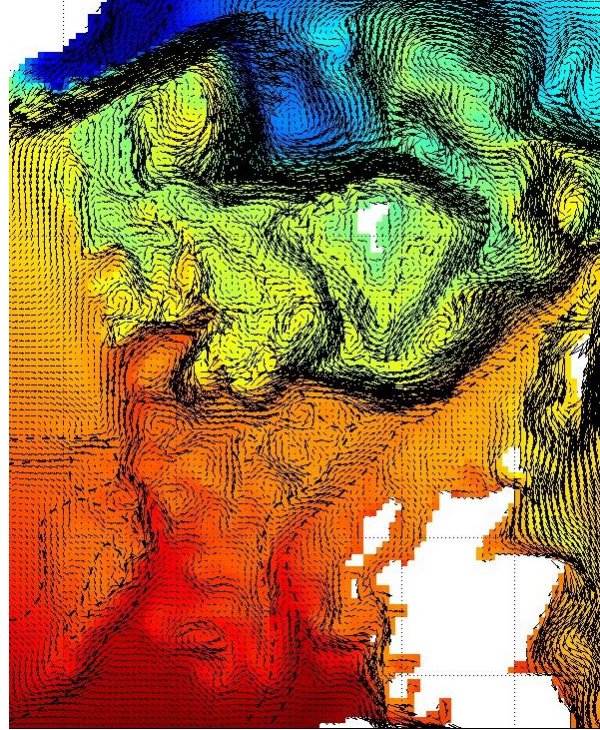


# Etude des flux de l'Atlantique Nord vers les Mers Nordiques entre l'Ecosse et l'Islande à l'aide du modèle CROCO



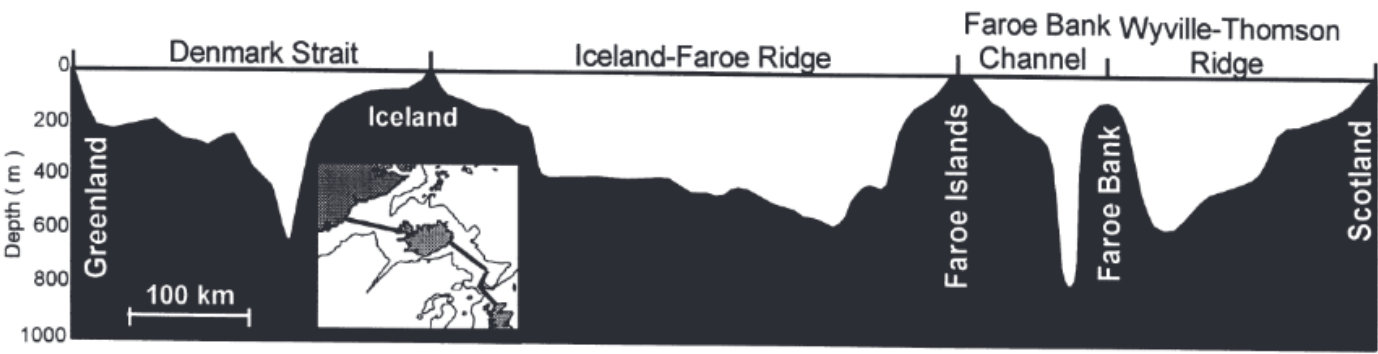
Modélisation 3D Océanique OPB205

Présenté par Nolan Le Goff

Encadré par Andrea Doglioli

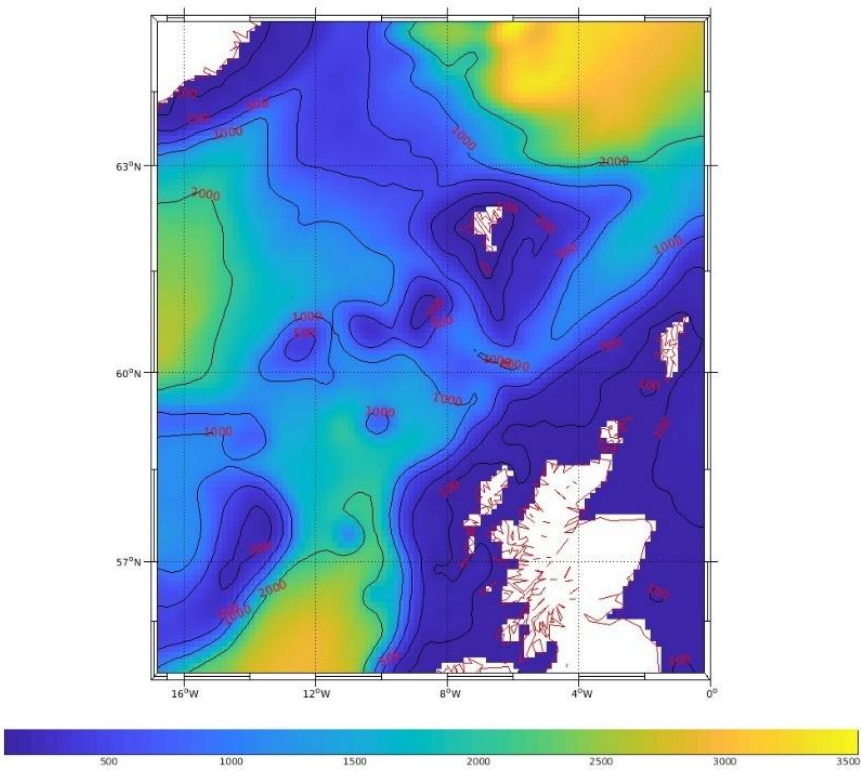
2024/2025, Master 1 sciences de la Mer parcours Océanographie et physique et biogéochimique

- Bathymétrie et intérêt océanographique de cette zone



**Figure 1.** Relief sous-marin induit par la Dorsale Groenland-Ecosse (Hansen & Østerhus, 2000)

- ➡ Zone géographique : Ecosse-Islande
- ➡ Front et tourbillons de méso-échelle
- ➡ Bathymétrie peu profonde et étroite
- ➡ Flux Océan Atlantique ➡ Mers Nordiques
- ➡ Océan Arctique



**Figure 2.** Topographie du modèle (entre l’Islande et l’Ecosse)

- Equations primitives

**Hypothèses :** Hydrostatique, Approximation de Boussinesq, fluide incompressible

**Equation de Navier-Stokes :**

Sur l’horizontale

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \tag{2}$$

Sur la verticale

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_o g \tag{3}$$

Introduction	Matériel et méthodes	Résultat/Discussion	Conclusion
--------------	----------------------	---------------------	------------

- Equations primitives

**Hypothèses :** Hydrostatique, Approximation de Boussinesq, fluide incompressible

**Equation de Navier-Stokes :**

Sur l'horizontale

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (2)$$

Sur la verticale

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_o g \quad (3)$$

**Equation de conservation de la température et de la salinité :**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'w')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial \overline{(S'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(S'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(S'w')}}{\partial z} \quad (5)$$

Introduction	Matériel et méthodes	Résultat/Discussion	Conclusion
--------------	----------------------	---------------------	------------

- Equations primitives

**Hypothèses :** Hydrostatique, Approximation de Boussinesq, fluide incompressible

**Equation de Navier-Stokes :**

Sur l'horizontale

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + f v - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} - f u - \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \quad (2)$$

Sur la verticale

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_o g \quad (3)$$

**Equation de conservation de la température et de la salinité :**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = -\frac{\partial \overline{(T'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(T'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(T'w')}}{\partial z} + \frac{H_c}{\rho_o C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} S = -\frac{\partial \overline{(S'u')}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{(S'v')}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(S'w')}}{\partial z} \quad (5)$$

**Equation d'état de l'eau de mer (TEOS 10):**

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (6)$$

- Grilles et conditions aux frontières

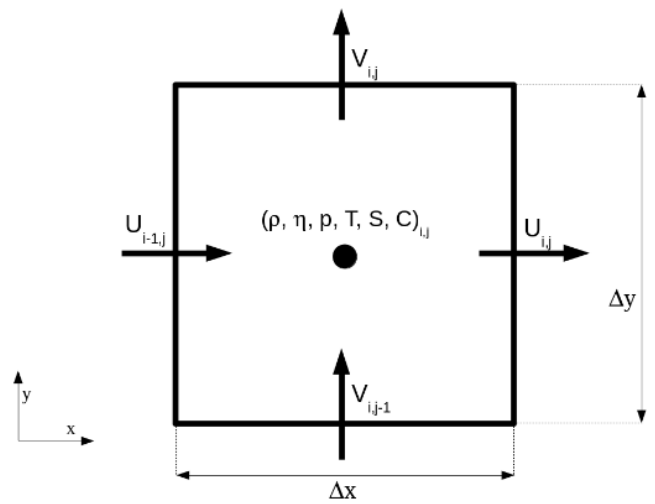


Figure 3. Grille d'Arakawa-C

Discrétisation des équations primitives

➡ Vitesses horizontales et autres variables

- Grilles et conditions aux frontières

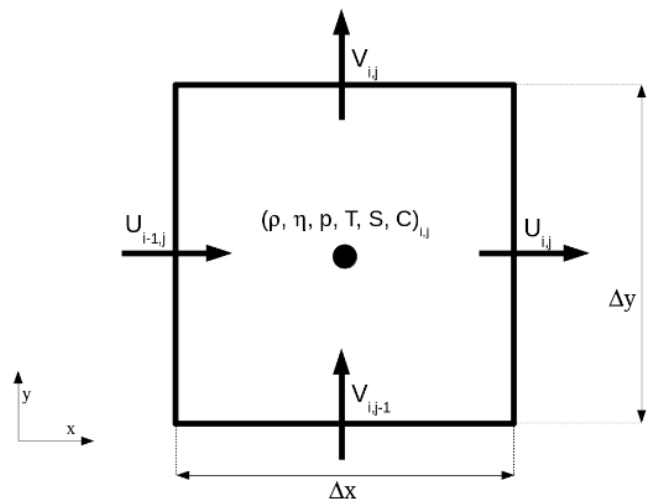
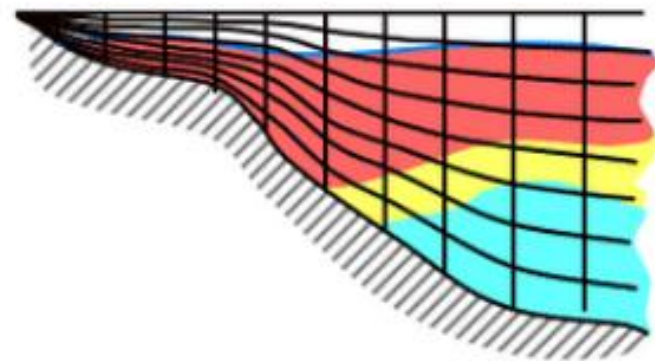


Figure 3. Grille d'Arakawa-C

Discrétisation des équations primitives

➡ Vitesses horizontales et autres variables



➡ Vitesse verticale en suivant la topographie

Figure 4. Coordonnées  $\sigma$  généralisées



- Grilles et conditions aux frontières

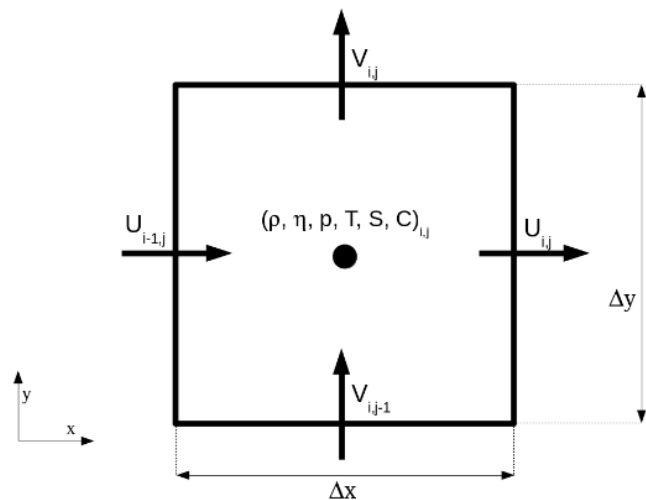
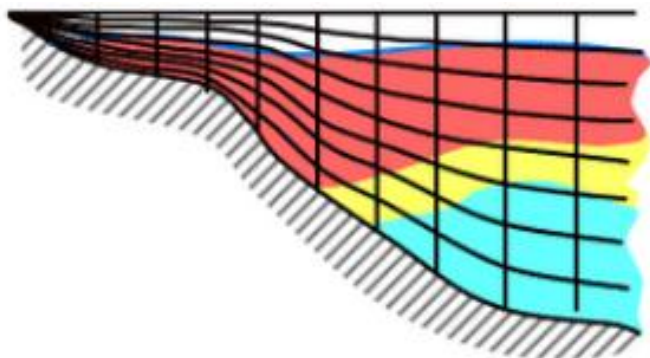


Figure 3. Grille d'Arakawa-C

Discrétisation des équations primitives

➡ Vitesses horizontales et autres variables



➡ Vitesse verticale en suivant la topographie

Figure 4. Coordonnées σ généralisées

Critère CFL

$$\mathcal{C} = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

➡ Vérifie la stabilité du schéma numérique



- Forçage du modèle

**ETOPO** : (script make\_grid.m)

Topographie, bathymétrie et littoral → Données régionales et mondiales  
→ Haute résolution de la surface de la Terre

**ICOADS** : (script make\_forcing.m)

Interface Océan-Atmosphère → Surface océaniques annuelles et mensuelles  
→ 3 siècles de données depuis 1800

**WOA09** : (script make\_clim.m)

Climatologie et mesures océanographique → UAO, température, salinité, sels nutritifs,...  
→ 50 ans de campagnes océanographiques (mailles de grille de 1°)

**Fermeture turbulente** : modèle KPP (Large et al. 1994),  
(script cppdefs.h )

- Paramètres du modèle

**Tableau 1.** Coordonnées de la zone d'étude du modèle

Longitude minimale	Longitude maximale	Latitude minimale	Latitude maximale
-17 °W	0°W	55°N	65°N

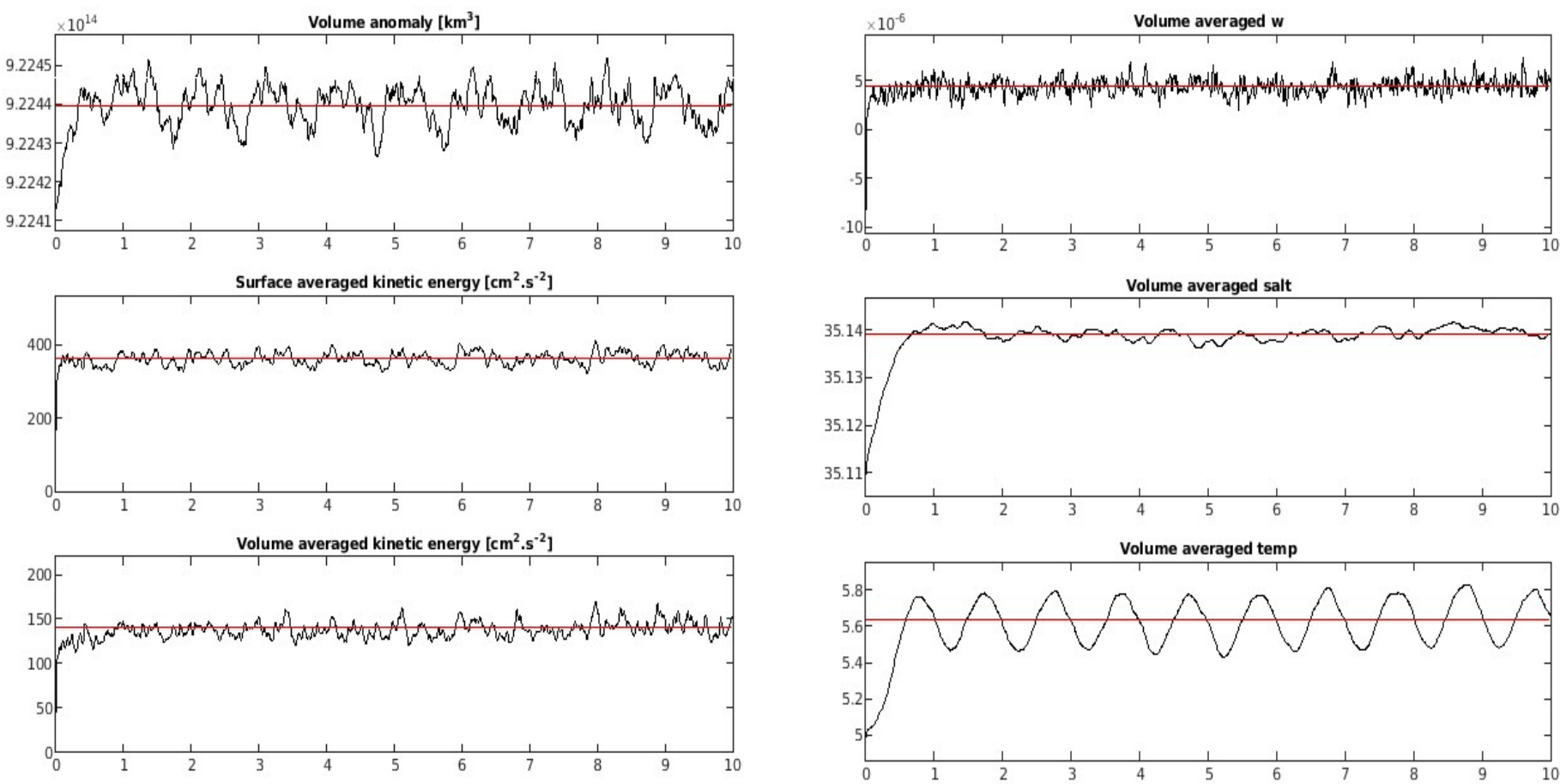
**Tableau 2.** Paramètres de la grille du modèle

<u>LLm</u>	<u>MMm</u>	<u>dxmin</u> ( <u>en</u> km)	<u>dymin</u> ( <u>en</u> km)	<u>dxmax</u> ( <u>en</u> km)	<u>dymax</u> ( <u>en</u> km)	Résolution	N
101	120	7.8264	7.8574	10.6239	10.6112	1/6	32

**Tableau 3.** Paramètres de temps du modèle

NDTFAST	DT	NTIMES	NWRT	NRST	NAVG
60	720	3600	3600	3600	360

- Variables diagnostiques



**Stabilisation de la simulation**

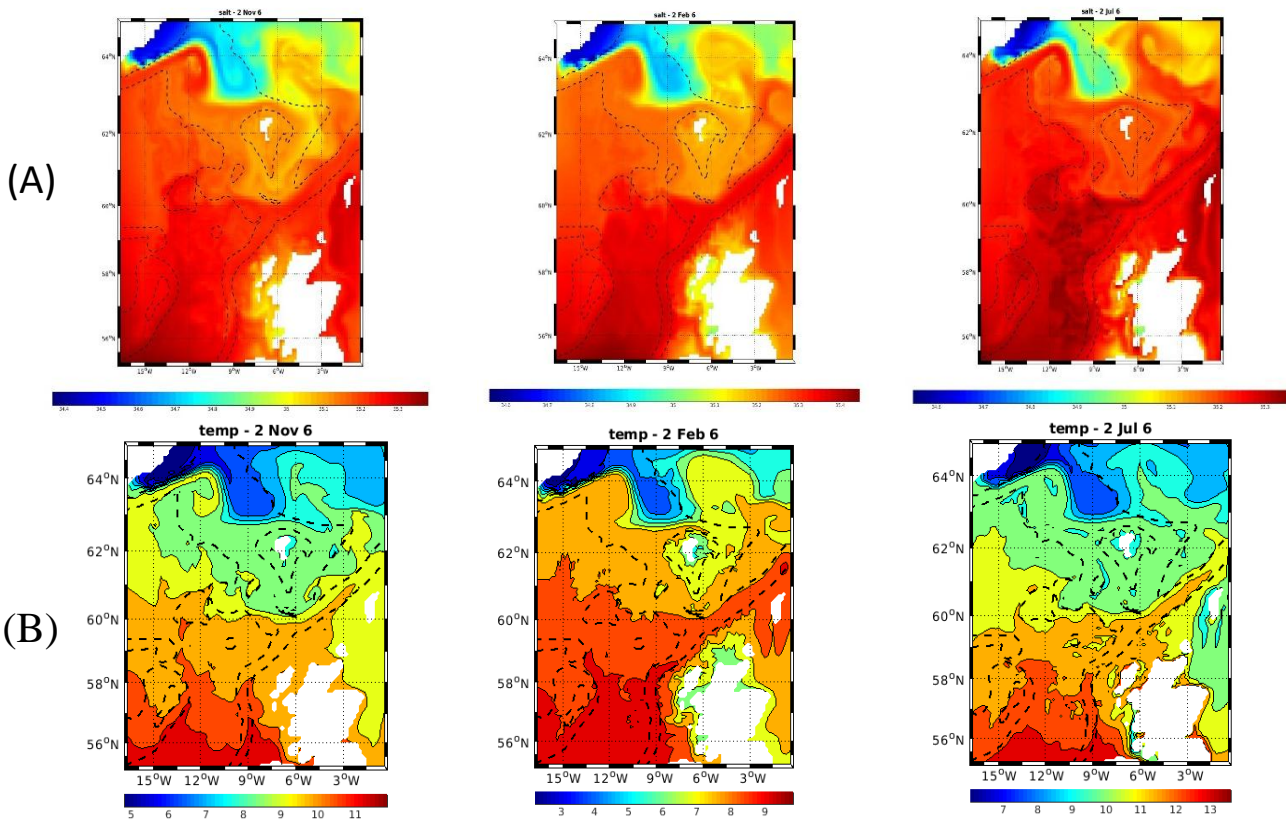
➡ Temps de spin-up : 1 an

**Analyse des résultats**

➡ À partir de la 2<sup>ème</sup> année

**Figure 5.** Variables diagnostiques sur l'ensemble de la simulation sur 10 ans

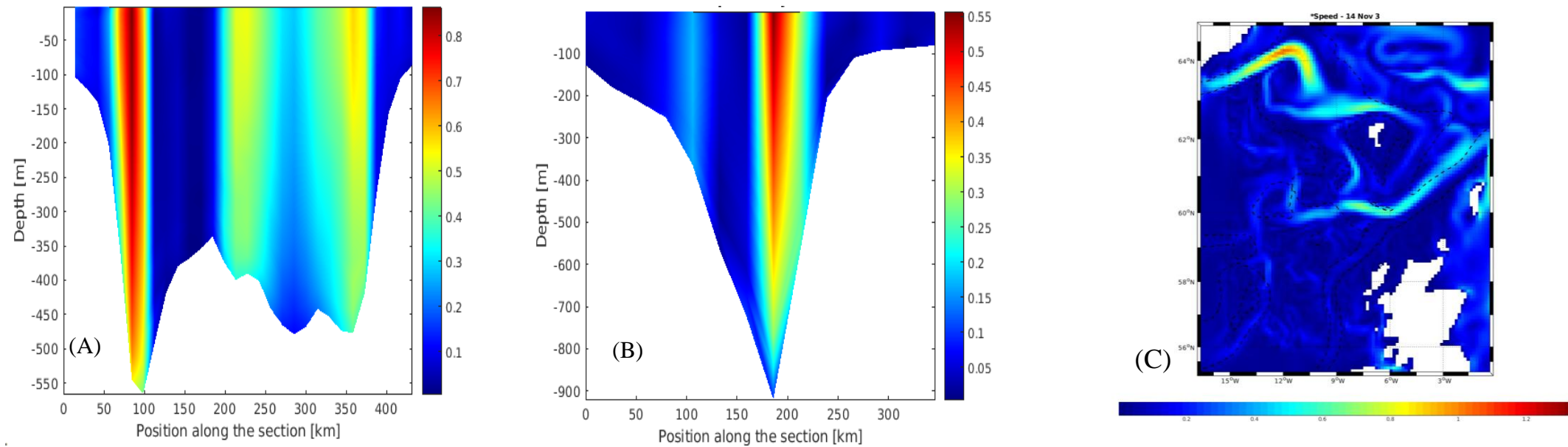
- Saisonnalité de la région



- ➡ Saisonnalité marquée
- ➡ Influence la formation de :
  - ➡ Méandres
  - ➡ Tourbillons de méso-échelle
- ➡ Modification des flux de masses d'eaux Nord Atlantique ↔ Mers nordiques

**Figure 6.** Salinité (A) et température (B) de surface respectivement novembre, février et juillet

- Flux Atlantique vers Mers Nordiques



**Figure 7 :** Transects des vitesses des courants sur la verticale, entre l’Islande et les Iles Féroé (A) et entre les Iles Féroé et l’Ecosse (B) et vitesse des courants en surface.

Topographie ➡ **Pilotage bathymétrique**

Flux Atlantique ➡ **Deux branches** :  
Islande-Féroé = au niveau des côtes Islandaises  
Féroé-Ecosse = au niveau du Canal Féroé-Shetland



- Front océanique entre l’Océan Atlantique et la Mer de Norvège

Zone de front

Mer de Norvège :  
➡ Eau froide et peu salée

Océan Atlantique :  
➡ Eau chaude et salée

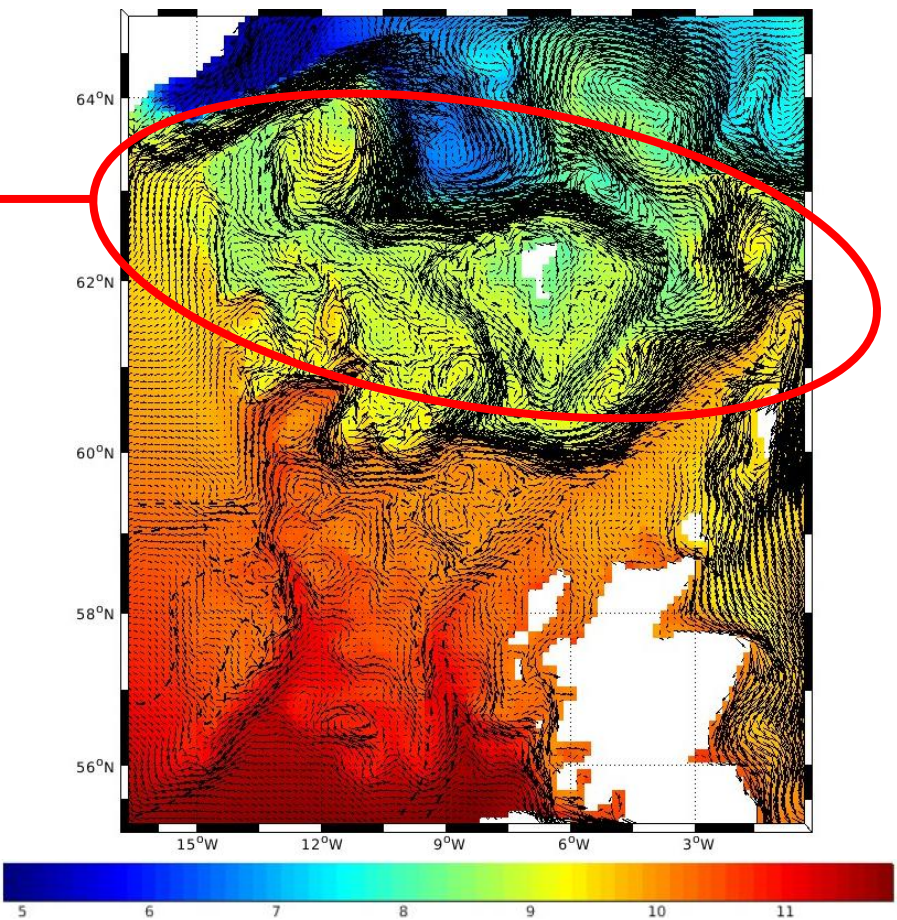


Figure 7. Vecteurs de vitesses et température simulée durant le mois de novembre

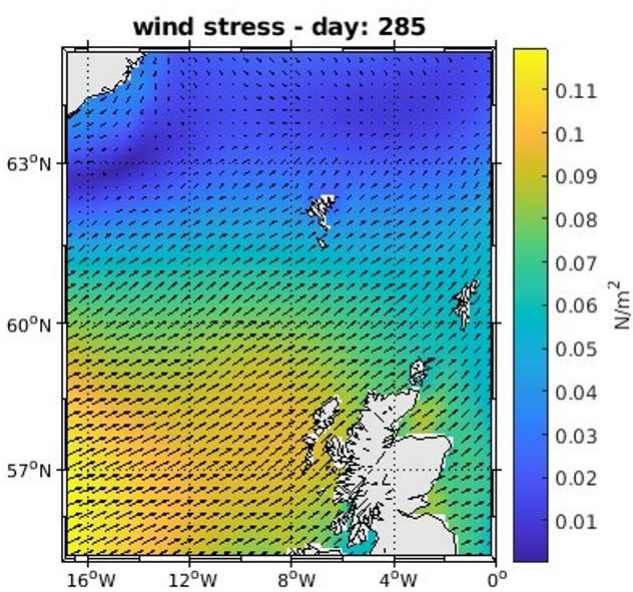
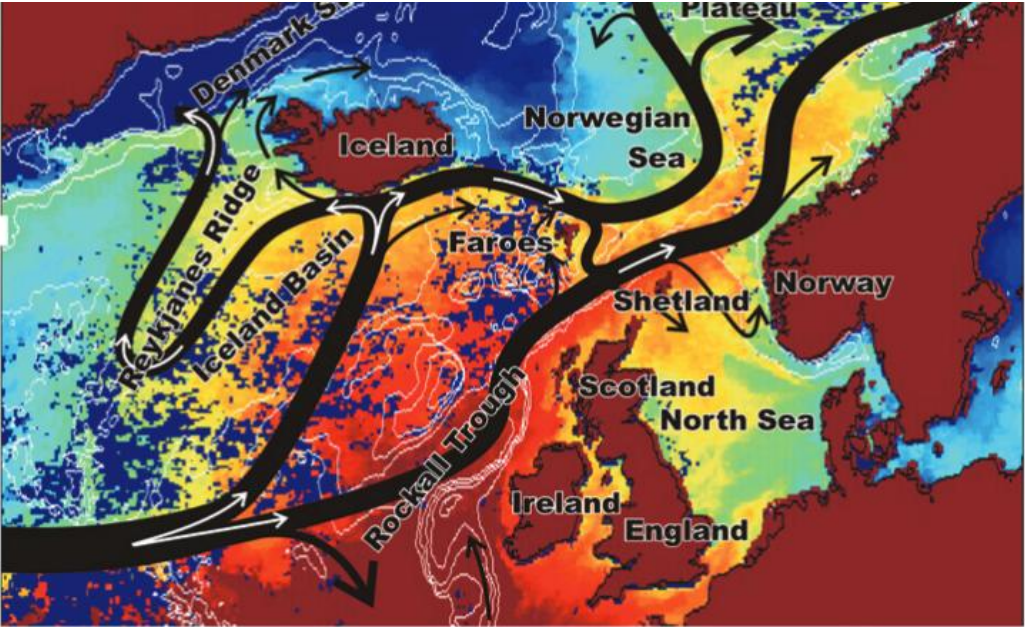


Figure 8. Vecteurs de vitesses du vent en fin d’année

- Echange des masses d'eaux de l'Atlantique Nord et des Mers Nordiques



**Figure 9.** Passage majoritaires des bouées dérivantes en surface (Orvik & Niiler, 2002)

**Processus affectant les masses d'eaux :**

- Bathymétrie
- Vents
- Saisonnalité
- ↳ Méandres et gyres

**Amélioration du modèle :**

- Rajouter Détroit du Danemark
  - ↳ Tous les flux entre les deux régions
- Augmenter la résolution
  - ↳ Déterminer courants sortant et entrant en Atlantique Nord



# Bibliographie

1. Hansen, B., & Østerhus, S. (2000). North atlantic–nordic seas exchanges. *Progress in oceanography*, 45(2), 109-208.
2. Large, W. G., McWilliams, J. C., & Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of geophysics*, 32(4), 363-403.
3. Orvik, K. A. & Niiler, P. (2002). Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophysical research letters*. 29,19,2-1-2-4. doi-org.lama.univ-amu.fr/10.1029/2002GL015002.