



**MERCATOR  
OCEAN**  
INTERNATIONAL



# Impacts des processus couplés sur la stratification océanique

Encadrants :

Jonathan BEUVIER (MOi)

Cindy LEBEAUPIN BROSSIER (CNRM)

Quentin MISI

Master SOAC

Université Paul Sabatier (Toulouse)

Augmenter la précision de la prévision des phénomènes météo-océaniques locaux et à enjeux.

Améliorations pour :

- **l'Océanographie Opérationnelle**
- **la Prévision Numérique du Temps**

→ prise en compte des interactions couplées Océan-Atmosphère (O-A) à fine échelle, permet une meilleure :

- **Représentation des interactions à l'interface air-mer**
- **Description des structures de fine échelle**
- **Évolution des échanges entre l'océan superficiel et l'atmosphère**

La stratification de l'océan superficiel :

- = Stabilité de l'océan / potentiel d'échanges verticaux importants
- Impacte localement température / salinité / densité / CMO

La modélisation couplée O-A permet de représenter explicitement :

- l'influence de l'atmosphère sur l'évolution de la couche océanique superficielle
- l'influence de la stratification sur les échanges air-mer

Nouveau système couplé à l'échelle kilométrique :  
FRA36 (NEMO) / AROME-France (AROME)

## Description des deux modèles et du couplage

Carte du recouvrement des domaines AROME France (topographie en vert-marron (m)) et FRA36 (bathymétrie en bleu (m))

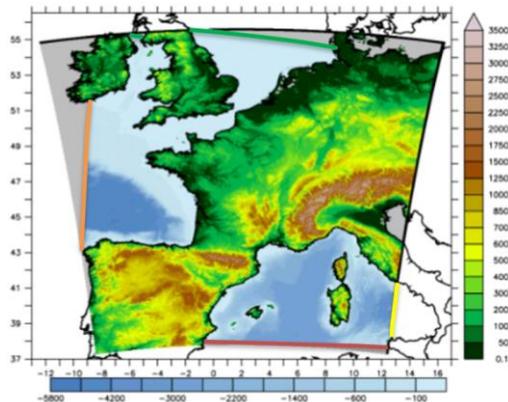
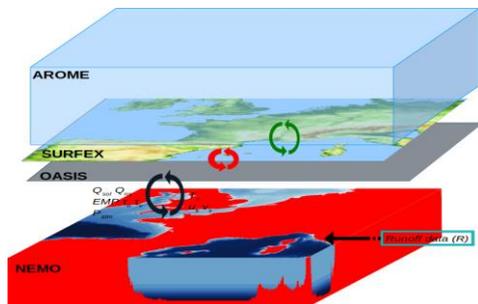


Schéma explicatif couplage AROME/NEMO



## Tableau récapitulatif du fonctionnement AROME/NEMO et du couplage OASIS

Modèle océanique <b>NEMO FRA36</b> (Madec et al., 2022)	Coupleur <b>OASIS</b> (Pianeze et al., 2022)	Modèle Atmosphérique <b>AROME France</b> (Brousseau et al., 2016), (Seity et al., 2011)
v. 4.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>SST</li> <li>Composantes zonale/méridienne de courant de surface</li> </ul>	cy43t2
$\Delta t = 150s$	<p>→</p> <p><b>Fréquence d'échange :</b> 600s</p> <p><b>Méthode d'interpolation :</b> bilineaire</p> <p>←</p>	$\Delta t = 50s$
$\Delta x = 1/36^\circ$		$\Delta x = 1.3 \text{ km}$
50 niveaux z	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux solaire net</li> <li>Flux « non-solaire » net (flux IR net + flux de chaleur latente + sensible)</li> <li>Flux d'eau (Evaporation + Précipitations)</li> <li>Composantes zonale/méridienne de la tension de vent en surface</li> <li>Pression de surface</li> </ul>	90 niveau $\eta$
C.I. = eNEATL36 (Mercator en R&D)		C.I. = Analyses AROME-France (MF)
C.L. = Global 1/12° (Mercator en R&D)		C.L. = Prévission IFS (CEPMNT)

## Protocole :

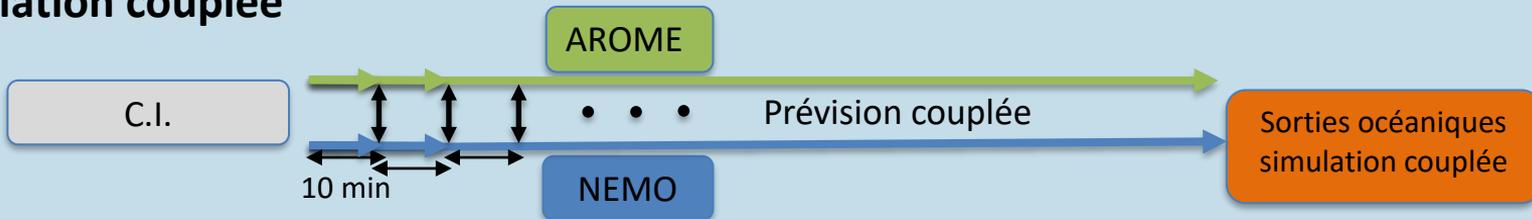
- Simulation Forcée pour l'océan
- Simulation Couplée O-A

C.I. et C.L identiques

## Simulation Forcée

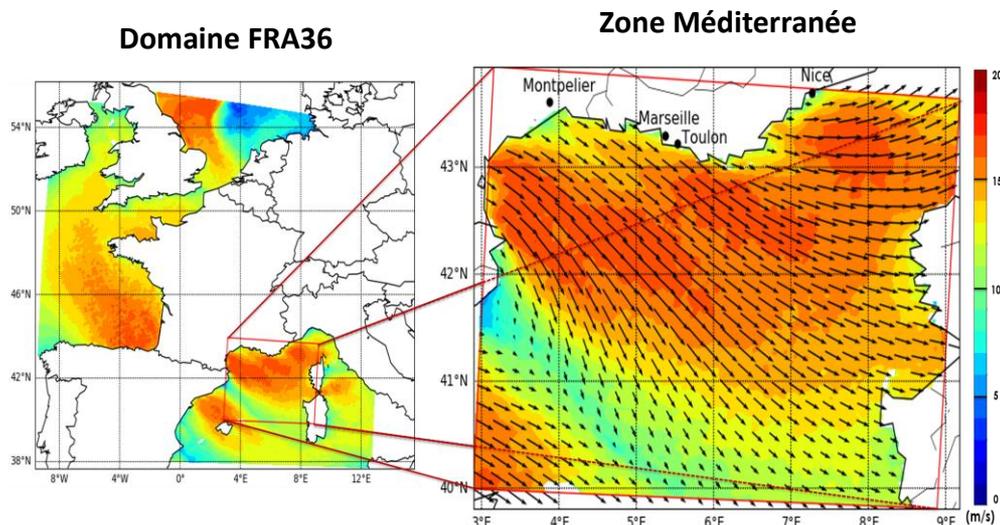


## Simulation couplée



## Description du cas et de la zone sélectionnée

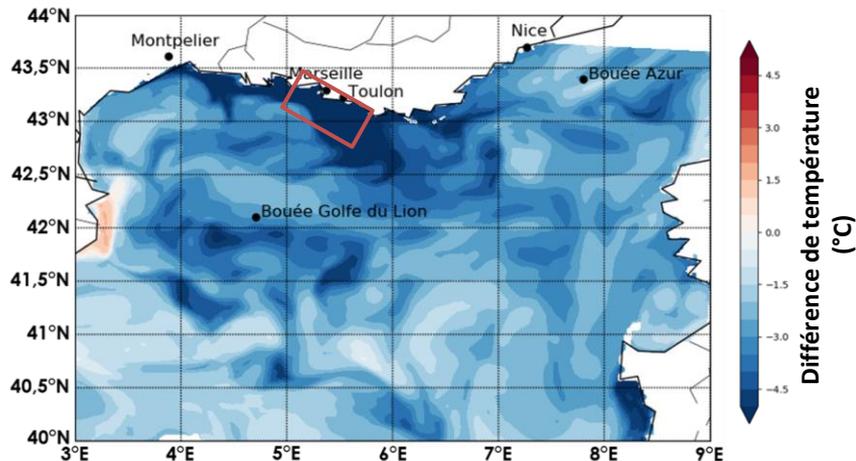
- Etude de l'impact du couplage O-A sur la stratification lors d'un événement de fort vent.
- Simulations du 23/09/2020 au 30/09/2020
- Vent fort d'Ouest / Nord du 24 au 27/09 impactant une grande partie de la zone
- Zone d'étude privilégiée : appelée zone Méditerranée



**Norme du vent en surface ( en couleur en m/s) moyennée sur la journée du 25/09/2020**

## Etude globale de la zone

**Différence de température en surface entre le 29 et 23/09/2020**



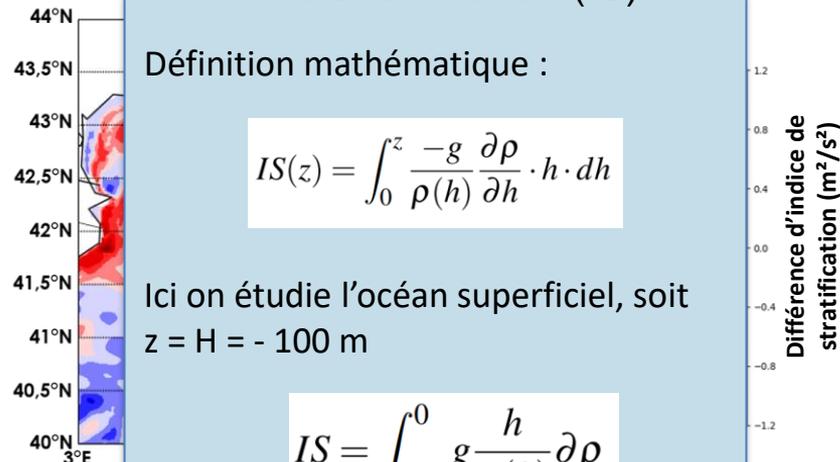
**Différence d'indice de stratification à**  
**Indice de stratification (IS) :**

Définition mathématique :

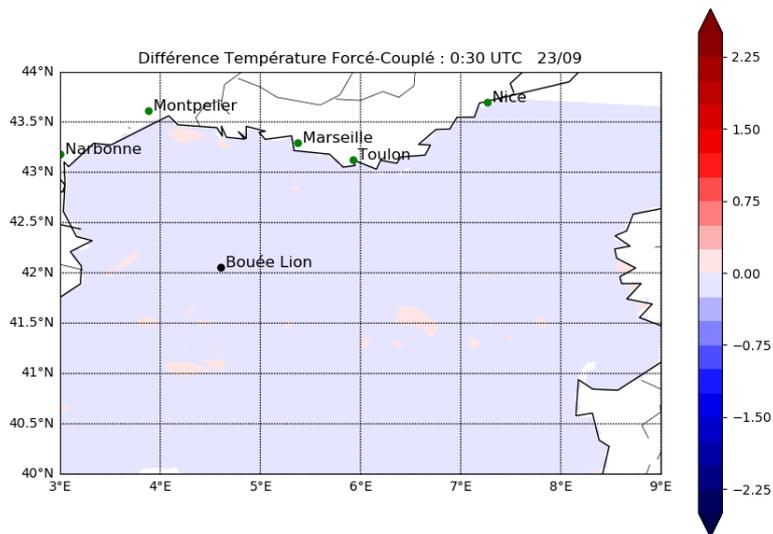
$$IS(z) = \int_0^z \frac{-g}{\rho(h)} \frac{\partial \rho}{\partial h} \cdot h \cdot dh$$

Ici on étudie l'océan superficiel, soit  
 $z = H = -100$  m

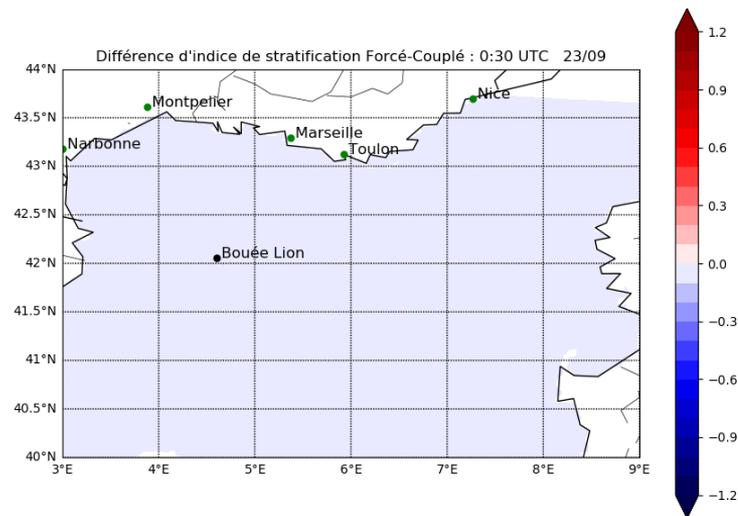
$$IS = \int_{-H}^0 g \frac{h}{\rho(h)} \partial \rho$$



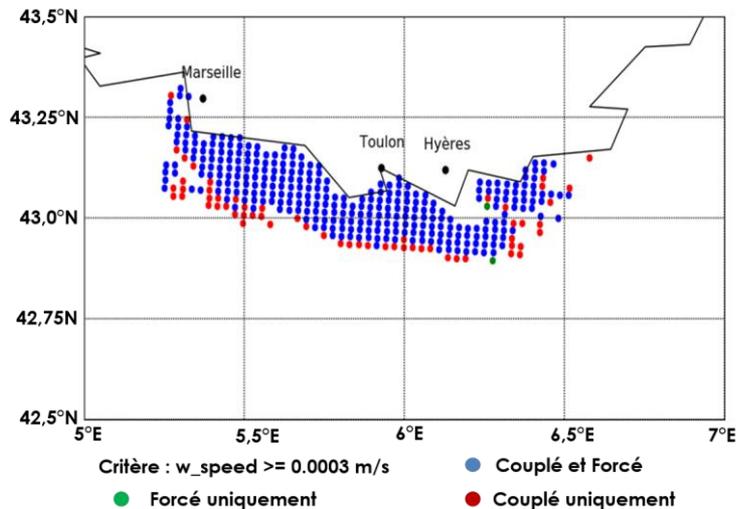
Evolution de la différence de température de surface ( $^{\circ}\text{C}$ ) entre les modèles forcé et couplé



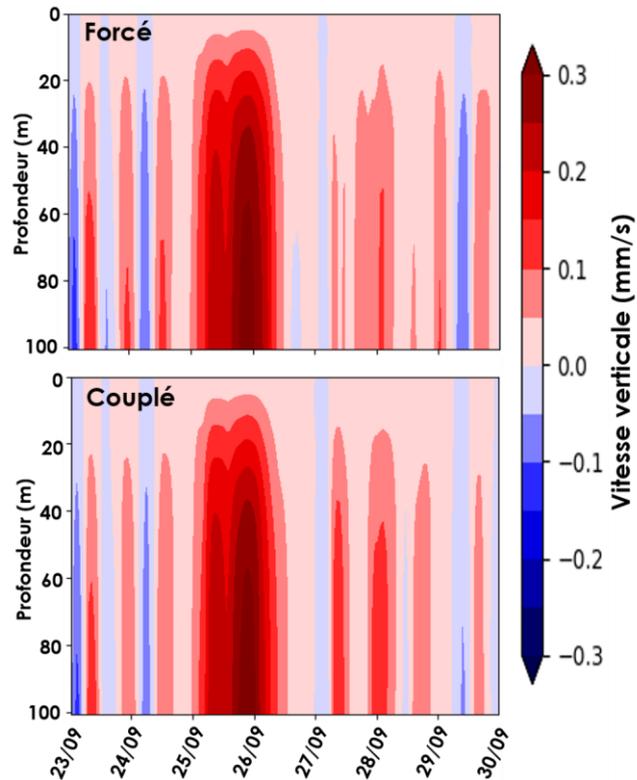
Evolution de la différence l'indice de stratification [0-100m] ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) entre les modèles forcé et couplé



Carte de la zone d'upwelling



Diagrammes de Hovmöller de la vitesse verticale dans la zone d'upwelling (23-30/09/2020)



## Comparaisons bouées et scores

Diagrammes de Hovmöller de la température

Bouée Lion

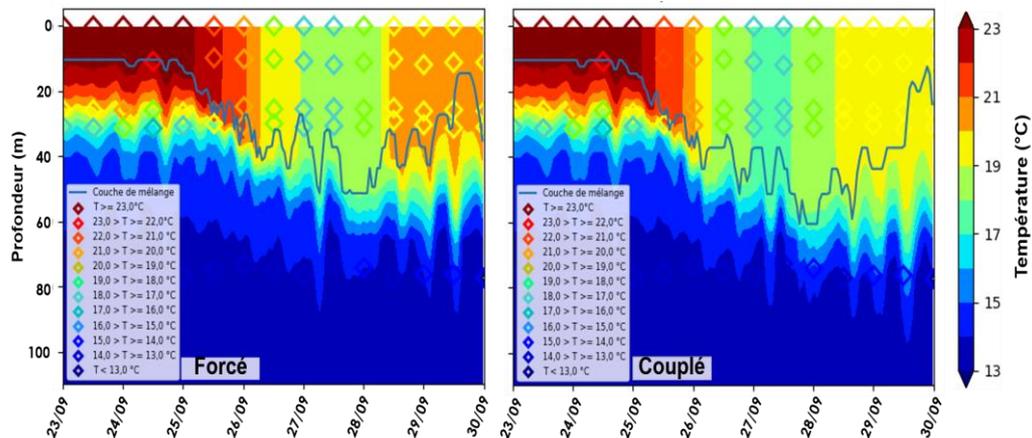
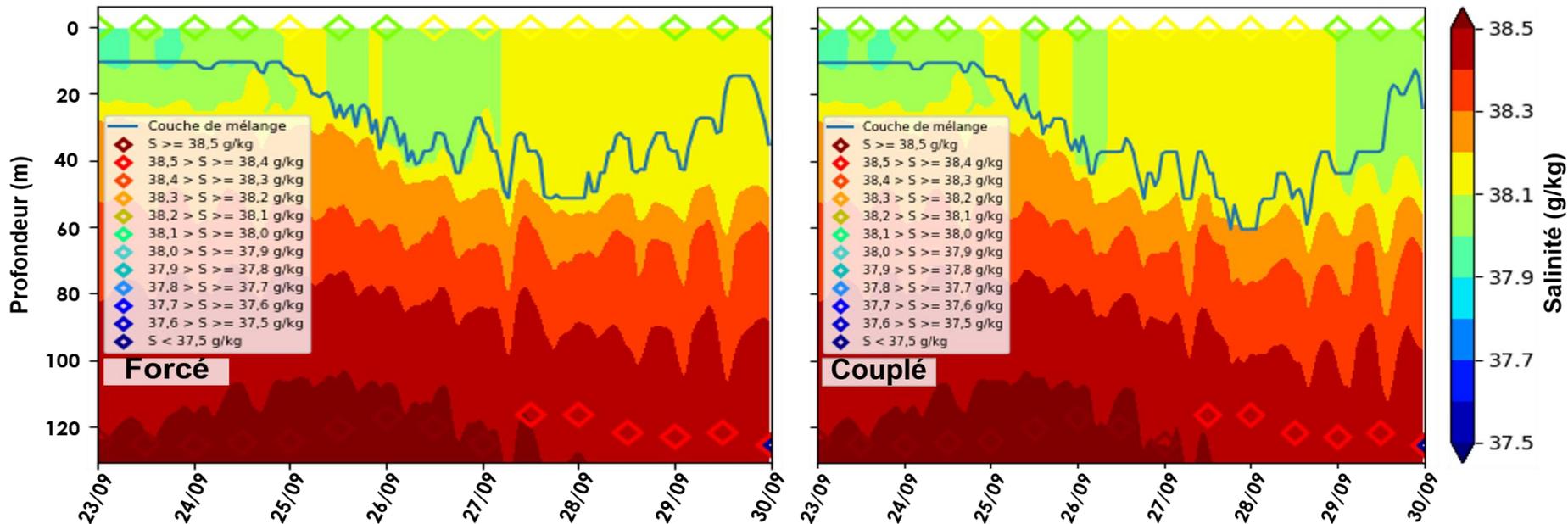


Tableau des scores en Température sur la zone Méditerranée (23-29/09/2020)

Biais simu. – obs.	Forcée	Couplée	Amélioration Couplée / Forcée
Toutes profondeurs	1.414	1.2424	12%
Surface	0.6954	0.2981	53%
0-10m	0.8743	0.4968	43%
10-20m	1.5977	1.0676	40%
20-40m	3.7569	3.6786	2%
40-60m	1.9572	2.0849	-6%
60-80m	0.3875	0.3958	-2%
80-150m	0.2843	0.2692	5%

## Diagrammes de Hovmöller de la salinité

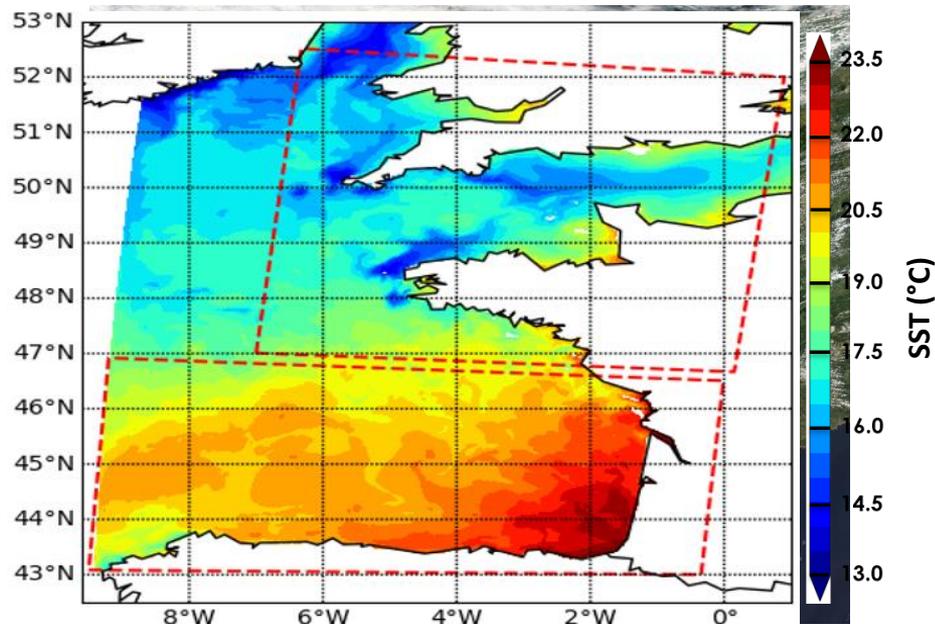
### Bouée Lion



### Description du cas et de la zone sélectionnée

- Etude de l'impact du couplage O-A sur le cycle diurne océanique
- Simulations du 14/08/2021 au 15/08/2021
- Temps calme et présence de nuages bas
- Zone d'étude privilégiée : appelée zone Gascogne

Situation du 14 août 2021 : Image satellite ("Corrected SST (°C) moyennée sur le 14/08/2021 sur la partie Manche-Gascogne du domaine FRA36 (WorldView.earthdata.nasa.gov).

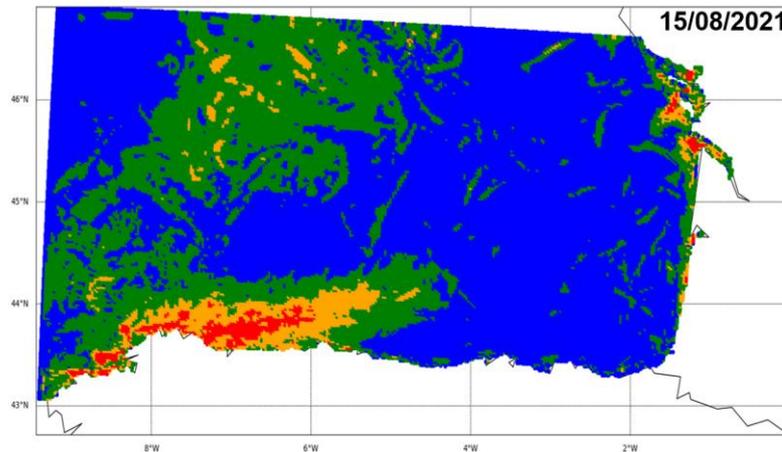
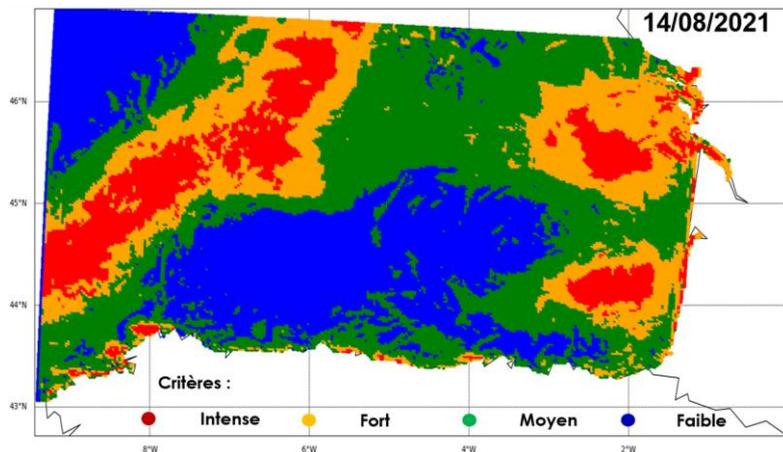


### Cycle diurne de SST (critère DTS24)

$$DTS24 = SST_{\max} (\text{jour}) - SST_{\min} (\text{jour})$$

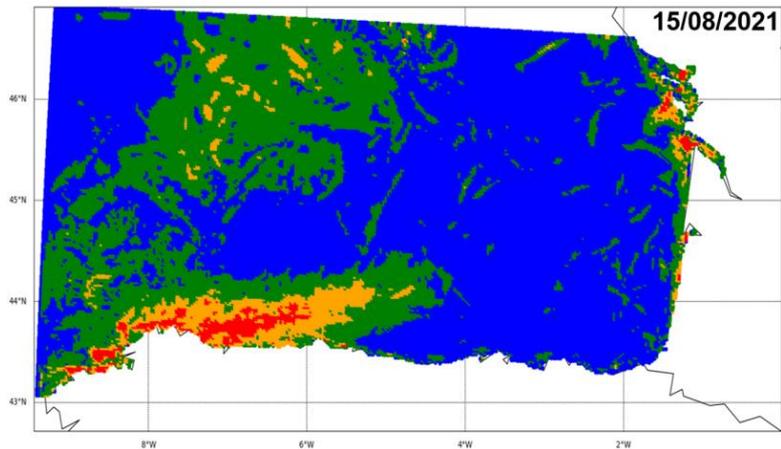
- Faible :  $DTS24 \leq 0.5^{\circ}\text{C}$
- Fort :  $1.0 < DTS24 \leq 1.5^{\circ}\text{C}$
- Moyen :  $0.5 < DTS24 \leq 1.0^{\circ}\text{C}$
- Intense :  $DTS24 > 1.5^{\circ}\text{C}$

### Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

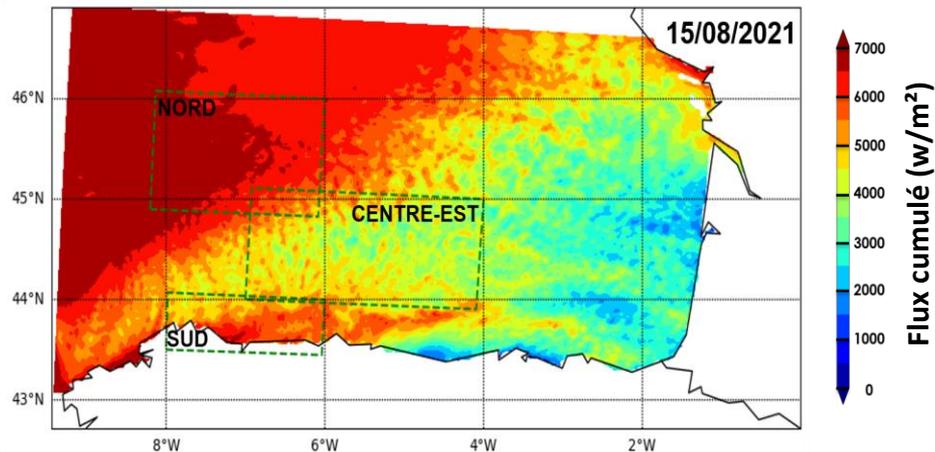


## Comparaison aux flux solaires

### Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

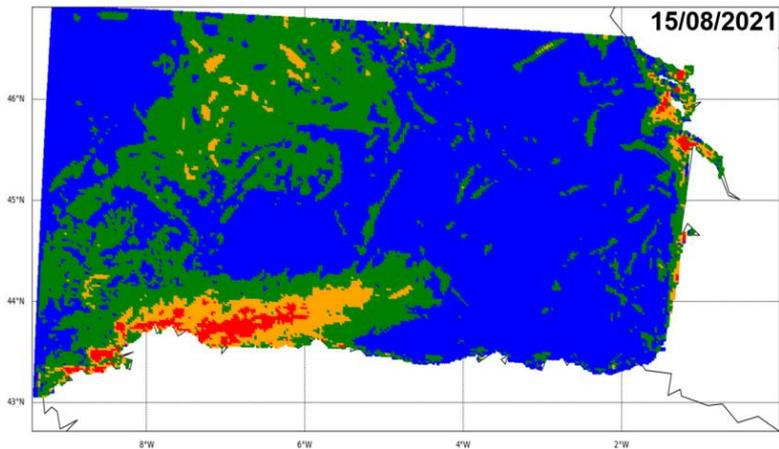


### Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Gascogne

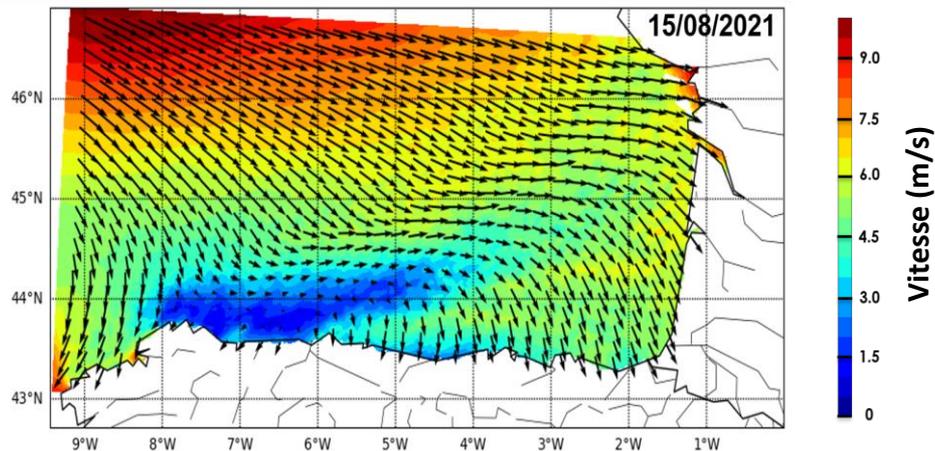


## Comparaison au vent

Détermination des zones avec un fort DTS24  
sur la zone Gascogne

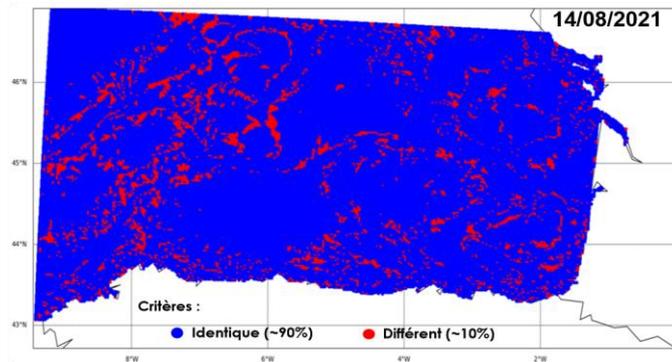


Norme du vent moyenné sur une journée  
sur la zone Gascogne



## Comparaisons entre simulations et scores

Comparaison  
du critère  
DTS24 entre  
simulations  
forcée/couplée



Différence de IS  
moyenne  
journalière  
entre  
simulations  
forcée/couplée

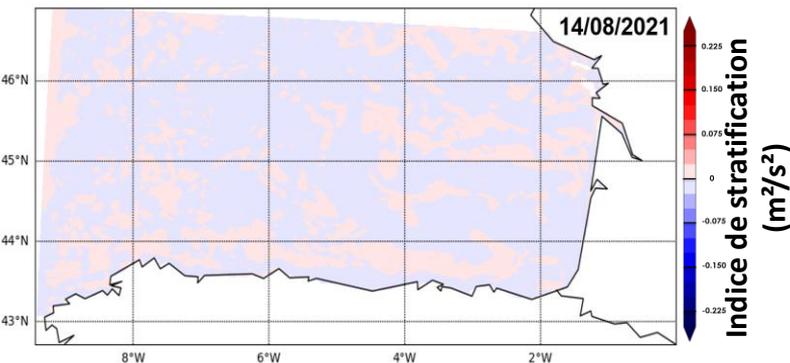
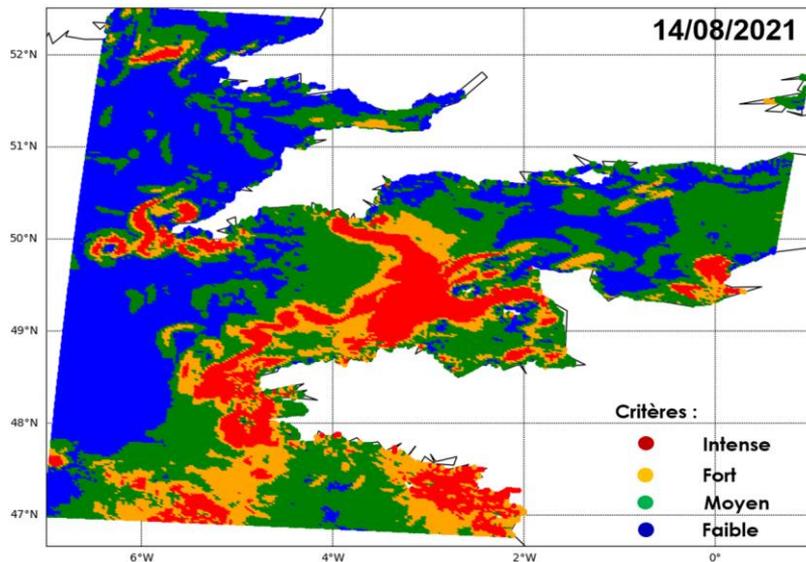


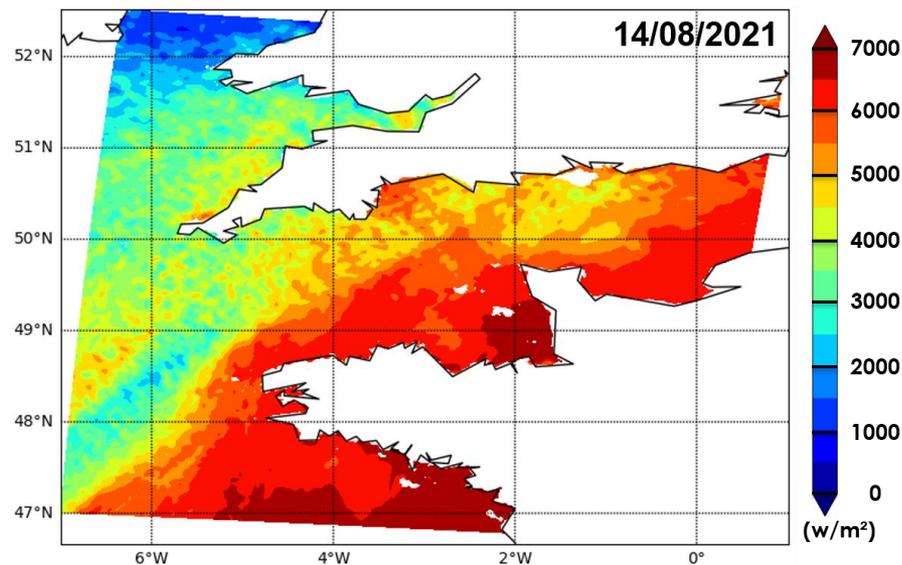
Tableau des scores en Température sur la zone Gascogne (14-15/08/2021)

Biais simu. – obs.	Forcée	Couplée	Amélioration Couplée / Forcée
Toutes profondeurs	0.1283	0.1317	-2.7 %
Surface	0.3579	0.3631	-2.9 %
0-10m	0.2335	0.2385	-2.1 %
10-25m	-0.3712	-0.3623	2.4 %
25-50m	-0.2131	-0.2177	-2.1 %
50-150m	0.1144	0.1145	-0.2 %

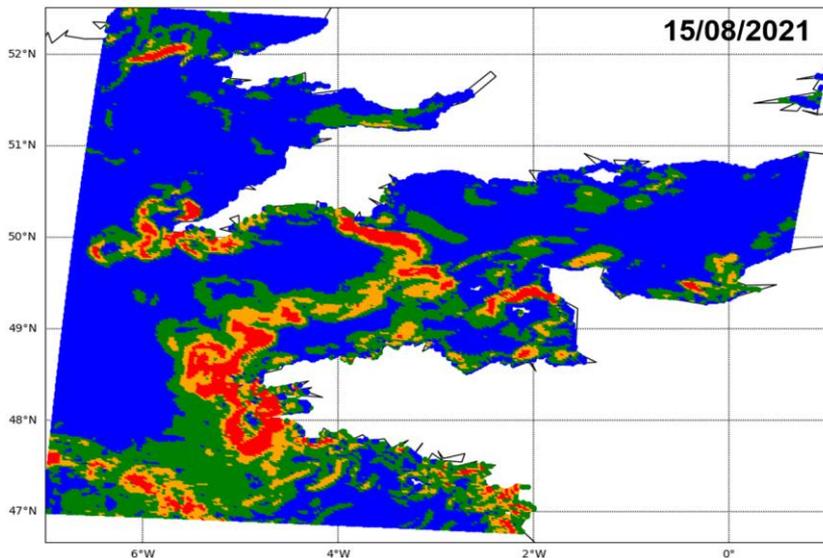
## Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Manche



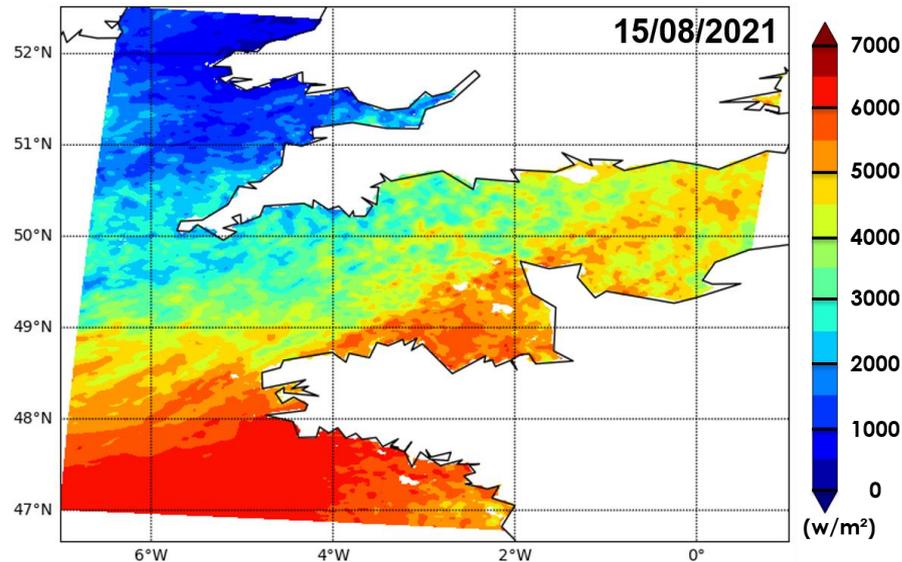
## Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Manche



## Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Manche



## Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Manche



## Résumé :

- **Nouveau système couplé O-A à fine échelle sur la France métropolitaine**
- **Impact positif du couplage O-A sur la stratification lors d'un événement de fort vent**
- **Impact neutre du couplage O-A sur le cycle diurne océanique**

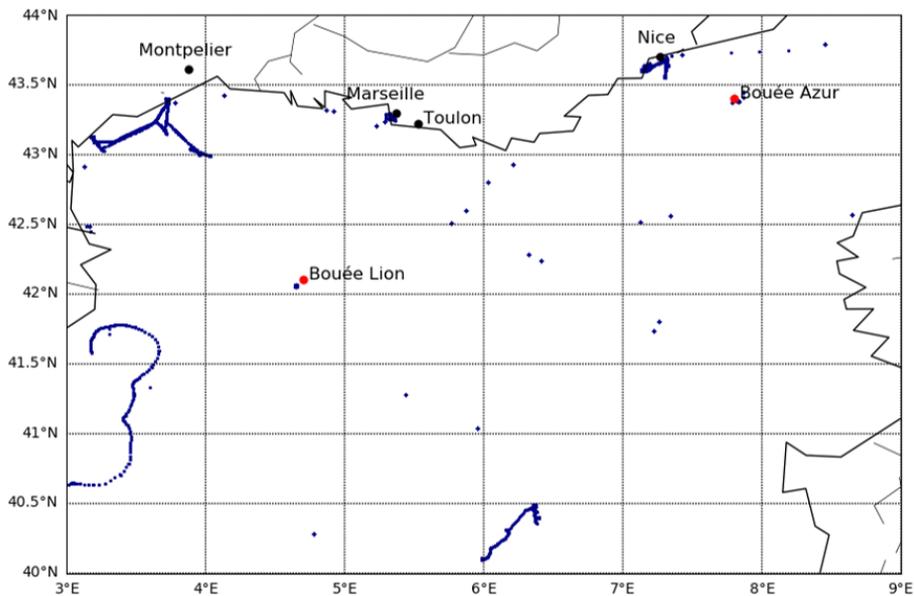
## Perspectives :

- **Utiliser le système AROME-NEMO pour des prévisions d'ensemble couplées (thèse de Maëva Marquillie au CNRM, intitulée « Propagation des incertitudes dans le système couplé océan-atmosphère à échelle kilométrique » )**
- **Progresser vers des systèmes multi-couplés à échelle kilométrique pour la prévision numérique à Météo-France**
- **Mettre en place d'un système océanique couplé avec une atmosphère simplifiée (ABL1D) à MOi**

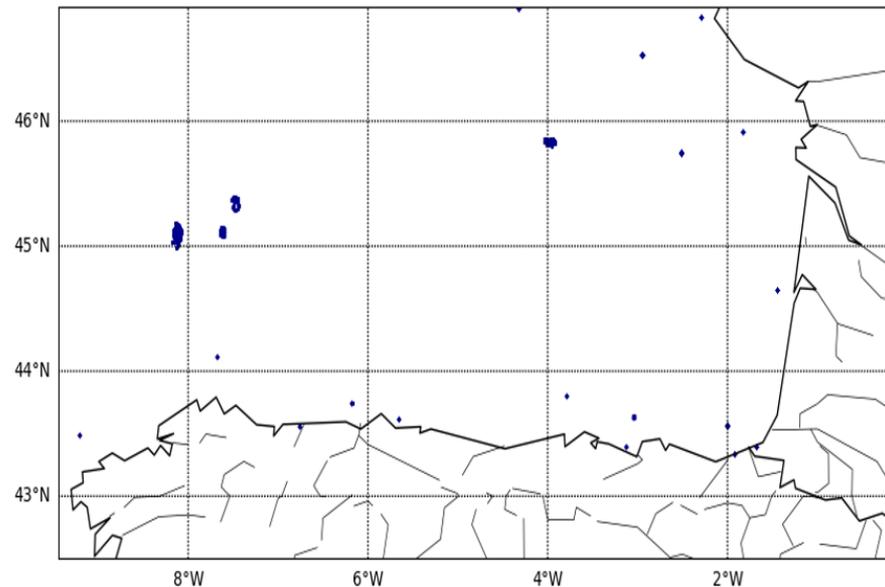
**Merci pour  
votre  
attention**

---

## Zone Méditerranée (23-29/09/2020)



## Zone Gascogne (14-15/08/2021)





**MERCATOR  
OCEAN**  
INTERNATIONAL



# Impacts des processus couplés sur la stratification océanique

Encadrants :

Jonathan BEUVIER (MOi)

Cindy LEBEAUPIN BROSSIER (CNRM)

Quentin MISI

Master SOAC

Université Paul Sabatier (Toulouse)

Augmenter la précision de la prévision des phénomènes météo-océaniques locaux et à enjeux.

→ Amélioration :

- **l'Océanographie Opérationnelle**
- **la Prévision Numérique du Temps**

Augmenter la précision de la prévision des phénomènes météo-océaniques locaux et à enjeux.

→ Amélioration :

- **l'Océanographie Opérationnelle**
- **la Prévision Numérique du Temps**

→ prise en compte des interactions couplées Océan-Atmosphère (O-A) à fine échelle, permet une meilleure :

- **Représentation des interactions à l'interface air-mer**
- **Description des structures de fine échelle**
- **Évolution des échanges entre l'océan superficiel et l'atmosphère**

La stratification de l'océan superficiel :

- = Stabilité de l'océan / potentiel d'échanges verticaux importants
- Impacte localement température / salinité / densité / CMO

## La stratification de l'océan superficiel :

- = Stabilité de l'océan / potentiel d'échanges verticaux importants
- Impacte localement température / salinité / densité / CMO

## La modélisation couplée O-A permet de représenter explicitement :

- l'influence de l'atmosphère sur l'évolution de la couche océanique superficielle
- l'influence de la stratification sur les échanges air-mer

La stratification de l'océan superficiel :

- = Stabilité de l'océan / potentiel d'échanges verticaux importants
- Impacte localement température / salinité / densité / CMO

La modélisation couplée O-A permet de représenter explicitement :

- l'influence de l'atmosphère sur l'évolution de la couche océanique superficielle
- l'influence de la stratification sur les échanges air-mer

Nouveau système couplé à l'échelle kilométrique :

FRA36 (NEMO) / AROME-France (AROME)

## Description des deux modèles et du couplage

Carte du recouvrement des domaines AROME France (topographie en vert-marron (m)) et FRA36 (bathymétrie en bleu (m))

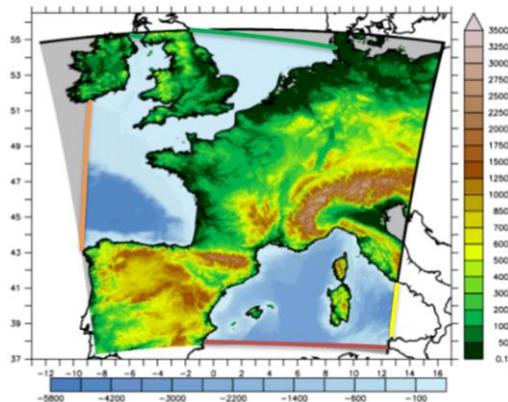
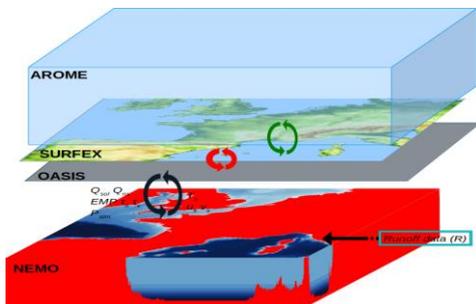


Schéma explicatif couplage AROME/NEMO



## Tableau récapitulatif du fonctionnement AROME/NEMO et du couplage OASIS

Modèle océanique <b>NEMO FRA36</b> (Madec et al., 2022)	Coupleur <b>OASIS</b> (Pianeze et al., 2022)	Modèle Atmosphérique <b>AROME France</b> (Brousseau et al., 2016), (Seity et al., 2011)
v. 4.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>SST</li> <li>Composantes zonale/méridienne de courant de surface</li> </ul>	cy43t2
$\Delta t = 150s$	<p>→</p> <p><b>Fréquence d'échange :</b> 600s</p> <p><b>Méthode d'interpolation :</b> bilineaire</p> <p>←</p>	$\Delta t = 50s$
$\Delta x = 1/36^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux solaire net</li> <li>Flux « non-solaire » net (flux IR net + flux de chaleur latente + sensible)</li> <li>Flux d'eau (Evaporation + Précipitations)</li> <li>Composantes zonale/méridienne de la tension de vent en surface</li> <li>Pression de surface</li> </ul>	$\Delta x = 1.3 \text{ km}$
50 niveaux z		90 niveau $\eta$
C.I. = eNEATL36 (Mercator en R&D)		C.I. = Analyses AROME-France (MF)
C.L. = Global 1/12° (Mercator en R&D)		C.L. = Prévission IFS (CEPMNT)

## Protocole :

- Simulation Forcée pour l'océan
- Simulation Couplée O-A



C.I. et C.L identiques

## Protocole :

- Simulation Forcée pour l'océan
- Simulation Couplée O-A



C.I. et C.L identiques

**Simulation Forcée**

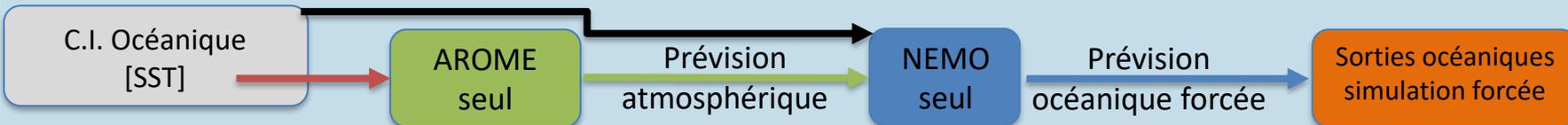
**Simulation couplée**

## Protocole :

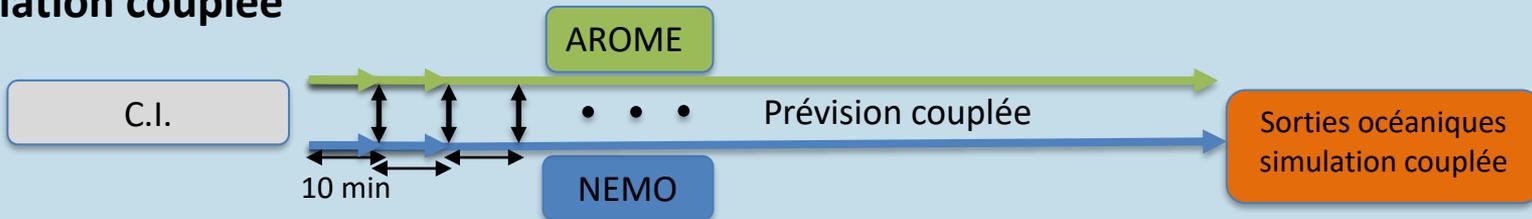
- Simulation Forcée pour l'océan
- Simulation Couplée O-A

C.I. et C.L identiques

## Simulation Forcée

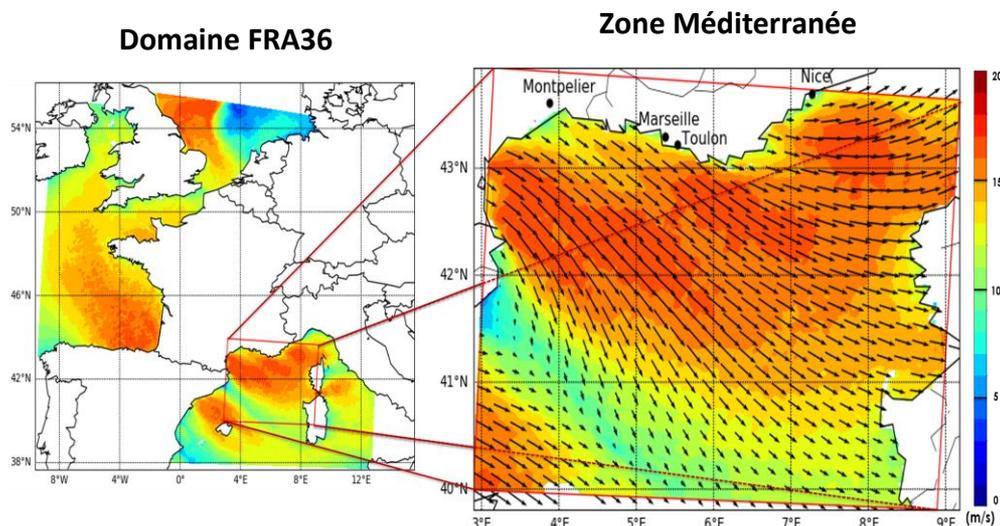


## Simulation couplée



## Description du cas et de la zone sélectionnée

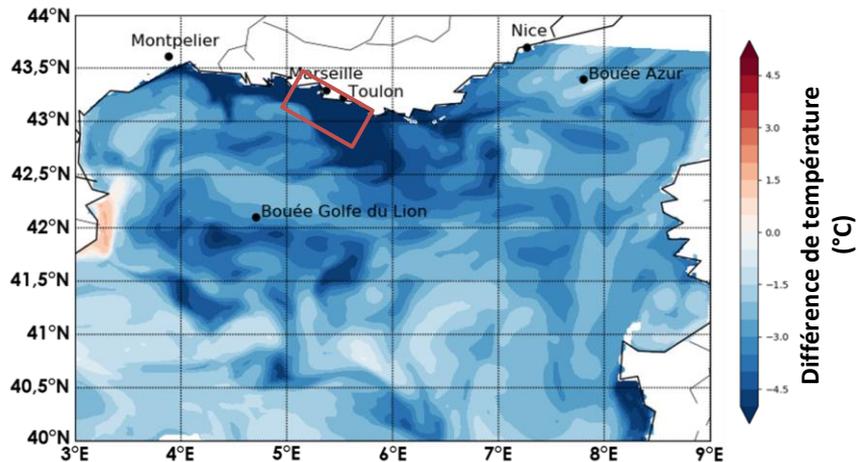
- Etude de l'impact du couplage O-A sur la stratification lors d'un événement de fort vent.
- Simulations du 23/09/2020 au 30/09/2020
- Vent fort d'Ouest / Nord du 24 au 27/09 impactant une grande partie de la zone
- Zone d'étude privilégiée : appelée zone Méditerranée



**Norme du vent en surface ( en couleur en m/s) moyennée sur la journée du 25/09/2020**

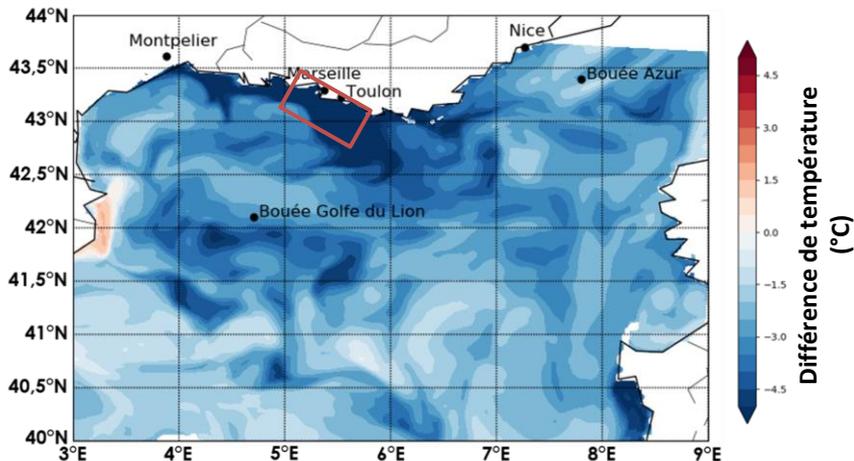
## Etude globale de la zone

Différence de température en  
surface entre le 29 et 23/09/2020



## Etude globale de la zone

Différence de température en surface entre le 29 et 23/09/2020



Indice de stratification (IS) :

Définition mathématique :

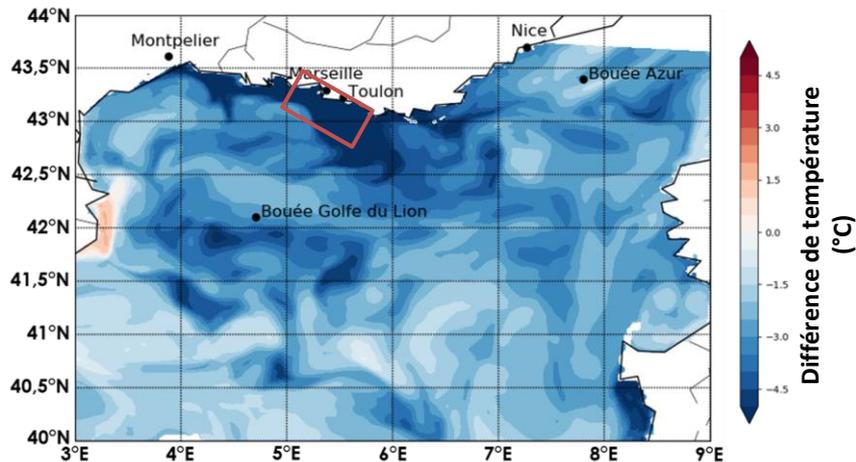
$$IS(z) = \int_0^z \frac{-g}{\rho(h)} \frac{\partial \rho}{\partial h} \cdot h \cdot dh$$

Ici on étudie l'océan superficiel, soit  $z = H = -100$  m

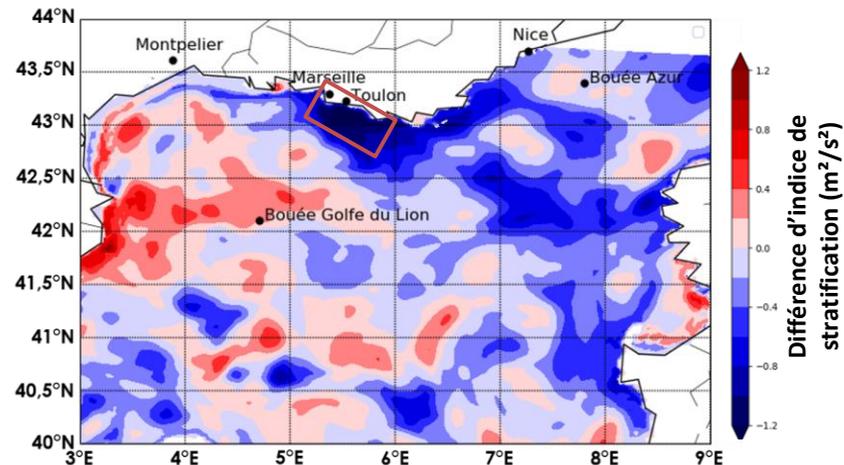
$$IS = \int_{-H}^0 g \frac{h}{\rho(h)} \partial \rho$$

## Etude globale de la zone

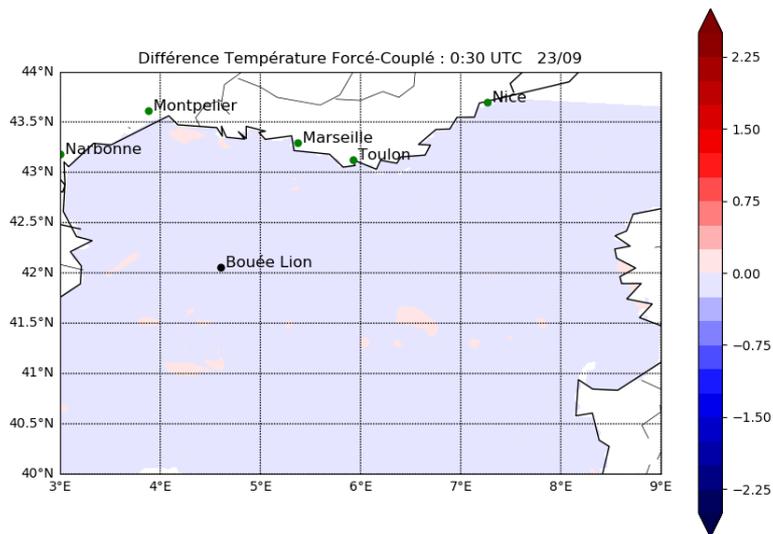
Différence de température en surface entre le 29 et 23/09/2020



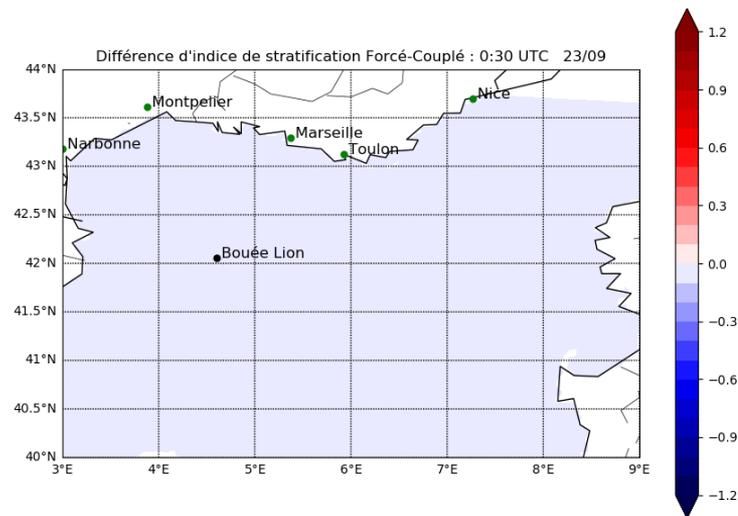
Différence d'indice de stratification à 100m entre le 29 et 23/09/2020



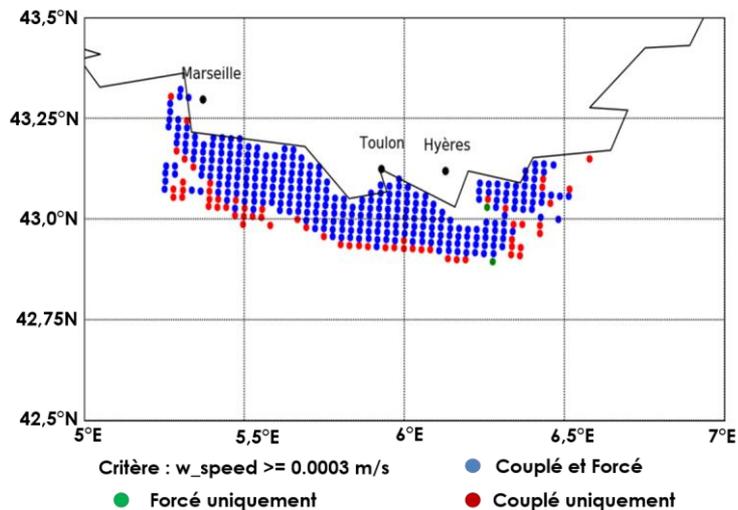
Evolution de la différence de température de surface ( $^{\circ}\text{C}$ ) entre les modèles forcé et couplé



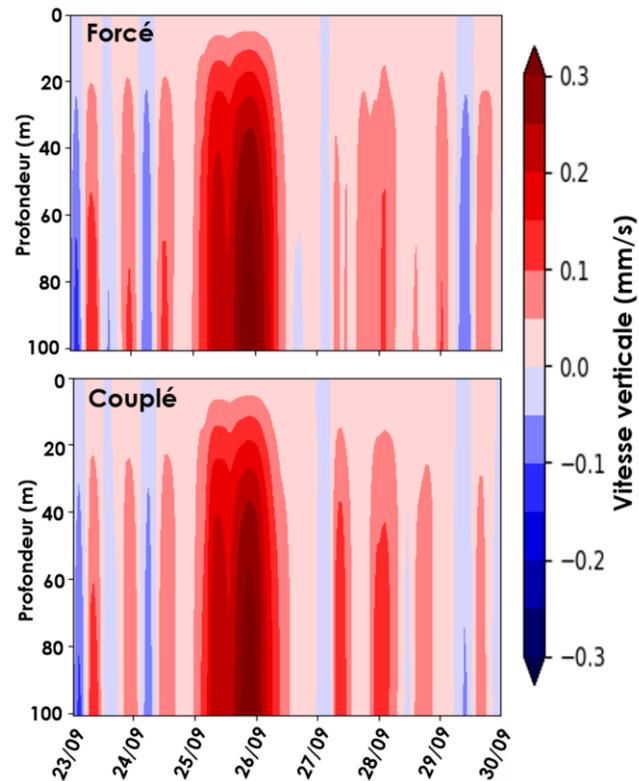
Evolution de la différence l'indice de stratification [0-100m] ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) entre les modèles forcé et couplé



Carte de la zone d'upwelling



Diagrammes de Hovmöller de la vitesse verticale dans la zone d'upwelling (23-30/09/2020)



## Comparaisons bouées et scores

Diagrammes de Hovmöller de la température

Bouée Lion

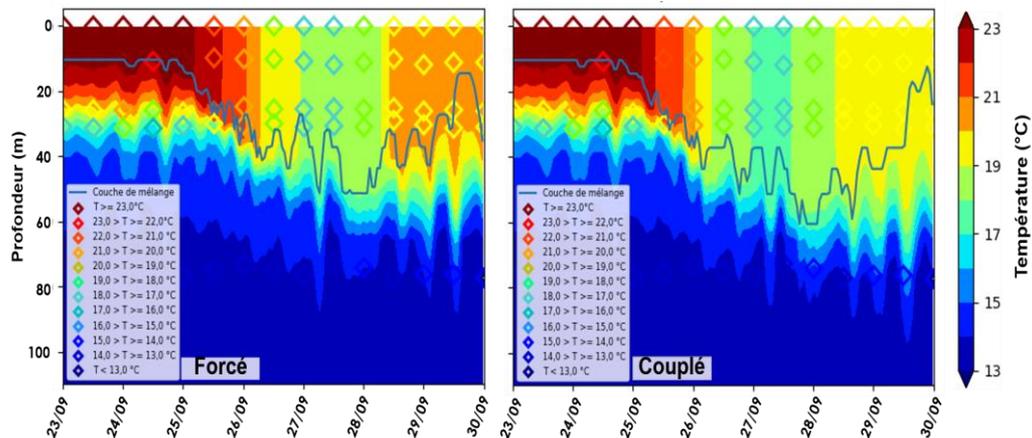
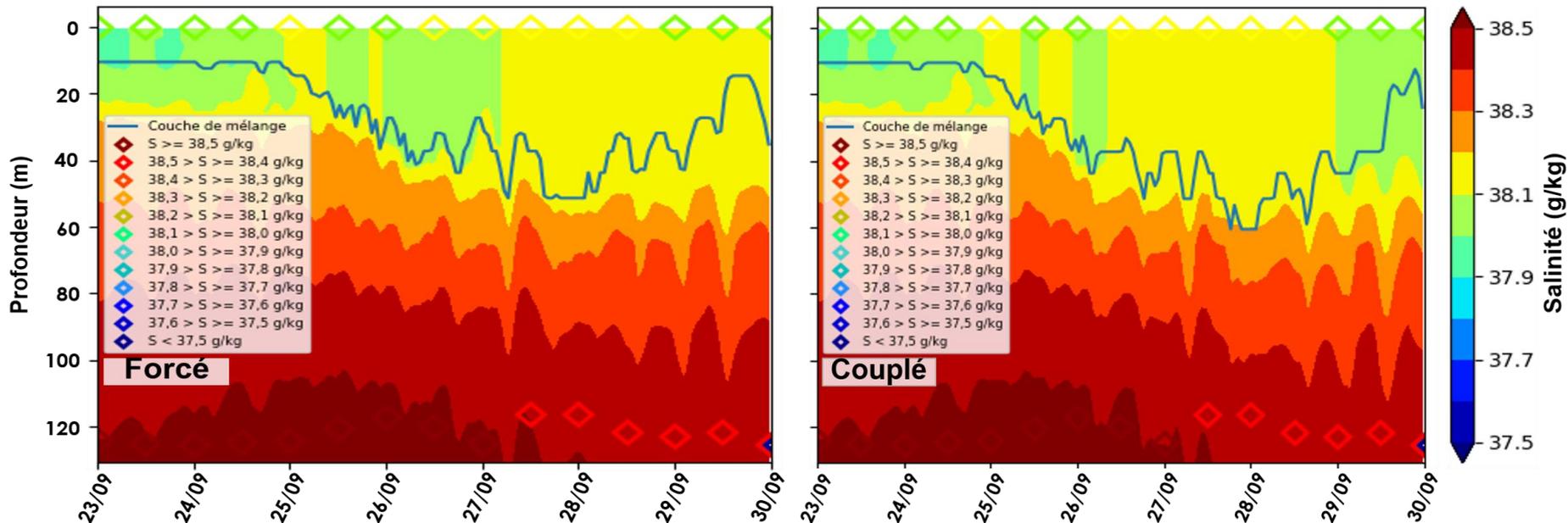


Tableau des scores en Température sur la zone Méditerranée (23-29/09/2020)

Biais simu. – obs.	Forcée	Couplée	Amélioration Couplée / Forcée
Toutes profondeurs	1.414	1.2424	12%
Surface	0.6954	0.2981	53%
0-10m	0.8743	0.4968	43%
10-20m	1.5977	1.0676	40%
20-40m	3.7569	3.6786	2%
40-60m	1.9572	2.0849	-6%
60-80m	0.3875	0.3958	-2%
80-150m	0.2843	0.2692	5%

## Diagrammes de Hovmöller de la salinité

### Bouée Lion



### Description du cas et de la zone sélectionnée

- Etude de l'impact du couplage O-A sur le cycle diurne océanique
- Simulations du 14/08/2021 au 15/08/2021
- Temps calme et présence de nuages bas
- Zone d'étude privilégiée : appelée zone Gascogne

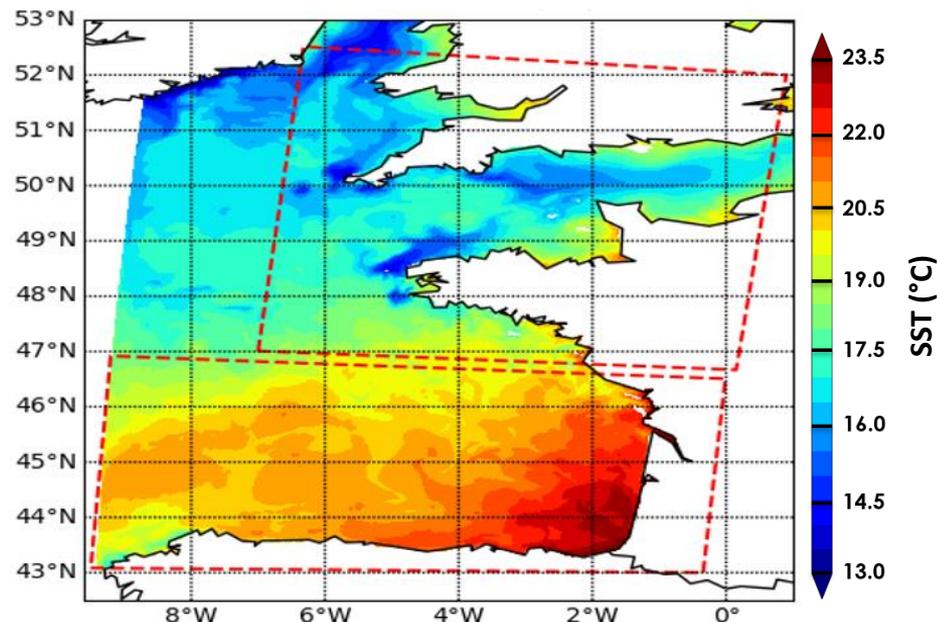
Situation du 14 août 2021 : Image satellite ("Corrected Reflectance") depuis Aqua/MODIS. Source : NASA ([worldview.earthdata.nasa.gov](http://worldview.earthdata.nasa.gov)).



### Description du cas et de la zone sélectionnée

- Etude de l'impact du couplage O-A sur le cycle diurne océanique
- Simulations du 14/08/2021 au 15/08/2021
- Temps calme et présence de nuages bas
- Zone d'étude privilégiée : appelée zone Gascogne

SST (°C) moyennée sur le 14/08/2021 sur la partie Manche-Gascogne du domaine FRA36



### Cycle diurne de SST (critère DTS24)

$$DTS24 = SST_{\max}(\text{jour}) - SST_{\min}(\text{jour})$$

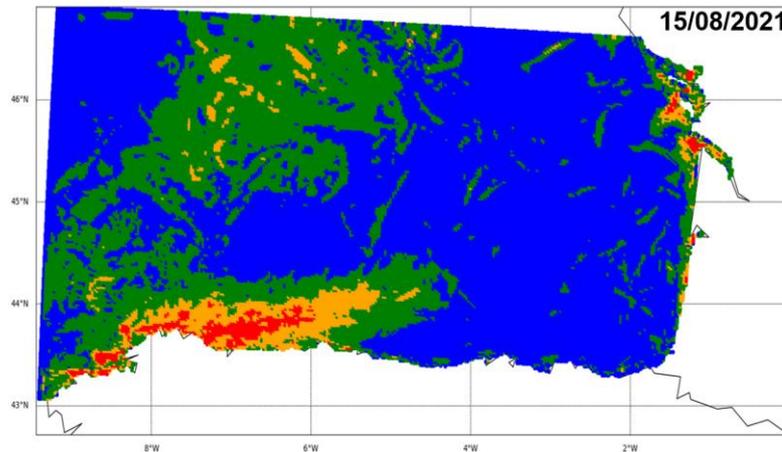
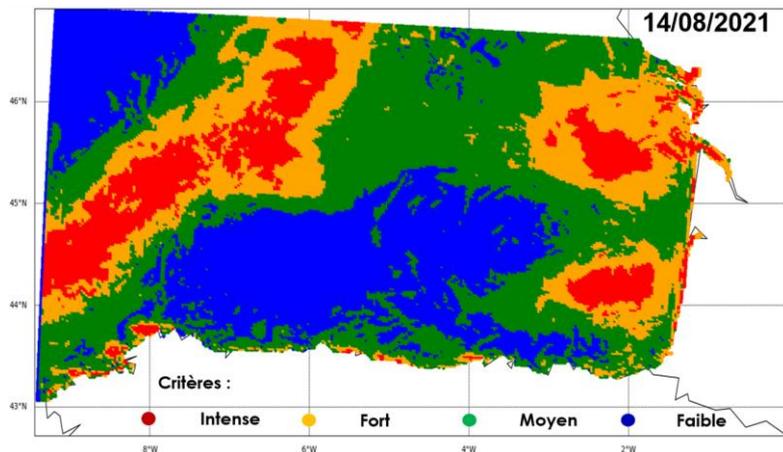
- **Faible** :  $DTS24 \leq 0.5^{\circ}\text{C}$
- **Moyen** :  $0.5 < DTS24 \leq 1.0^{\circ}\text{C}$
- **Fort** :  $1.0 < DTS24 \leq 1.5^{\circ}\text{C}$
- **Intense** :  $DTS24 > 1.5^{\circ}\text{C}$

## Cycle diurne de SST (critère DTS24)

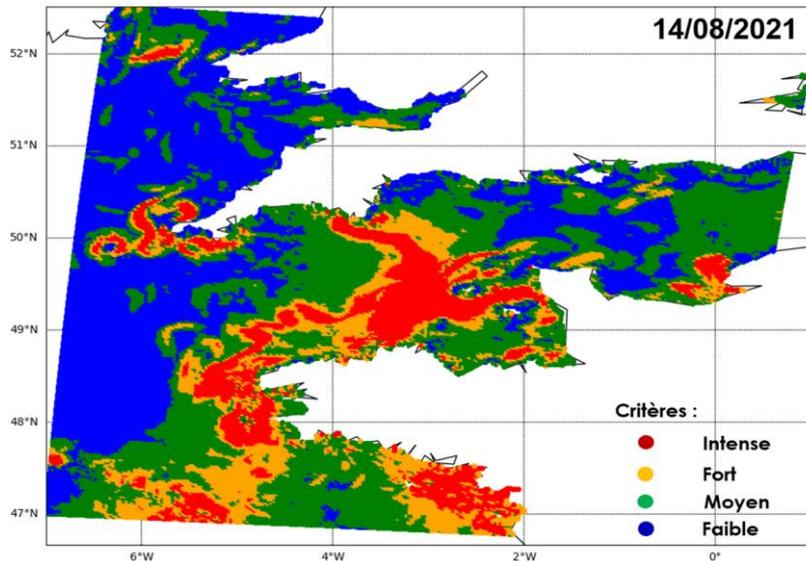
$$DTS24 = SST_{\max} (\text{jour}) - SST_{\min} (\text{jour})$$

- Faible :  $DTS24 \leq 0.5^{\circ}\text{C}$
- Fort :  $1.0 < DTS24 \leq 1.5^{\circ}\text{C}$
- Moyen :  $0.5 < DTS24 \leq 1.0^{\circ}\text{C}$
- Intense :  $DTS24 > 1.5^{\circ}\text{C}$

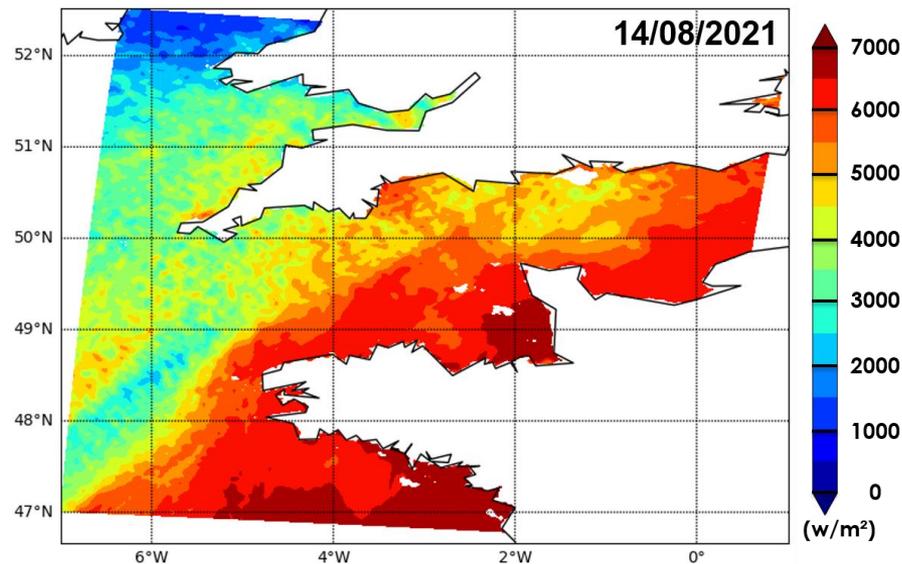
### Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne



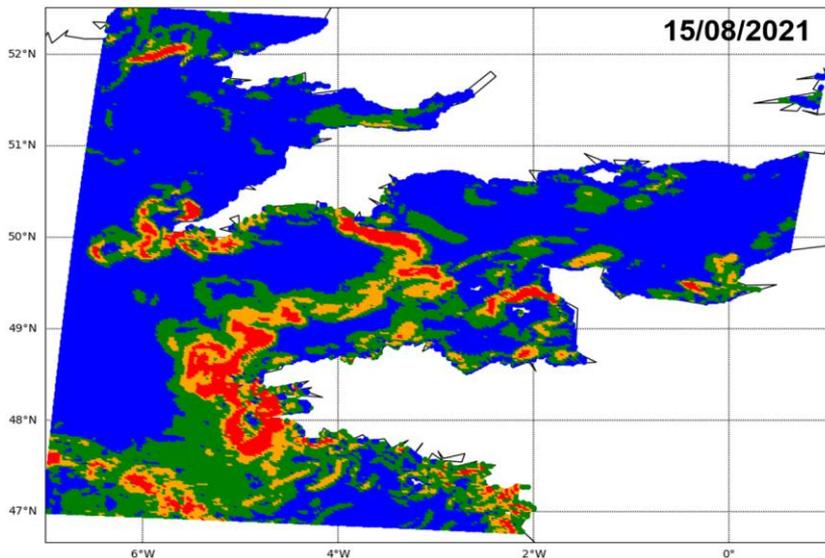
## Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Manche



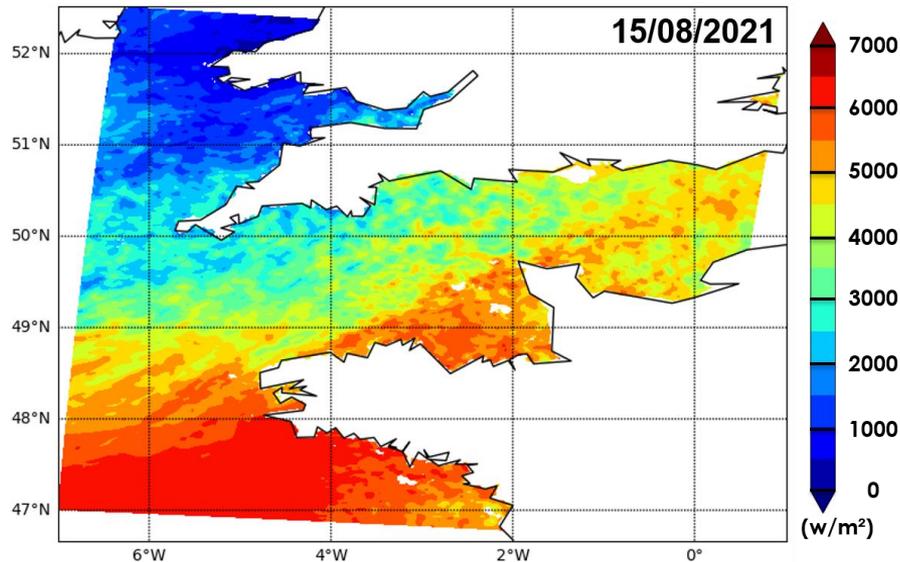
## Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Manche



## Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Manche

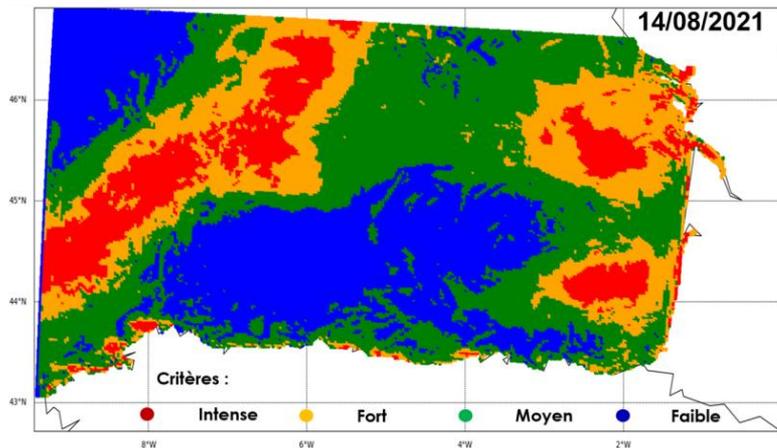


## Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Manche

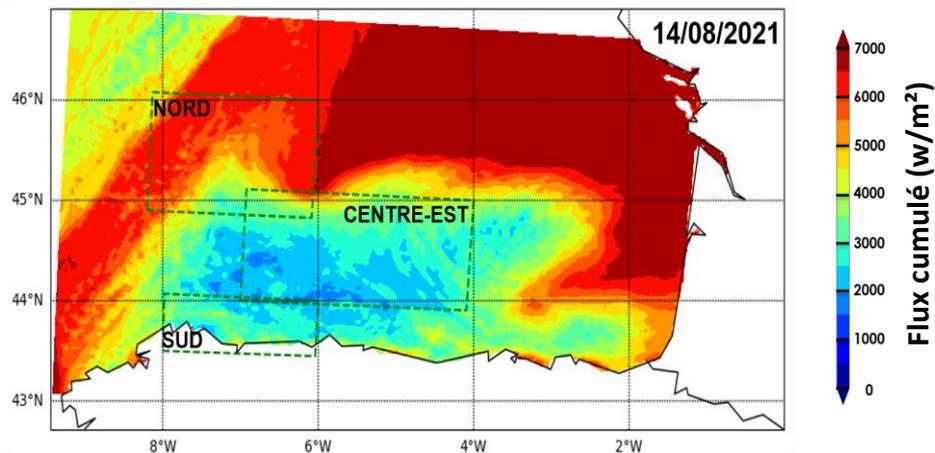


Comparaison aux flux solaires

Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

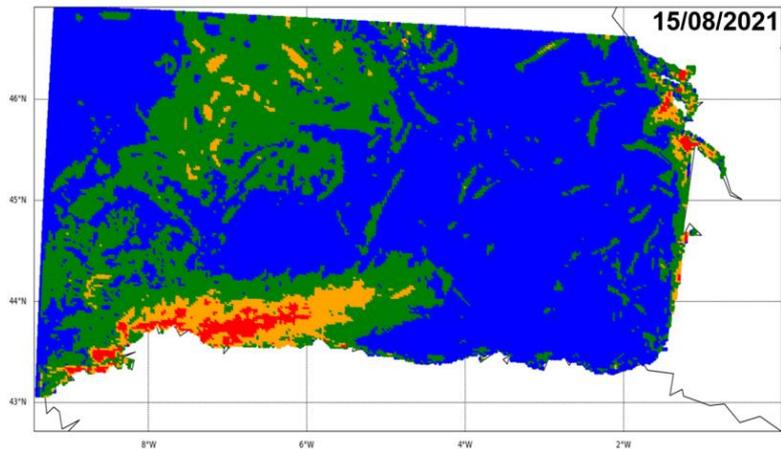


Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Gascogne

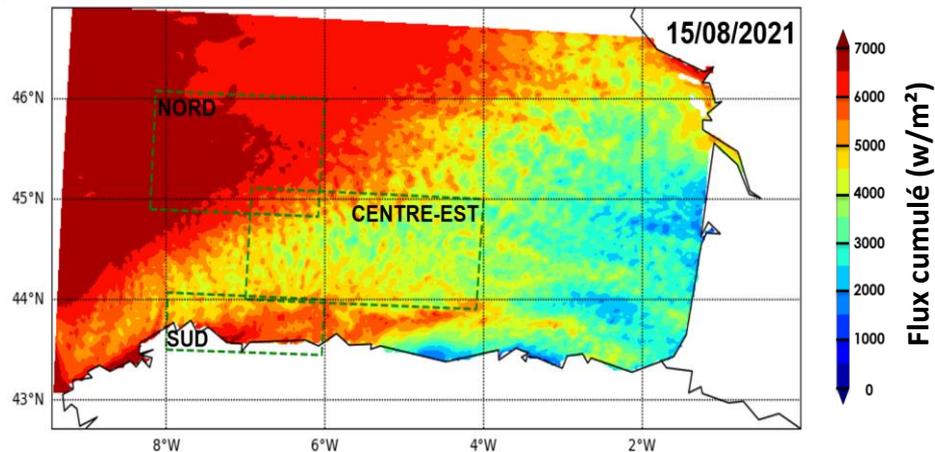


## Comparaison aux flux solaires

### Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

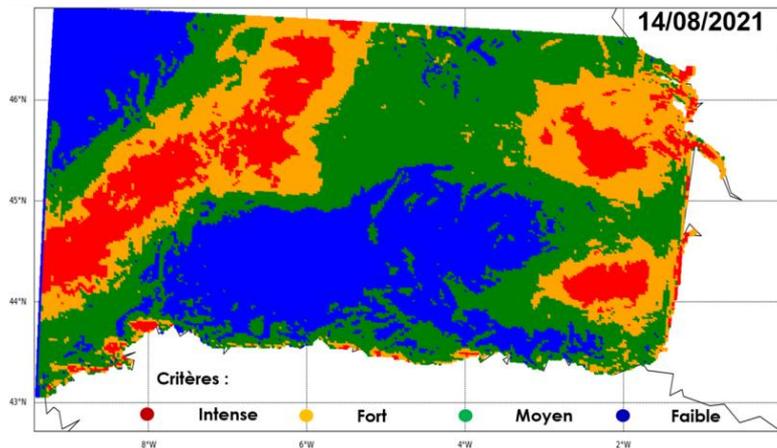


### Flux solaire cumulé en une journée sur la zone Gascogne

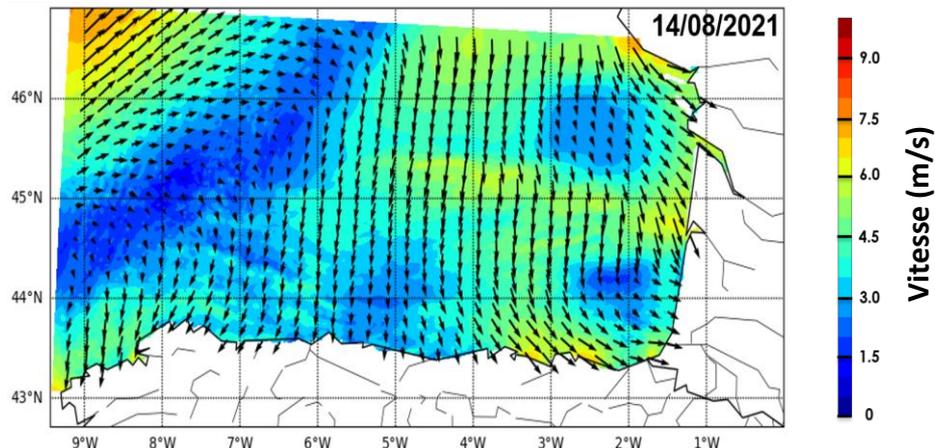


Comparaison au vent

Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

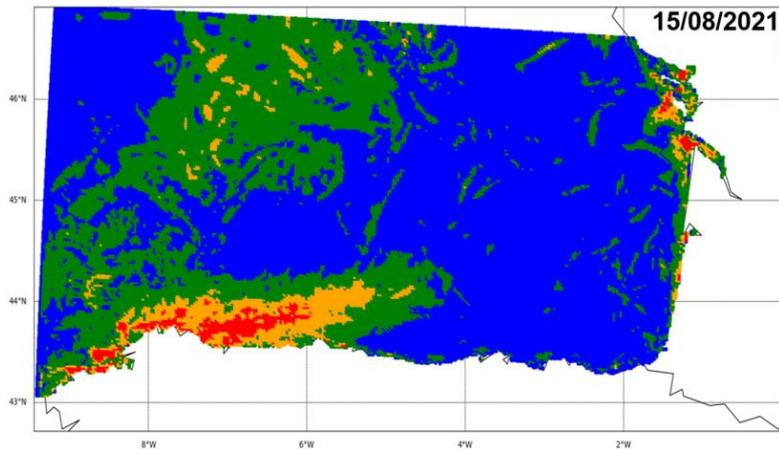


Norme du vent moyenné sur une journée sur la zone Gascogne

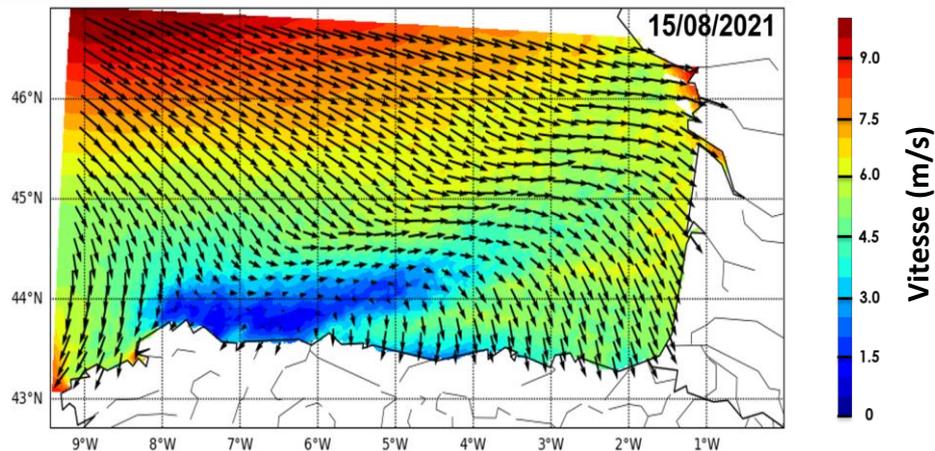


## Comparaison au vent

### Détermination des zones avec un fort DTS24 sur la zone Gascogne

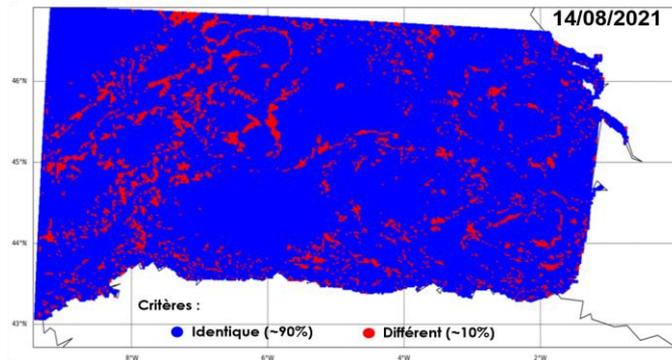


### Norme du vent moyenné sur une journée sur la zone Gascogne



## Comparaisons entre simulations et scores

Comparaison  
du critère  
DTS24 entre  
simulations  
forcée/couplée



Différence de IS  
moyenne  
journalière  
entre  
simulations  
forcée/couplée

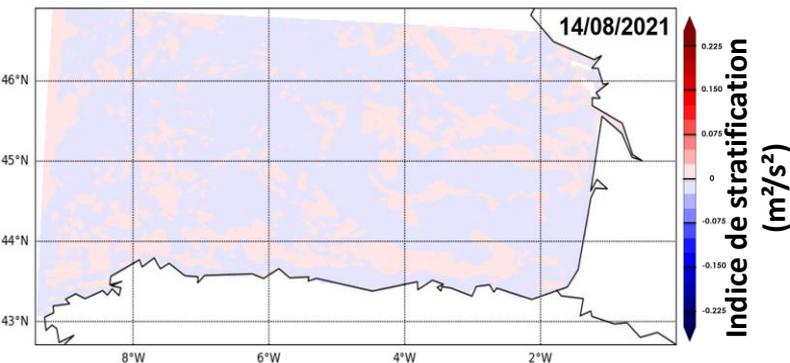


Tableau des scores en Température sur la zone Gascogne (14-15/08/2021)

Biais simu. – obs.	Forcée	Couplée	Amélioration Couplée / Forcée
Toutes profondeurs	0.1283	0.1317	-2.7 %
Surface	0.3579	0.3631	-2.9 %
0-10m	0.2335	0.2385	-2.1 %
10-25m	-0.3712	-0.3623	2.4 %
25-50m	-0.2131	-0.2177	-2.1 %
50-150m	0.1144	0.1145	-0.2 %

## Résumé :

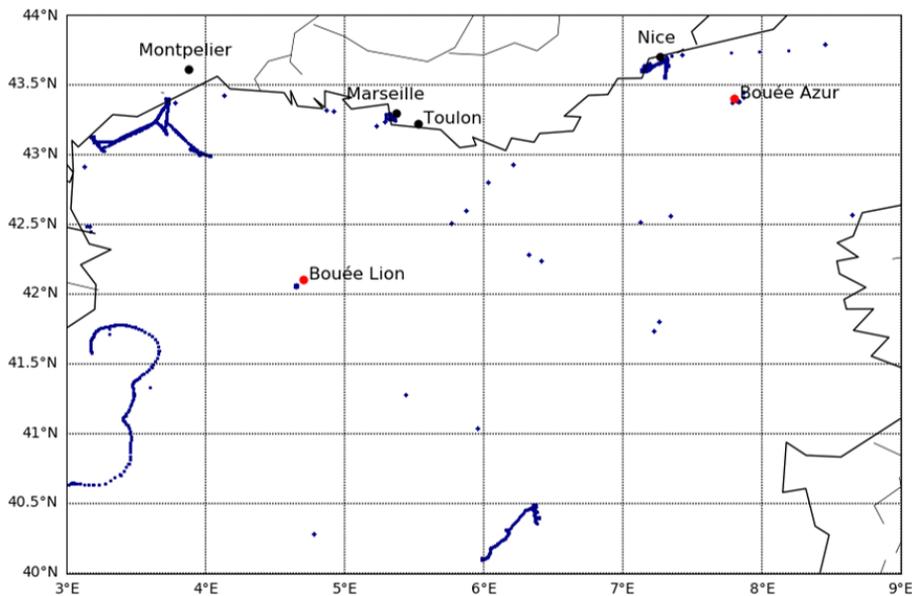
- **Nouveau système couplé à fine échelle**
- **Impact positif du couplage O-A sur la stratification lors d'un événement de fort vent**
- **Impact neutre du couplage O-A sur le cycle diurne océanique**

## Ouvertures :

- **Sur le second cas, faire des prévisions d'ensemble (thèse de Maëva Marquillie au CNRM, intitulée « Propagation des incertitudes dans le système couplé océan-atmosphère à échelle kilométrique » )**
- **Mise en place d'un système couplé en opérationnel à Météo-France.**
- **Mise en place d'un système océanique couplé avec une atmosphère 1D à MOi**

**Merci pour  
votre  
attention**

## Zone Méditerranée (23-29/09/2020)



## Zone Gascogne (14-15/08/2021)

