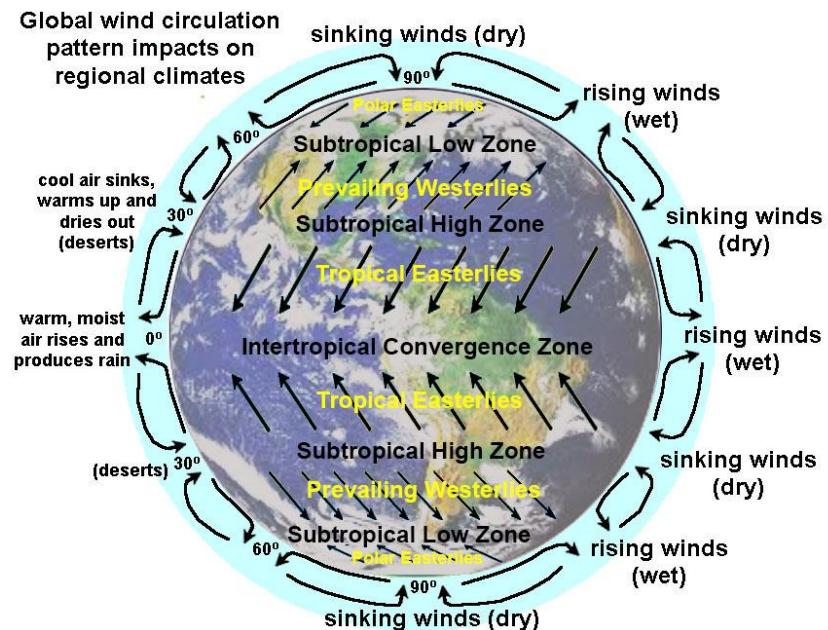
Évolution des variables de diagnostic au cours de la simulation :



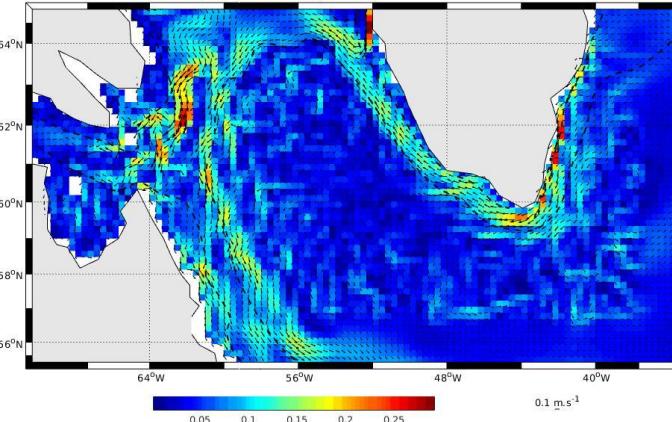
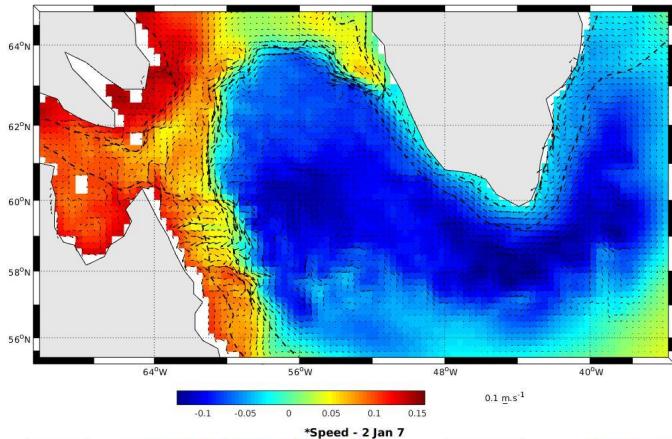
Récapitulatif des paramètres de la simulation :

Paramètres	Zone d'étude
Longitude	70°W - 35°W
Latitude	55°N - 65°N
Pas d'espace x	21 - 22
Pas d'espace y	21 - 22
Hmax (m)	5000
Frontières ouvertes	Sud - Est
Résolution de la grille	$1/3^\circ$
LLm - MMm - N	107 - 60 - 32
Ntimes - Nwrt - Navg	1200 - 120 - 120
Δt (s) - NDTFAST	2160 - 60

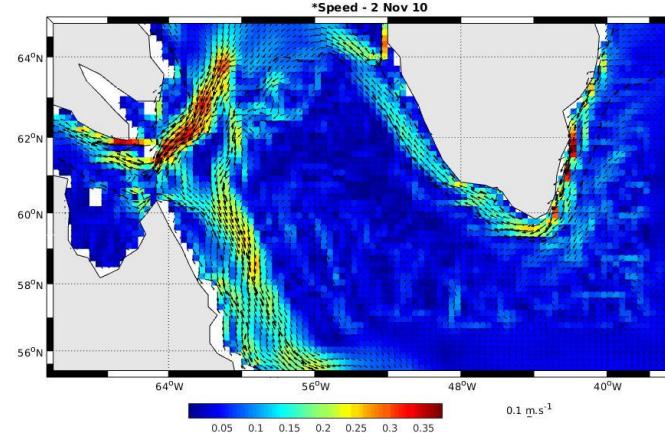
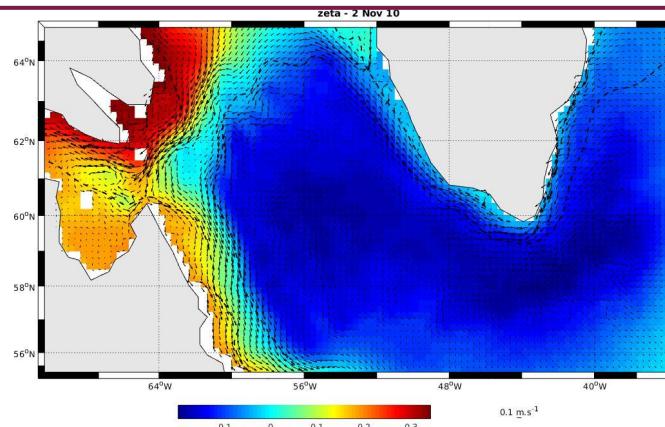
Régimes dominants de circulation atmosphérique sur Terre :



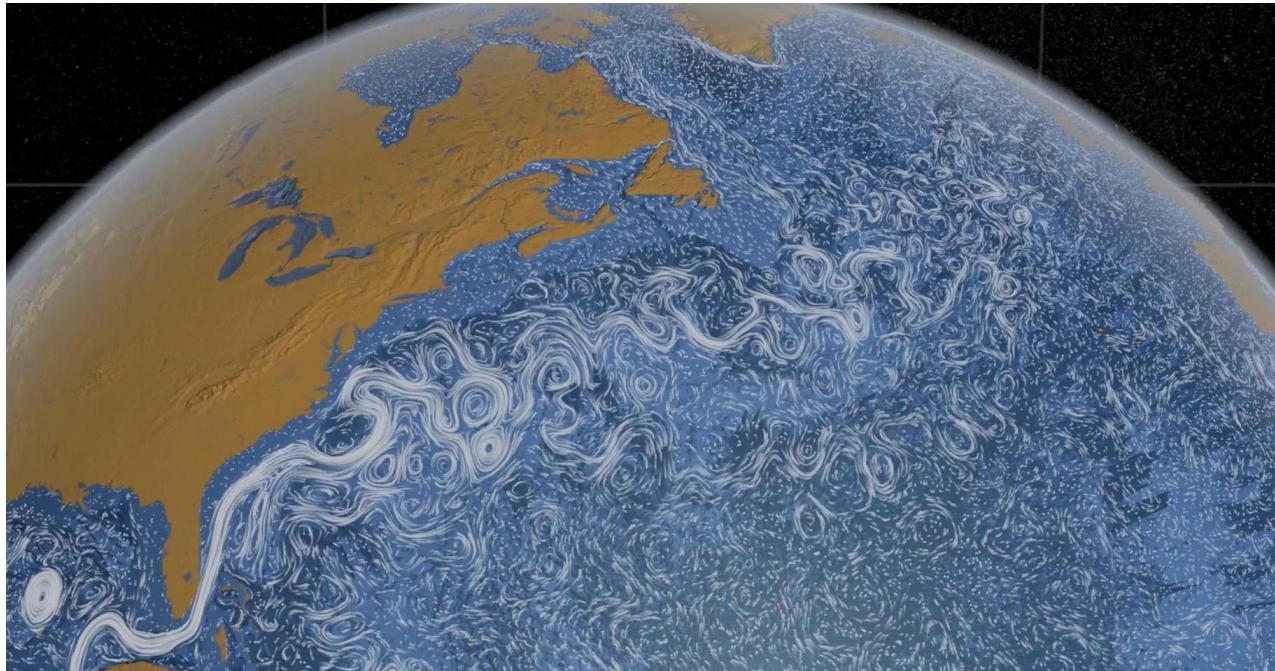
Régime courantologique en saison chaude :



Régime courantologique en saison froide :



The Perpetual Ocean (NASA) :



<https://www.nasa.gov/topics/earth/features/perpetual-ocean.html>