

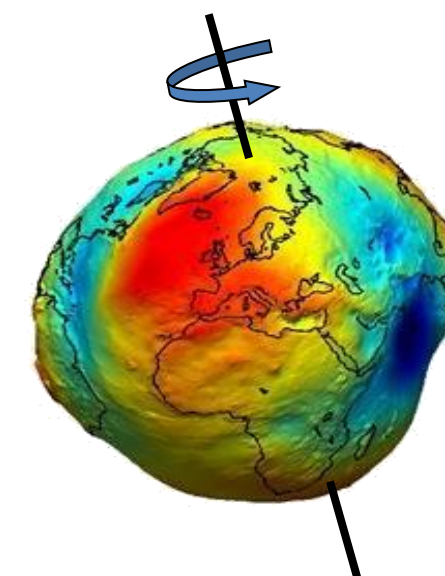
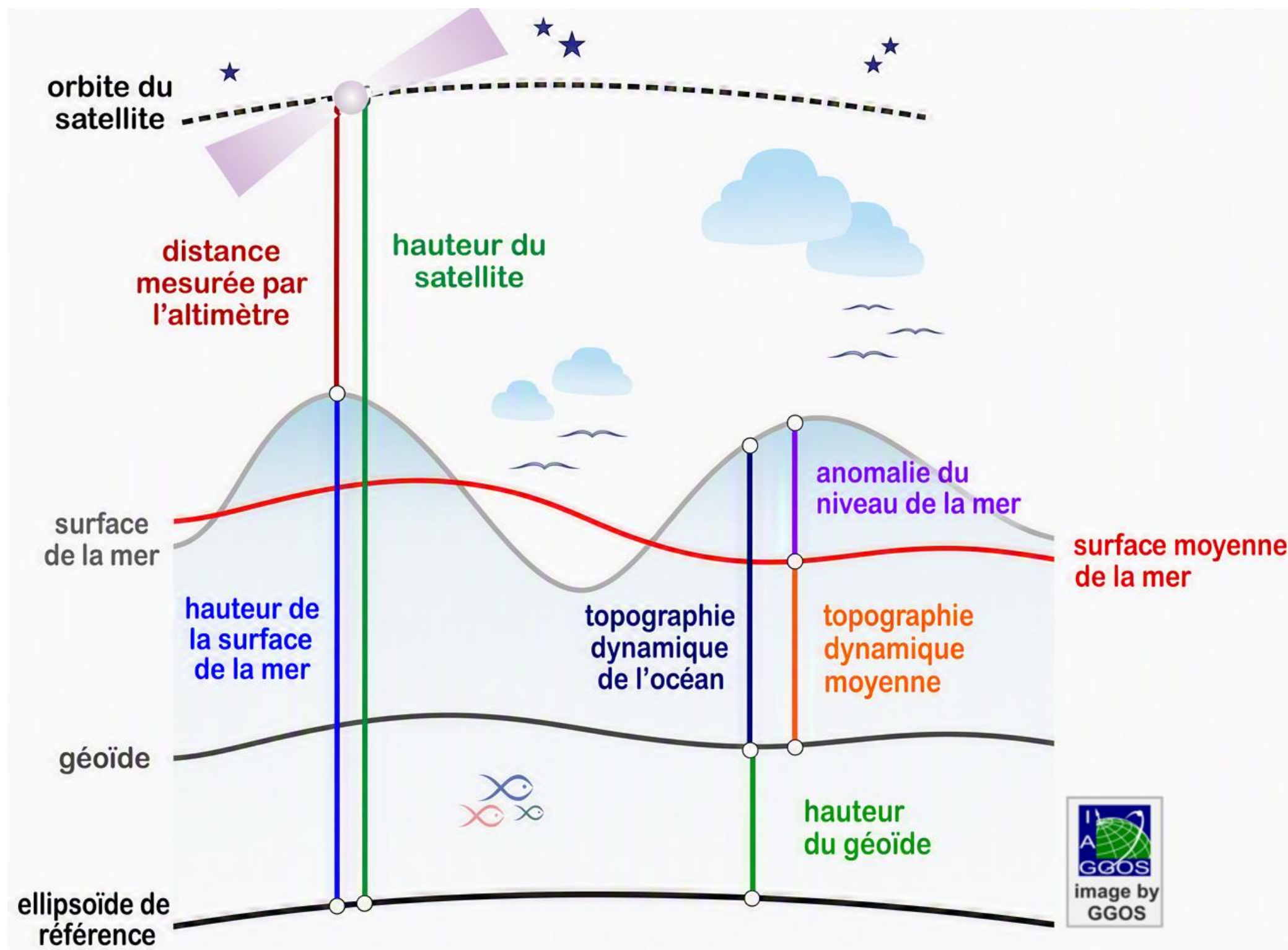
La Topographie dynamique Moyenne de l'océan (Mean Dynamic Topographie, MDT) CNES-CLS2022 : définition, méthode de calcul et perspectives d'amélioration

Solène JOUSSET (CLS), Juliette GAMOT (CLS), Fabrice Greiner (CLS)

Sommaire

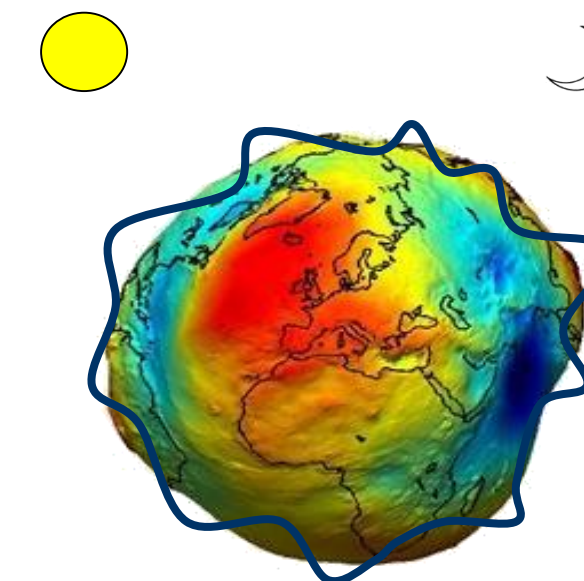
- Définition de la Topographie Dynamique Moyenne (Mean Dynamic topography, MDT)
- Pourquoi est-il difficile d'estimer la MDT ?
- Méthodologie de référence de la MDT CNES-CLS
- La MDT CNES-CLS-2022
- L'erreur associée
- Perspectives

Différentes hauteurs et leurs surfaces de référence



Géoïde

Un océan au repos, soumis uniquement au champ gravitationnel terrestre



Topographie dynamique de l'océan (ADT)

Dynamique océanique → Topographie dynamique absolue (ADT)

$$ADT = SLA + MDT$$

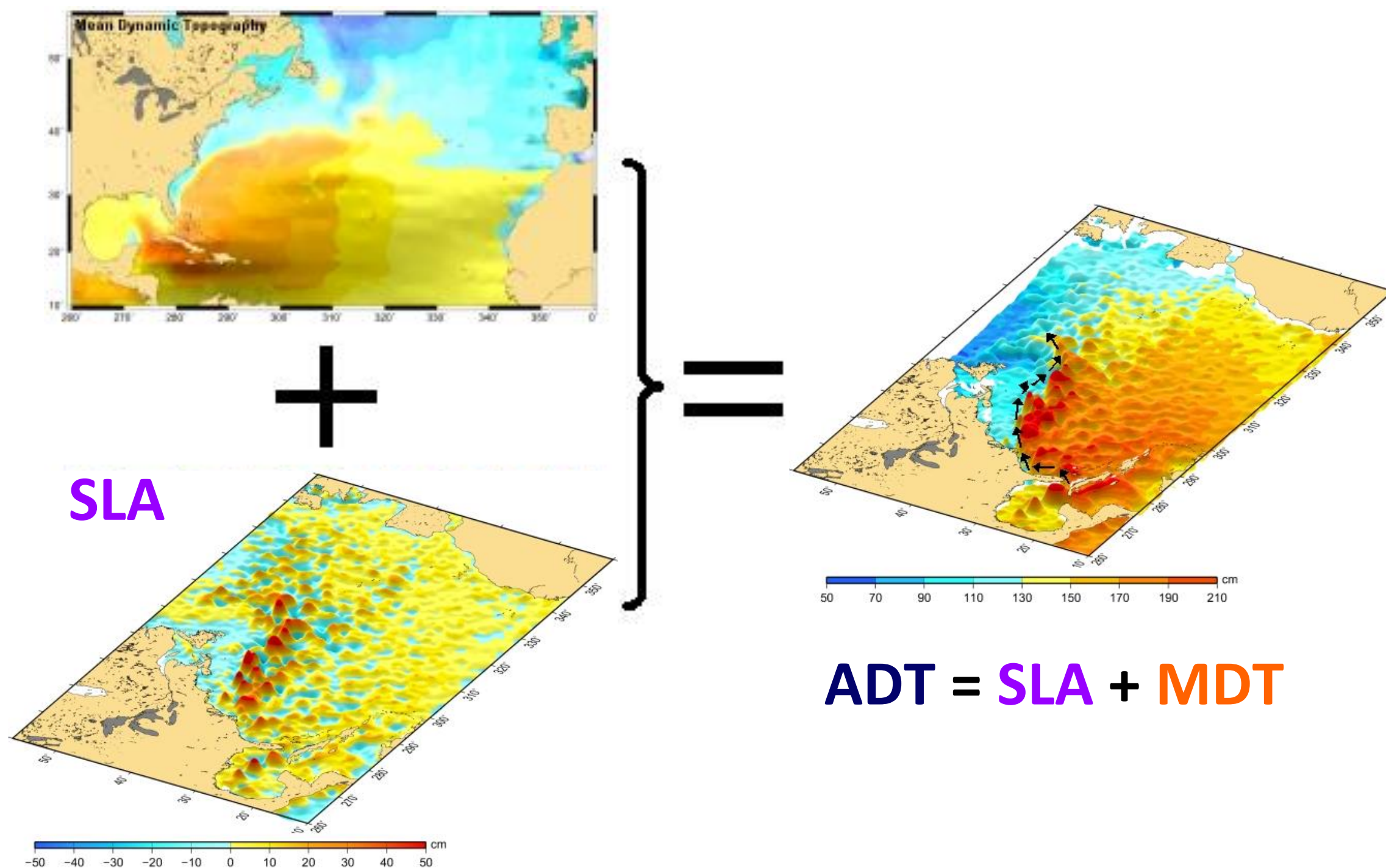
Produit altimétrique

Besoin de l'estimer !

→ Pour calculer l'ADT, il faut estimer la MDT.

Topographie Dynamique Moyenne (MDT) : définition

MDT



Rôle de la MDT:

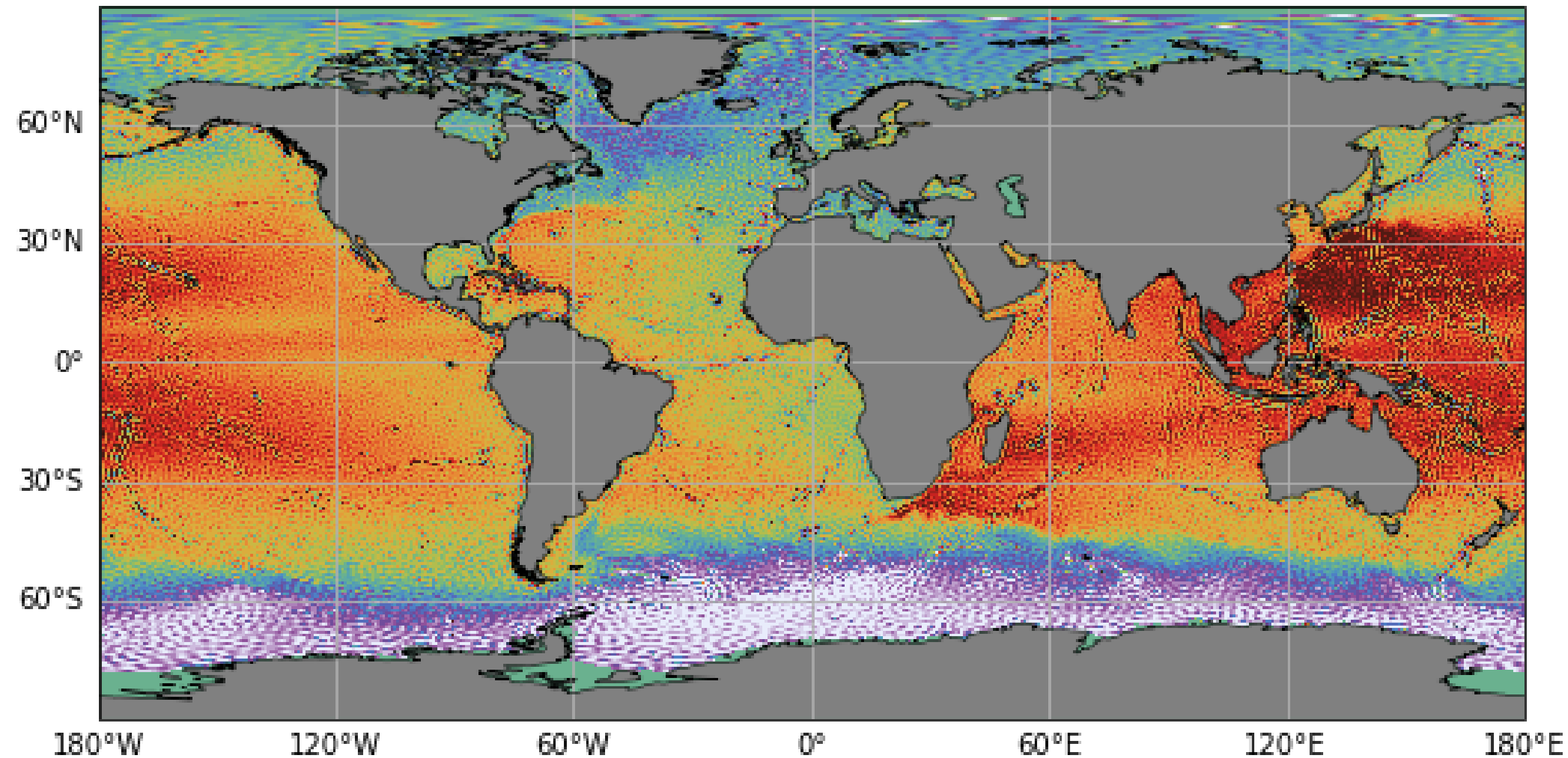
- Fournit le **niveau de référence moyen de la surface océanique**
- Permet de calculer les **courants géostrophiques absolus**
- Indispensable pour :
 - surveiller la circulation océanique
 - interpréter les structures à méso-échelle (tourbillons, jets)
 - assimiler les données altimétriques dans les modèles océaniques

Idée clé :

Sans MDT → uniquement des informations relatives

Avec MDT → interprétation dynamique complète

Topographie Dynamique Moyenne (MDT) : définition



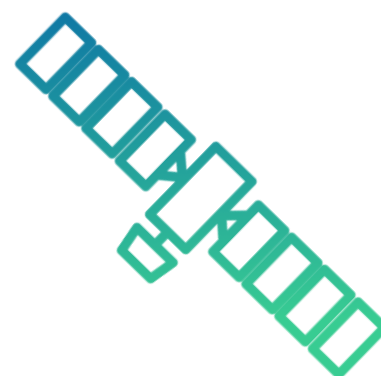
$$\text{MDT} = \text{MSS} - \text{Geoid}$$

- La MDT peut être estimée à partir de la MSS et du géoïde.

$$\text{MDT} = \text{MSS} - \text{Geoid}$$

- Dernier produit de MSS (CNES-CLS) : **MSS CNES-CLS-2025**.
- Les missions gravimétriques par satellite (GOCE, GRACE, etc.) mesurent le géoïde.
- Cependant, les géoïdes dérivés des données satellitaires ne permettent pas de distinguer les échelles spatiales inférieures à environ 125 km.

Pourquoi est-il difficile d'estimer la MDT ?

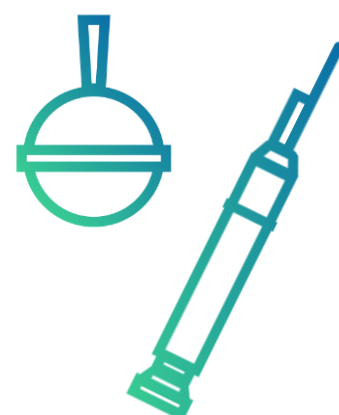


La MDT n'est pas directement observable

Définition : $MDT = MSS - Geoid$

Limites de cette approche directe :

- Précision du géoïde limitée aux échelles > 100 km
- Insuffisante pour la dynamique océanique (mésoscales : 10–100 km)



Nécessité d'une approche multi-données

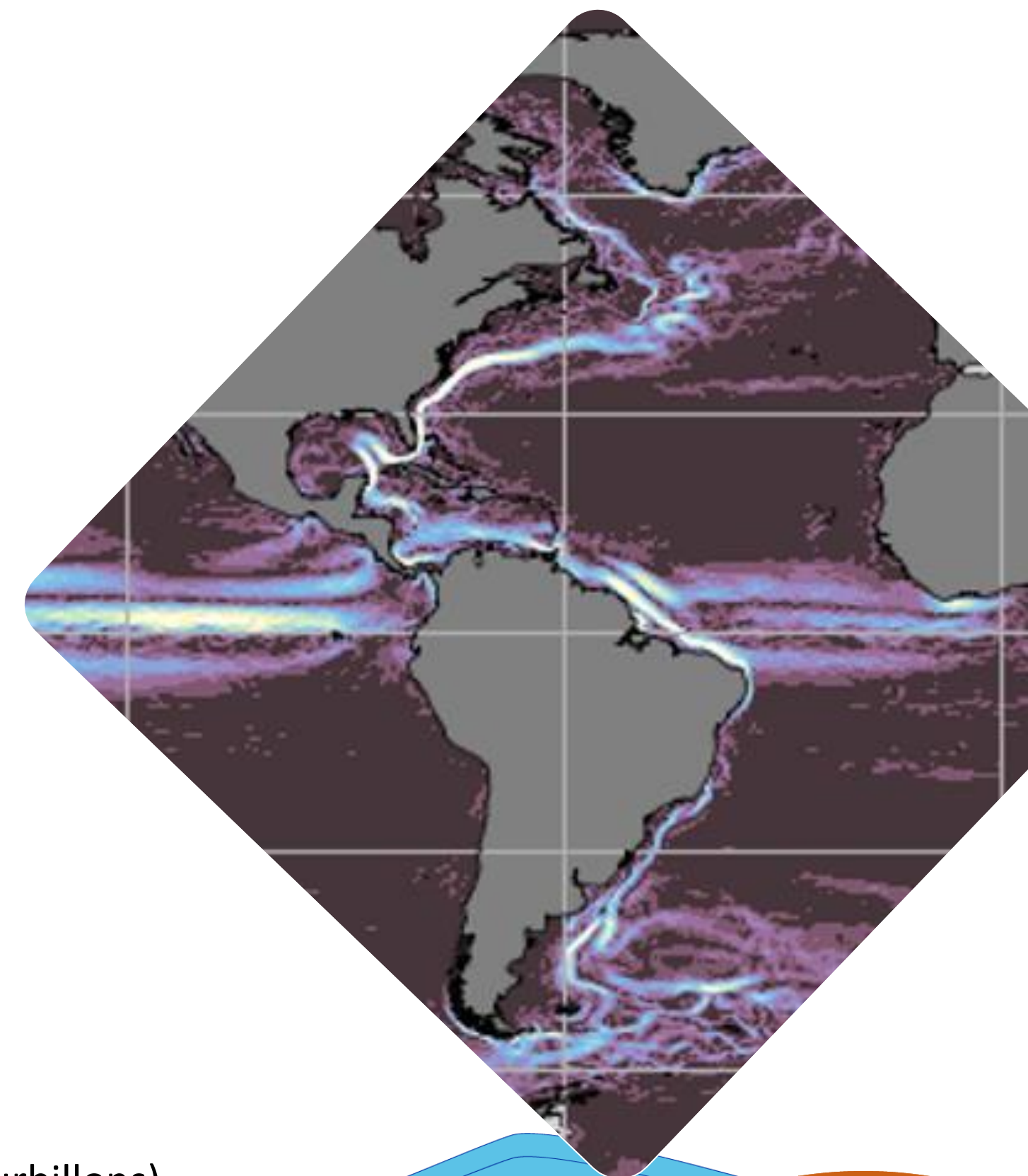
Pour reconstituer la MDT à toutes les échelles :

- Grandes échelles $\rightarrow$ MSS + géoïde
- Petites échelles $\rightarrow$ données in situ



Principaux défis actuels

- Mauvaise résolution des régions côtières
- Nécessité d'une résolution plus élevée
- Nécessité d'estimer proprement une erreur associée
- Biais dû à un échantillonnage inégal (par exemple, suréchantillonnage des tourbillons)



Méthodologie de référence de la MDT CNES-CLS

Méthode directe
MDT = MSS – Géoïde

Ebauche

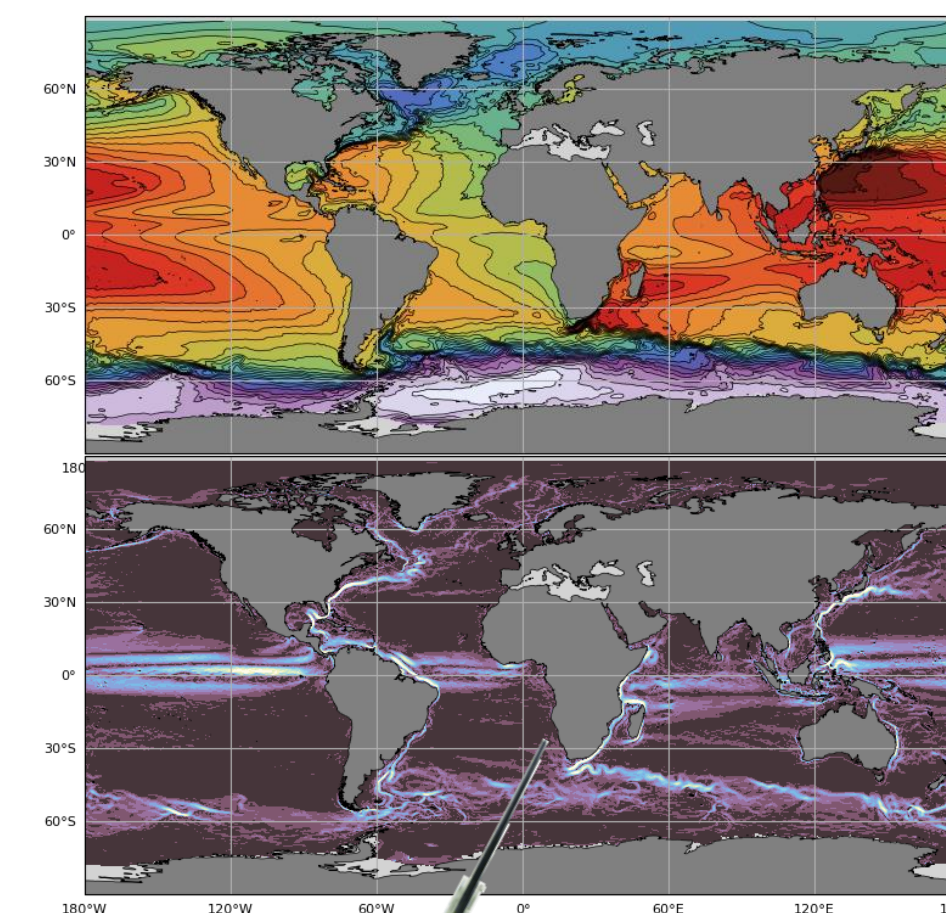
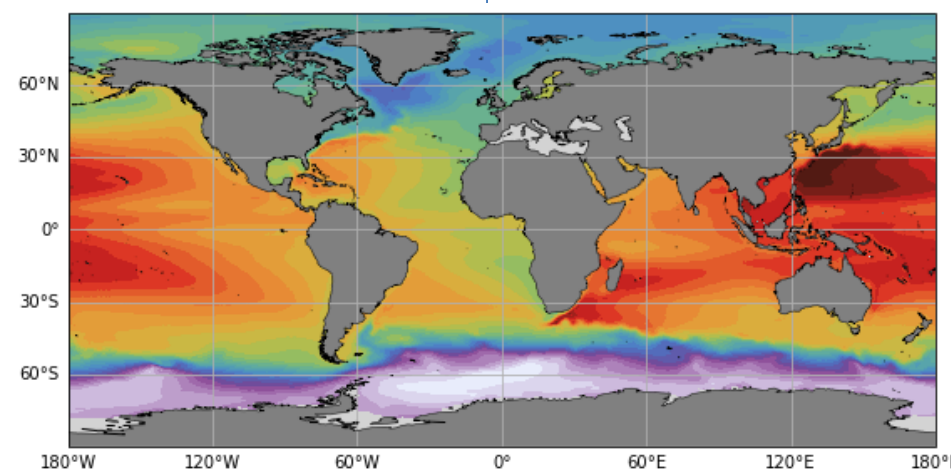
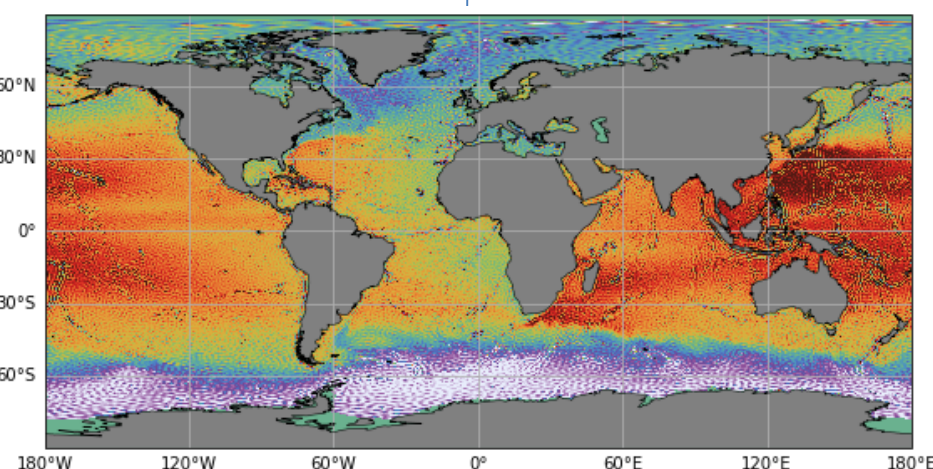
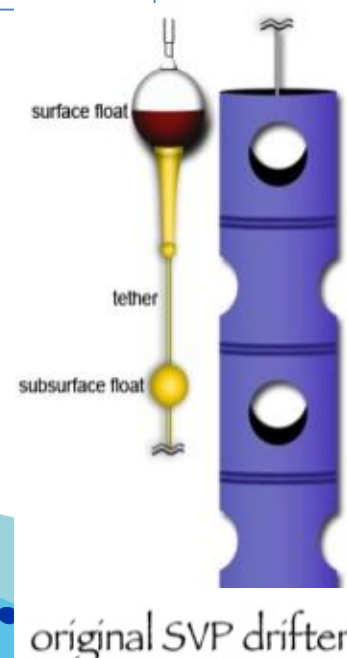
MDT haute résolution et
courants géostrophiques
associés

Filtrage
optimal

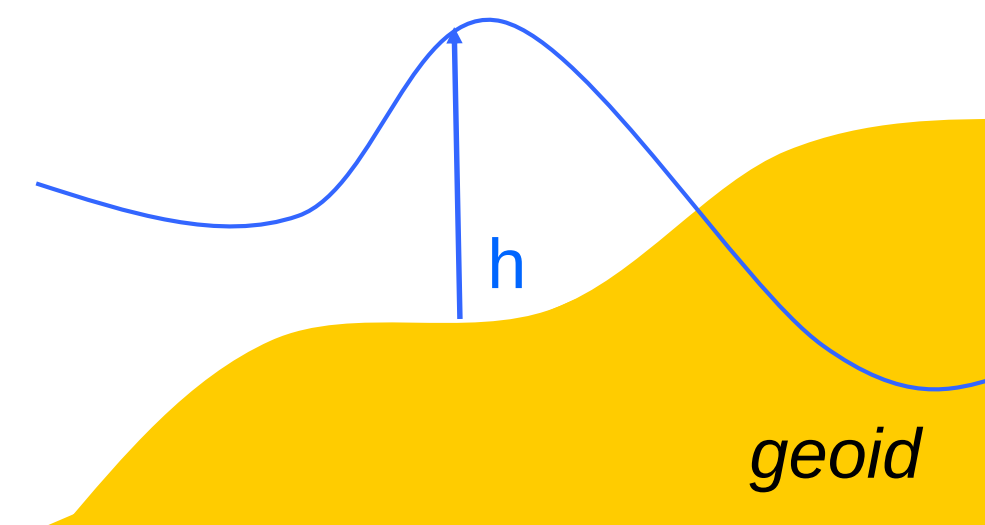
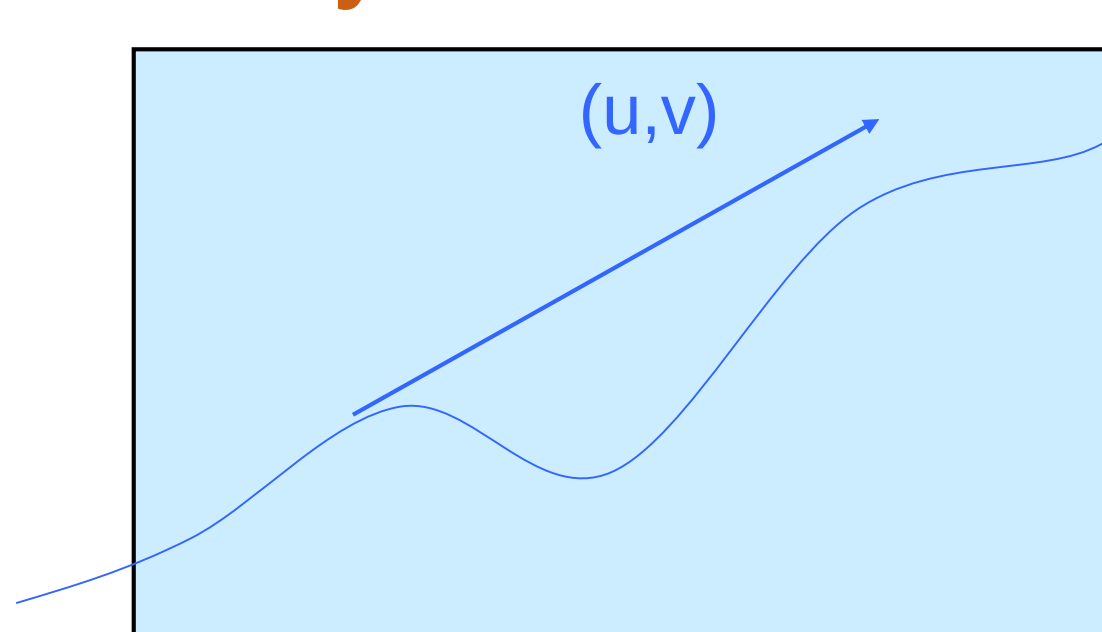
Analyse Objective
Multivariée

Un filtrage optimal est appliqué
aux petites échelles bruitées

Les structures fines de la MDT et des courants
géostrophiques associés sont estimés grâce à la
combinaison des anomalies altimétriques et des
observations in situ (profils température/salinité,
bouées dérivantes et autres mesures de courant).



Calcul des hauteurs moyennes et des courants géostrophiques moyens à partir des données in situ

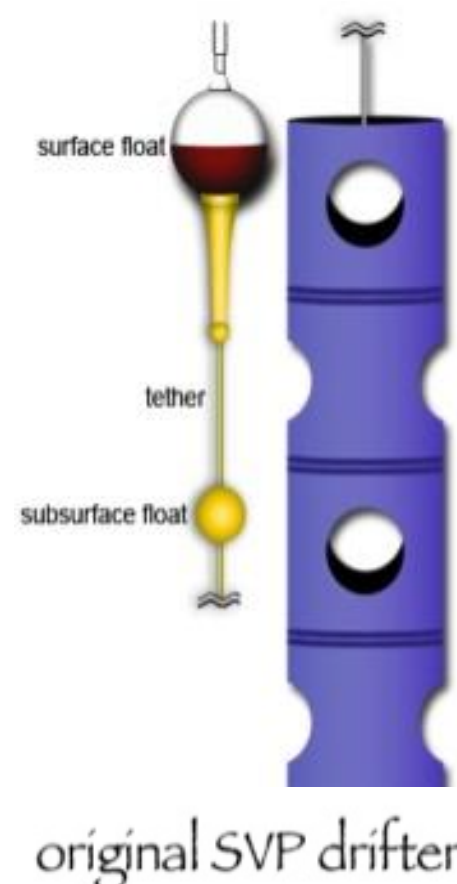


A chaque position r et pour l'instant t pour lesquels une mesure océanographique in-situ est disponible:
hauteur dynamique $h(r,t)$ ou vitesse de surface $u(r,t)$, $v(r,t)$

- Les données in-situ sont traitées afin d'être cohérentes en termes de contenu physique avec l'altimétrie



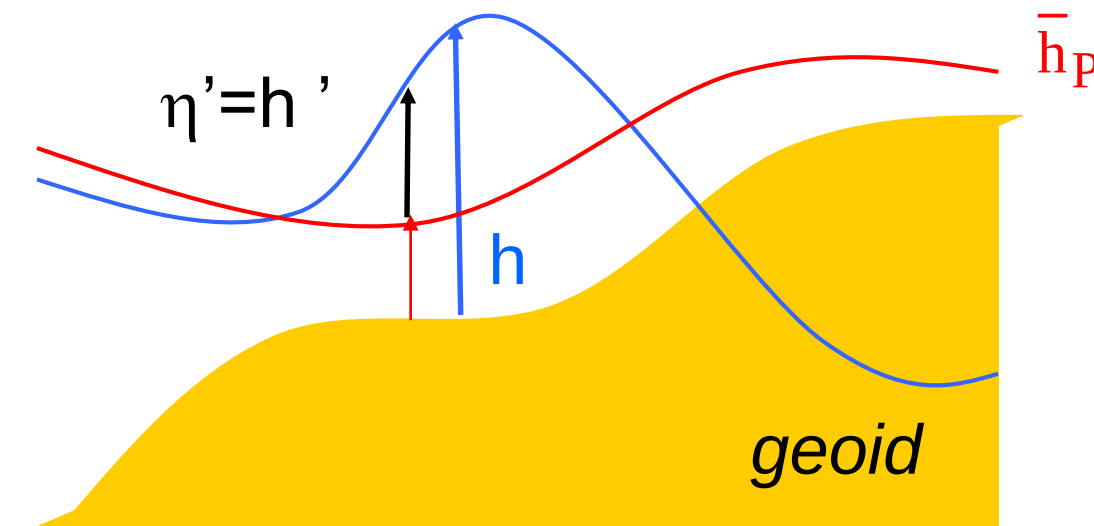
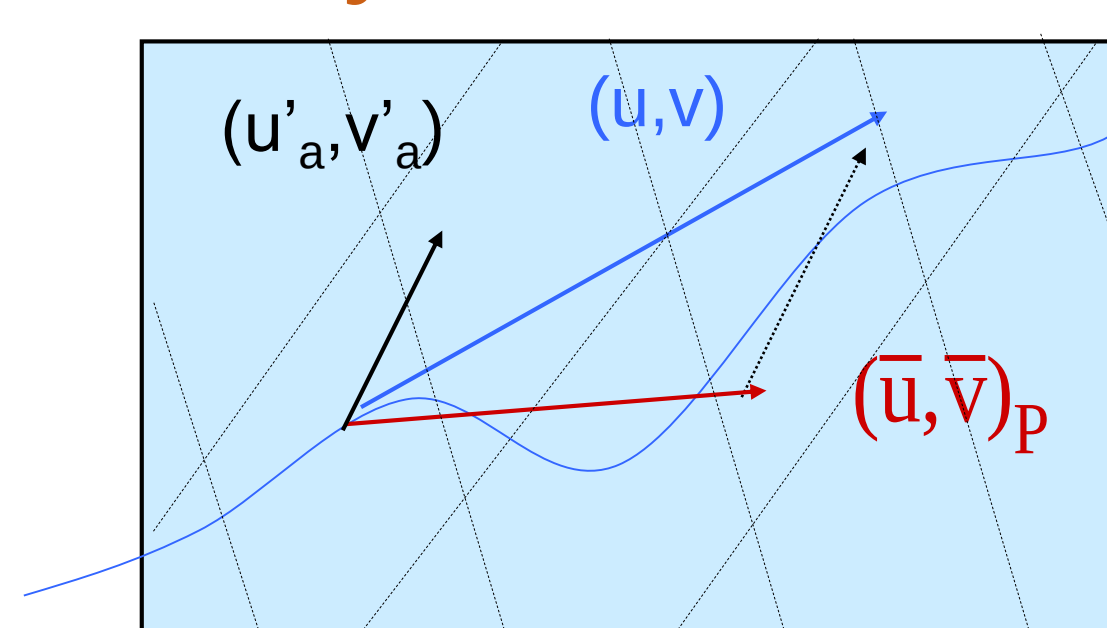
- Hauteurs dynamiques relatives à une profondeur de référence P_{ref} -> **composante barocline**
- Le traitement est nécessaire pour ajouter le signal barotrope manquant ainsi que le signal barocline profond



$$U_{buoy} = U_{geost} + \cancel{U_{ekman}} + \cancel{U_{stokes}} + \cancel{U_{tides}} + \cancel{U_{inertial}} + \cancel{U_{ageost_hf}} (+\cancel{U_{slip}})$$

- Modélisation des courants contrôlés par le vent : Ekman/Stokes
- Correction du wind slippage (pour les bouées non-droguées)
- Filtrage passe bas (on enlève la haute fréquence)

Calcul des hauteurs moyennes et des courants géostrophiques moyens à partir des données in situ



A chaque position r et pour l'instant t pour lesquels une mesure océanographique in-situ est disponible: hauteur dynamique $h(r,t)$ ou vitesse de surface $u(r,t), v(r,t)$

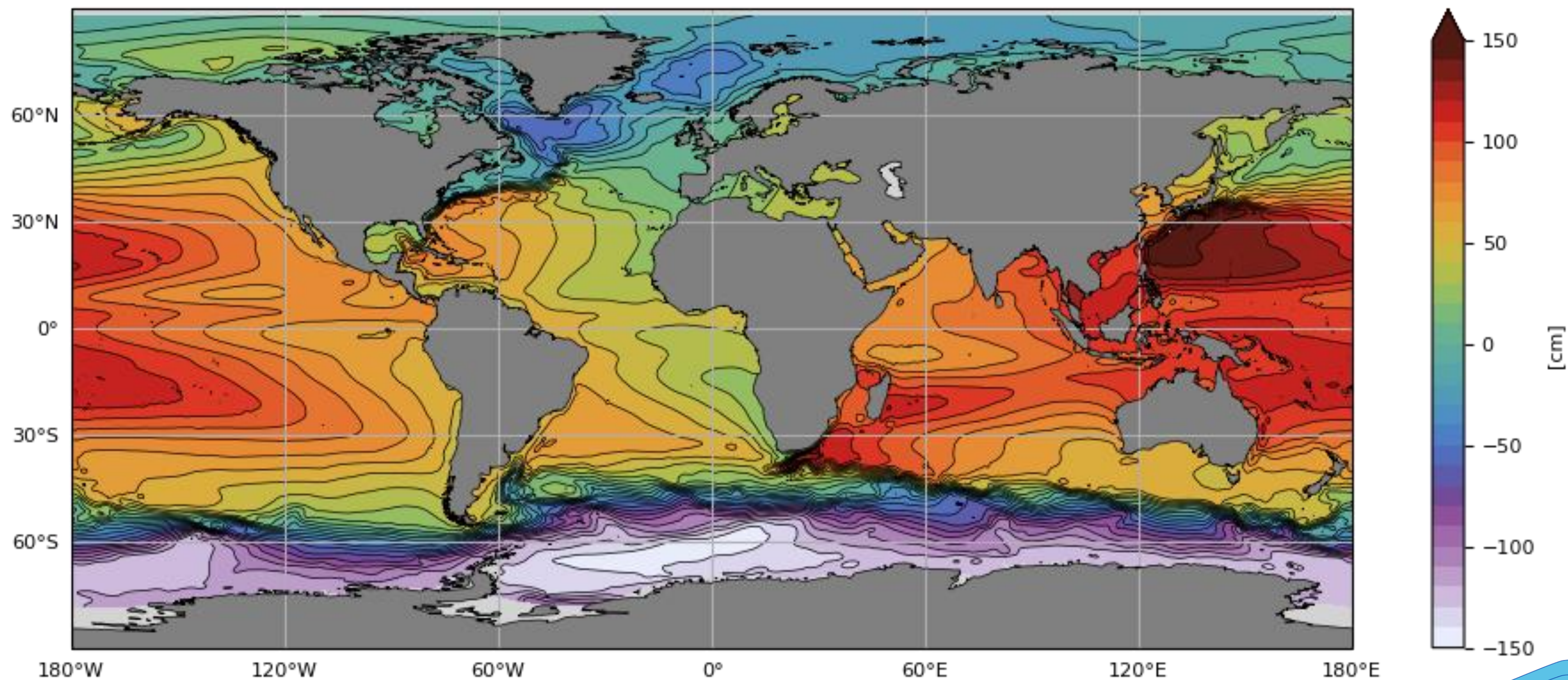
- Les données in-situ sont traitées afin d'être cohérentes en termes de contenu physique avec l'altimétrie
- Les anomalies de hauteur/vitesses altimétriques sont interpolées au position/date des données in-situ
- L'anomalie altimétrique est soustraite aux hauteurs/vitesses in-situ pour estimer les champs moyens (enlever la **variabilité océanique**)

$$\bar{h}_p = h_{\text{insitu}} - h'_p$$

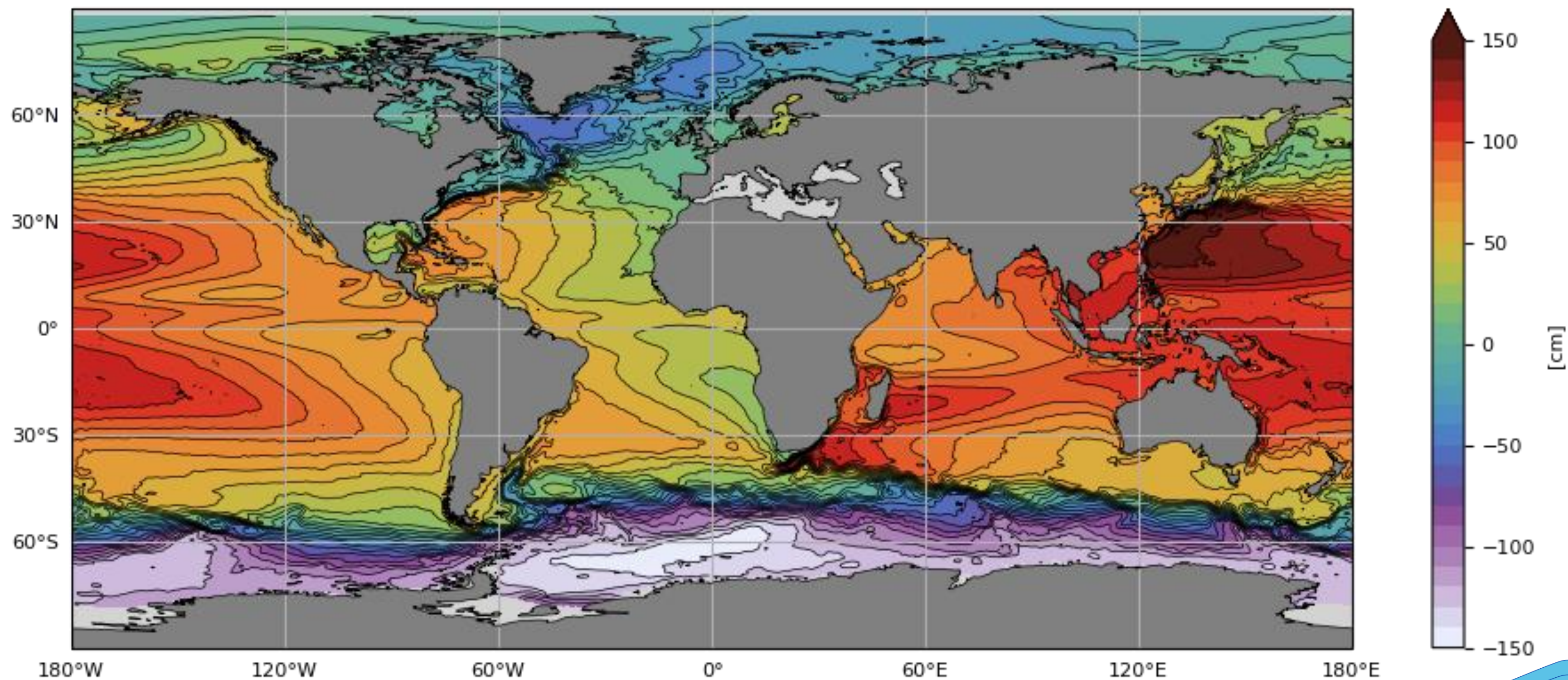
$$\bar{u}_p = u_{\text{insitu}} - u'_p$$

$$\bar{v}_p = v_{\text{insitu}} - v'_p$$

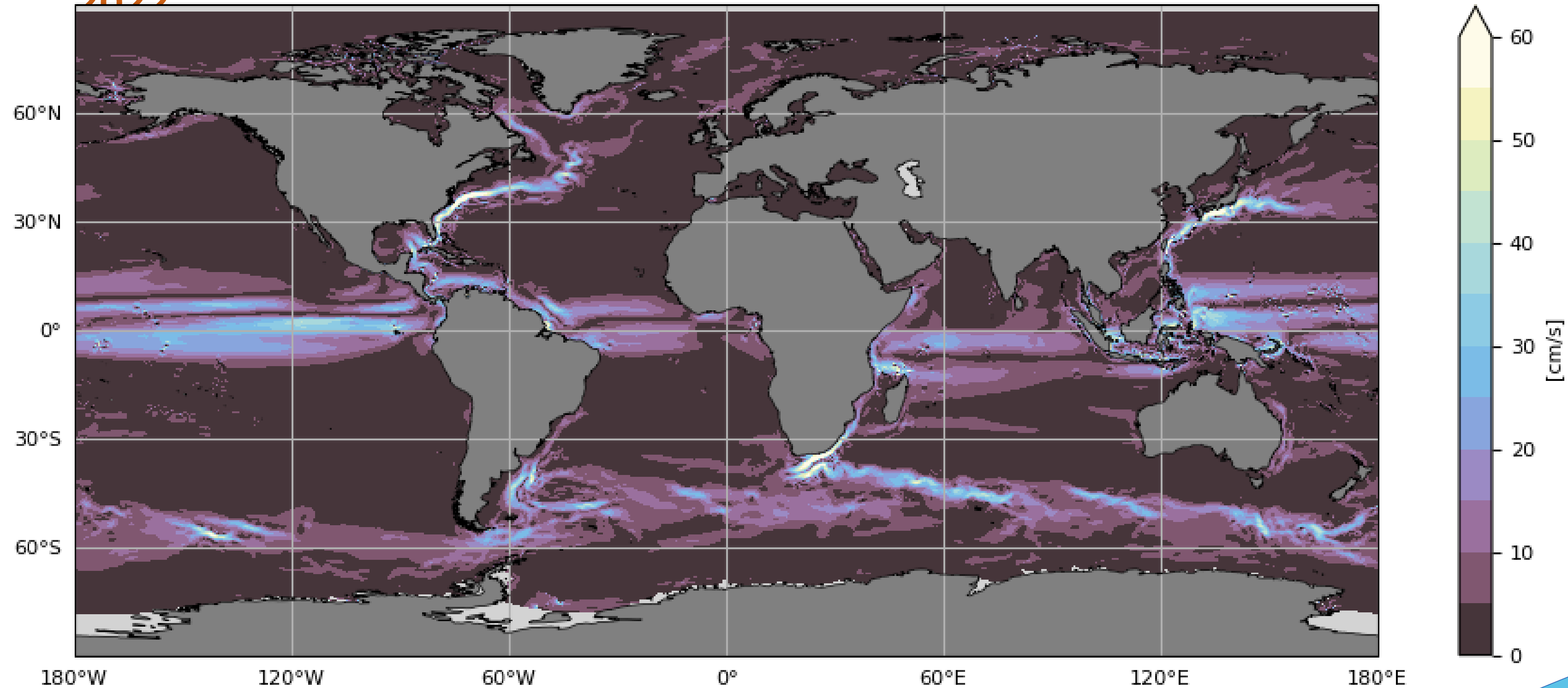
Ebauche MDT CNES-CLS-2022



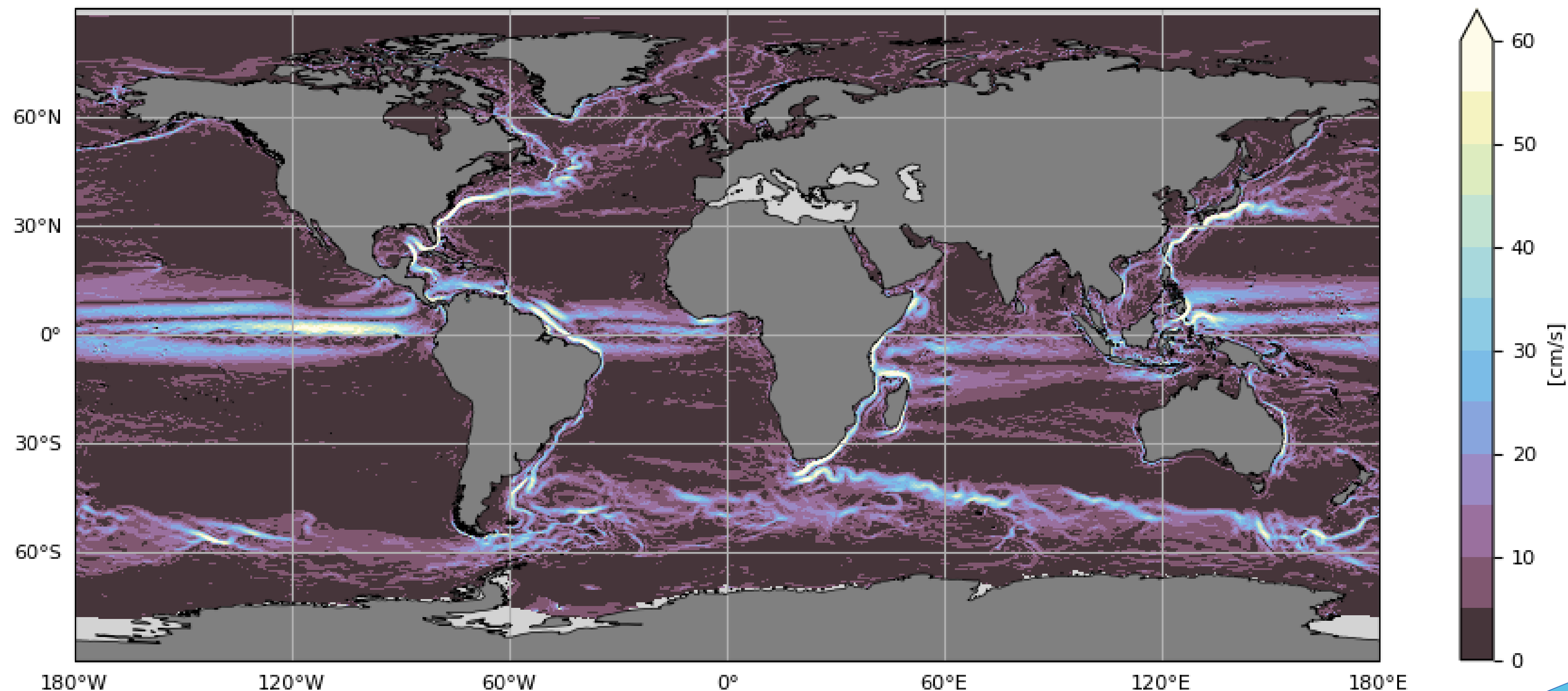
MDT CNES-CLS-2022



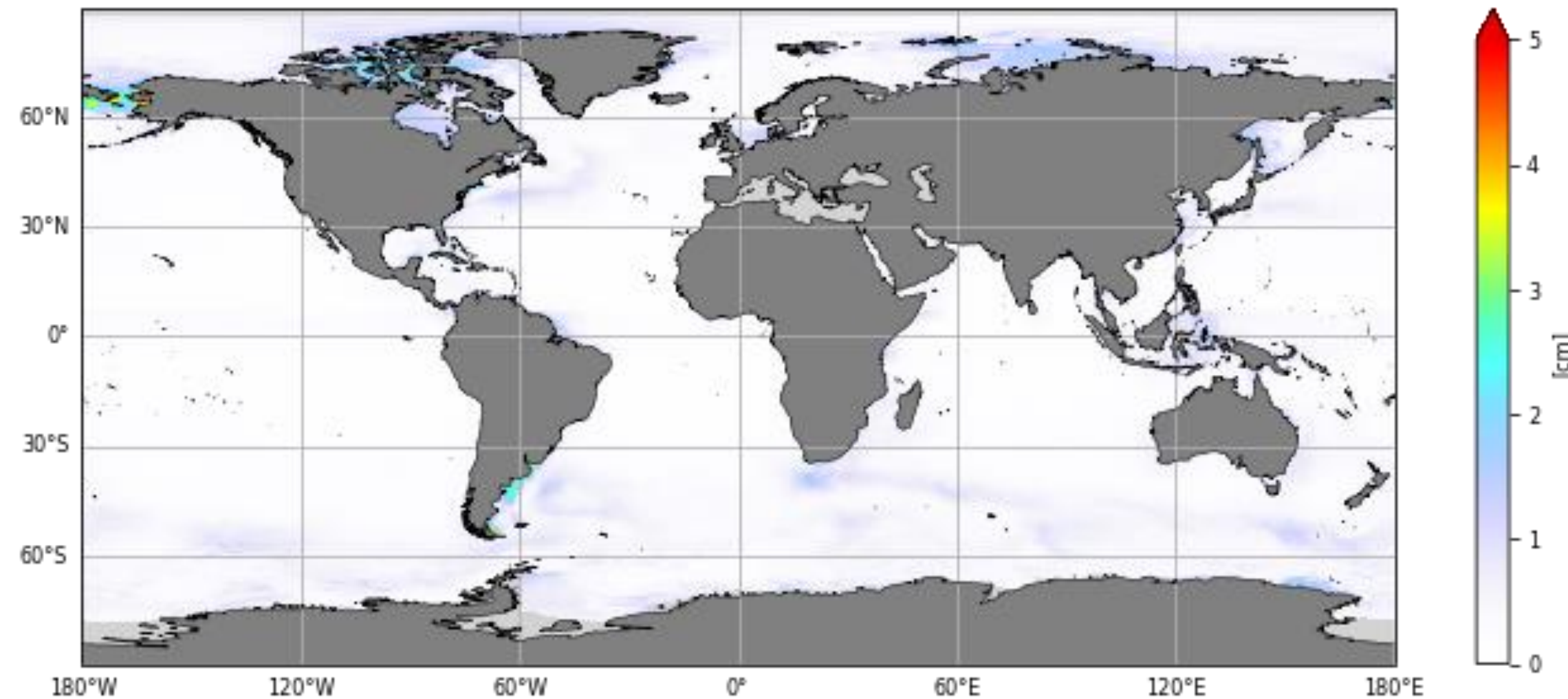
Courants géostrophiques associés à l'ébauche de la MDT CNES-CLS-2022



Courants géostrophiques associés à la MDT CNES-CLS-2022



Erreur théorique associée à la MDT



L'analyse objective fournit également une erreur théorique :

$$e(r, t) = C_{r,r} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}^{-1} C_{r,i} C_{r,j}$$

où :

- A = matrice de covariance des observations ;
- C = covariance entre les observations et le point estimé.

Cette erreur dépend directement :

- des fonctions de covariance choisies ;
- des rayons de corrélation spatiaux et temporels.

L'erreur théorique fournie par l'analyse objective multivariée

- n'est pas totalement fiable car elle **dépend fortement des échelles de corrélation choisies**.
Plus ces échelles sont grandes, plus l'erreur estimée devient artificiellement faible
- **ne prend pas en compte l'erreur de l'ébauche**

Validation par rapport à des données de drifters indépendants (vitesses)

On calcule d'abord la différence RMS (Root Mean Square) entre :

$$V_{bouée} - V_{altimétrie}$$

Cette RMS contient plusieurs sources d'erreur :

- erreur des bouées et des corrections,
- erreur des anomalies altimétriques,
- erreur de la circulation moyenne (celle que l'on cherche).

En supposant les erreurs indépendantes :

$$RMS^2 = E_{bouée}^2 + E_{altimétrie}^2 + E_{MDT}^2$$

Donc :

$$E_{MDT} = \sqrt{RMS^2 - E_{bouée}^2 - E_{altimétrie}^2}$$

Résultats

8 à 10 cm/s dans les régions très dynamiques :

Gulf Stream,

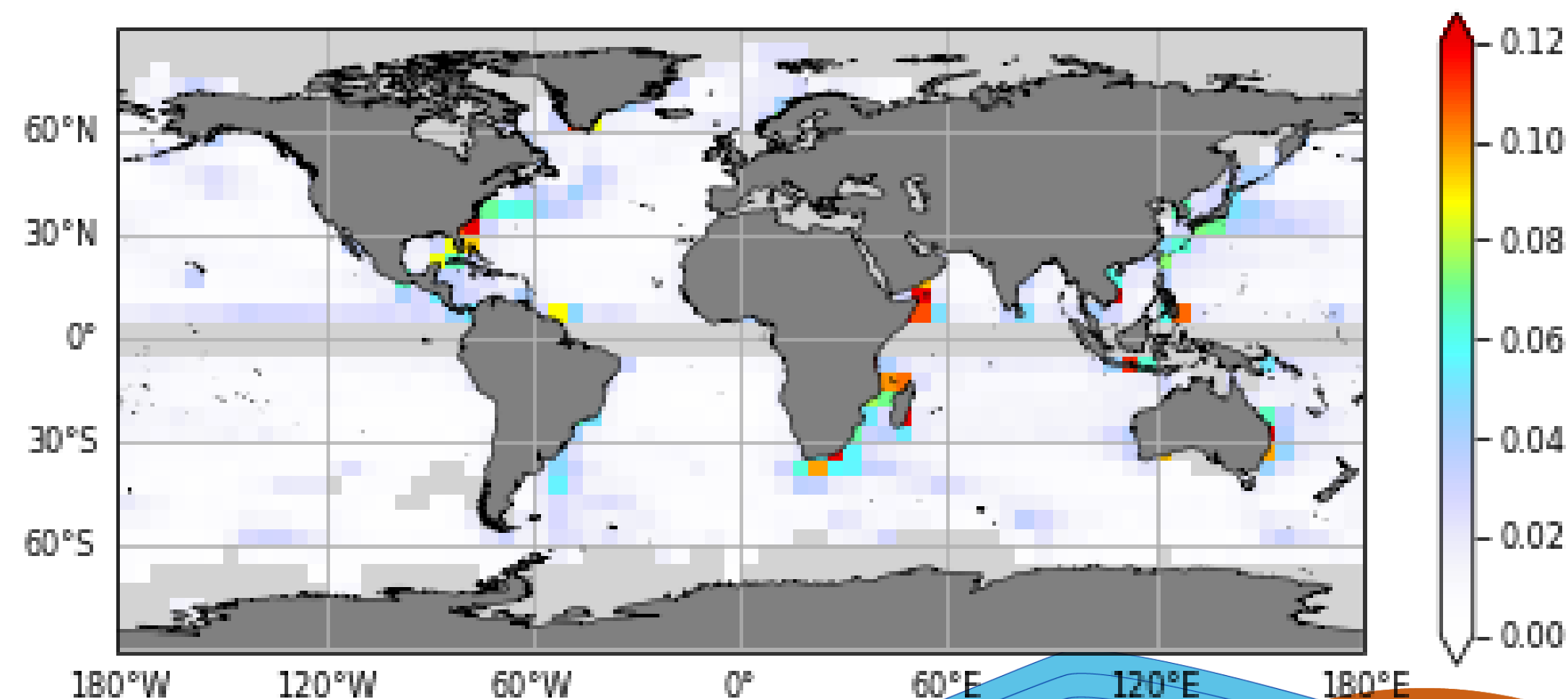
Kuroshio,

Courant des Aiguilles

< 4 cm/s dans la plupart des latitudes moyennes et basses.

RMS (differences)	U [cm s ⁻¹]	V [cm s ⁻¹]	Modulus [cm s ⁻¹]	Direction [°]
CNES-CLS22 MDT	7.95	8.12	9.61	50.43
CNES-CLS18 MDT	9.86	9.23	9.58	55.88
CNES-CLS22 MDT first guess	7.97	8.26	10.02	51.77
% 22 vs 18	-19.4 %	-12.0 %	0.4 %	-9.8 %
% 22 vs 22 first guess	-0.2 %	-1.7 %	-4.1 %	-2.6 %

(a) RMSD sur le module [m/s]

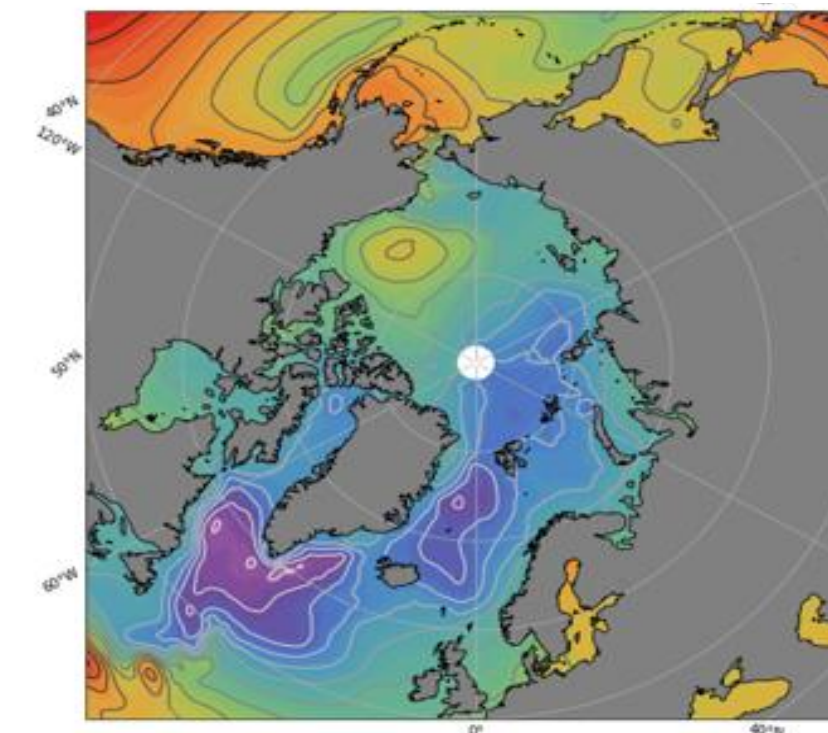


Perspectives : Vers la MDT CNES-CLS-2026

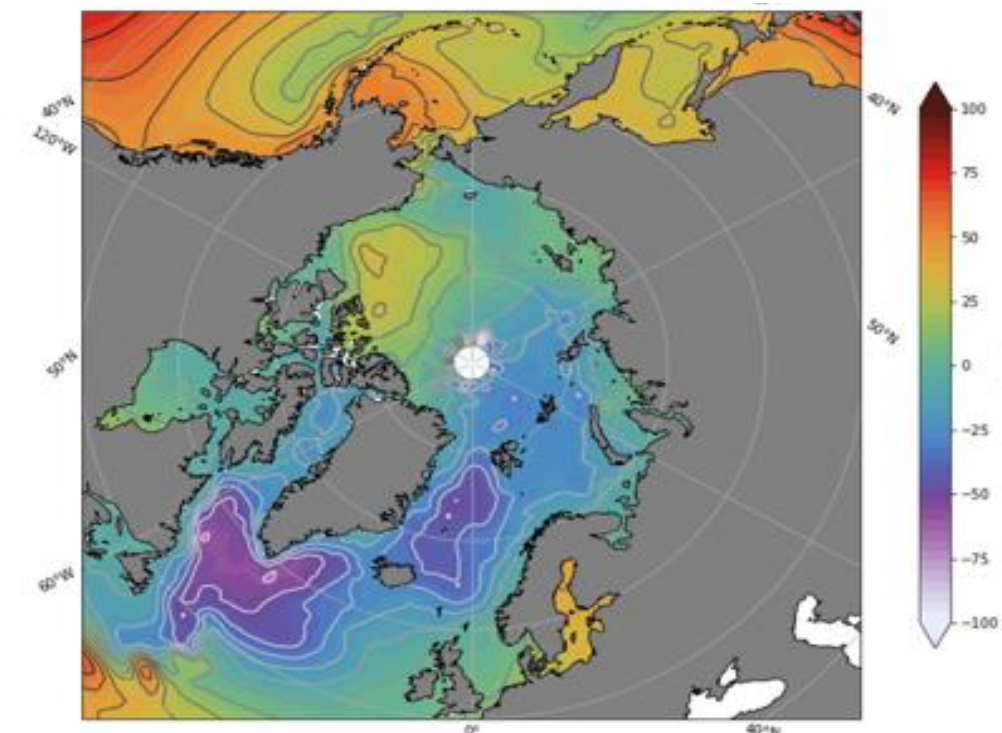
- Mise à jour de l'ébauche à partir des dernières versions de la MSS et du géoïde

MDT=MSS-Geoid Ebauche

(a) CNES-CLS26beta Ebauche



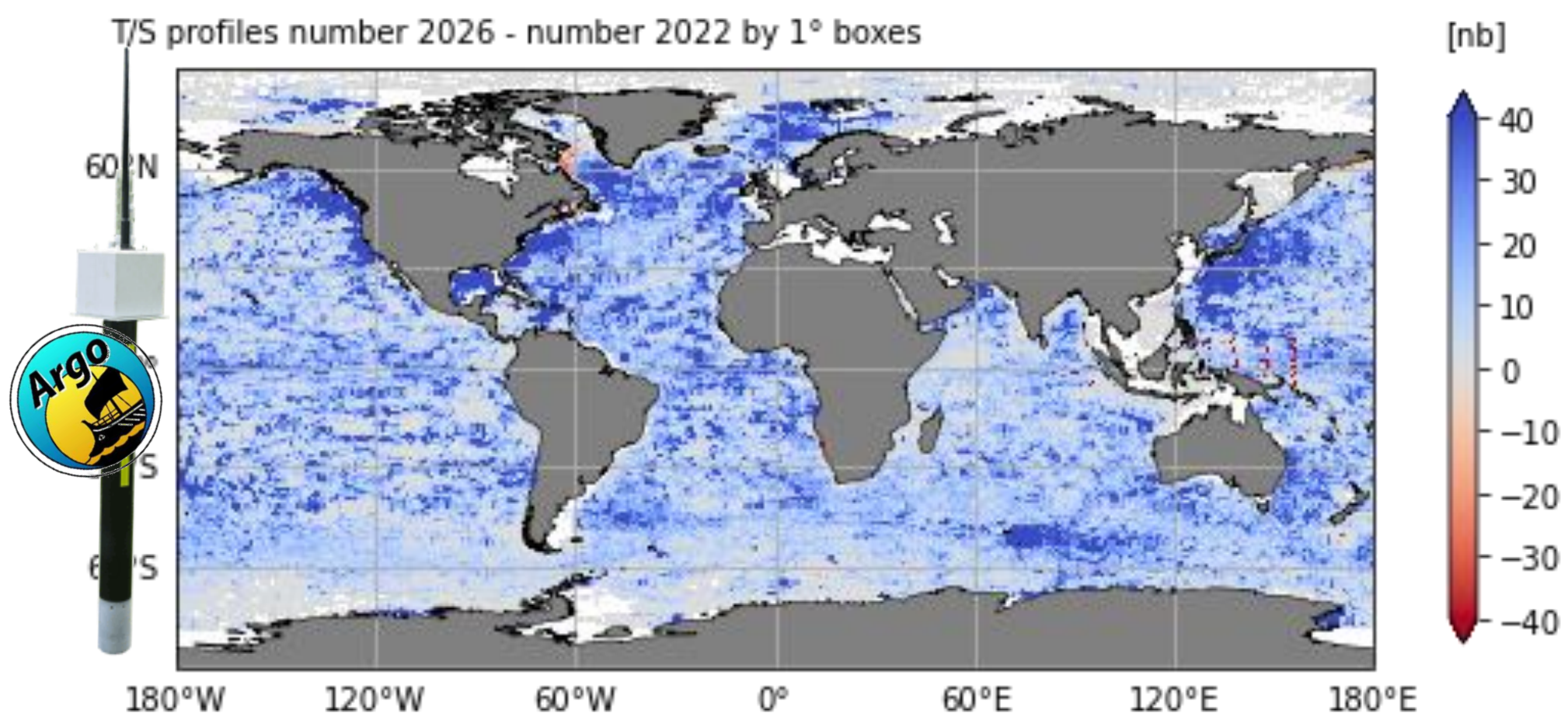
(b) CNES-CLS22 Ebauche



- Amélioration de certaines structures en Arctique, en particulier la Gyre de Beaufort

Perspectives : Vers la MDT CNES-CLS-2026

- Mise à jour de l'ébauche à partir des dernières versions de la MSS et du géoïde
- **Nouveau prétraitement des données in situ pour améliorer la résolution spatiale**



Mise à jour des bases de données pour les hauteurs (à partir des profils T/S) et les vitesses (bouées dérivantes)

- **Profils T/S** : ajout des données **2021-2024**
- **Bouées dérivantes** : ajout des données **mi-2021 à 2025**
- Utilisation des produits DUACS DT2024 pour corriger la variabilité océanique
- Mise à jour des corrections de courant d'Ekman et de glissement dû au vent (wind slip) pour le traitement des bouées dérivantes

Perspectives : Vers la MDT CNES-CLS-2026

- Mise à jour de l'ébauche à partir des dernières versions de la MSS et du géoïde
- Nouveau prétraitement des données in situ pour améliorer la résolution spatiale
- Validation de la MDT à l'aide de jeux de données indépendants

Perspectives plus long terme

- Ajout de nouveau type de données
 - MDT CNES-CLS22 : ajout de données de radars Haute Fréquence
 - Tests pour ajout de données de courant SAR Doppler
- Raffinement de la résolution des données in situ d'entrée
- Tests de nouvelles méthodes de traitements de données in situ, basées sur du Machine Learning
- Travail sur la validation : comment valider les différentes échelles spatiales de la MDT
- Travail à mener sur une meilleure estimation de l'erreur associée à la MDT

Merci

Contact : sjousset@groupcls.com

Back-up slides

Biais entre MDT estimée avec des observations et MSSH modèle

Comparaison de la SSH moyenne sur 20 ans (GLORYS, période de référence) et de la MDT CNES-CLS2022 :

- Des structures spatiales distinctes
- Un biais moyen (décalage du fond de carte) d'environ **44,1 cm**

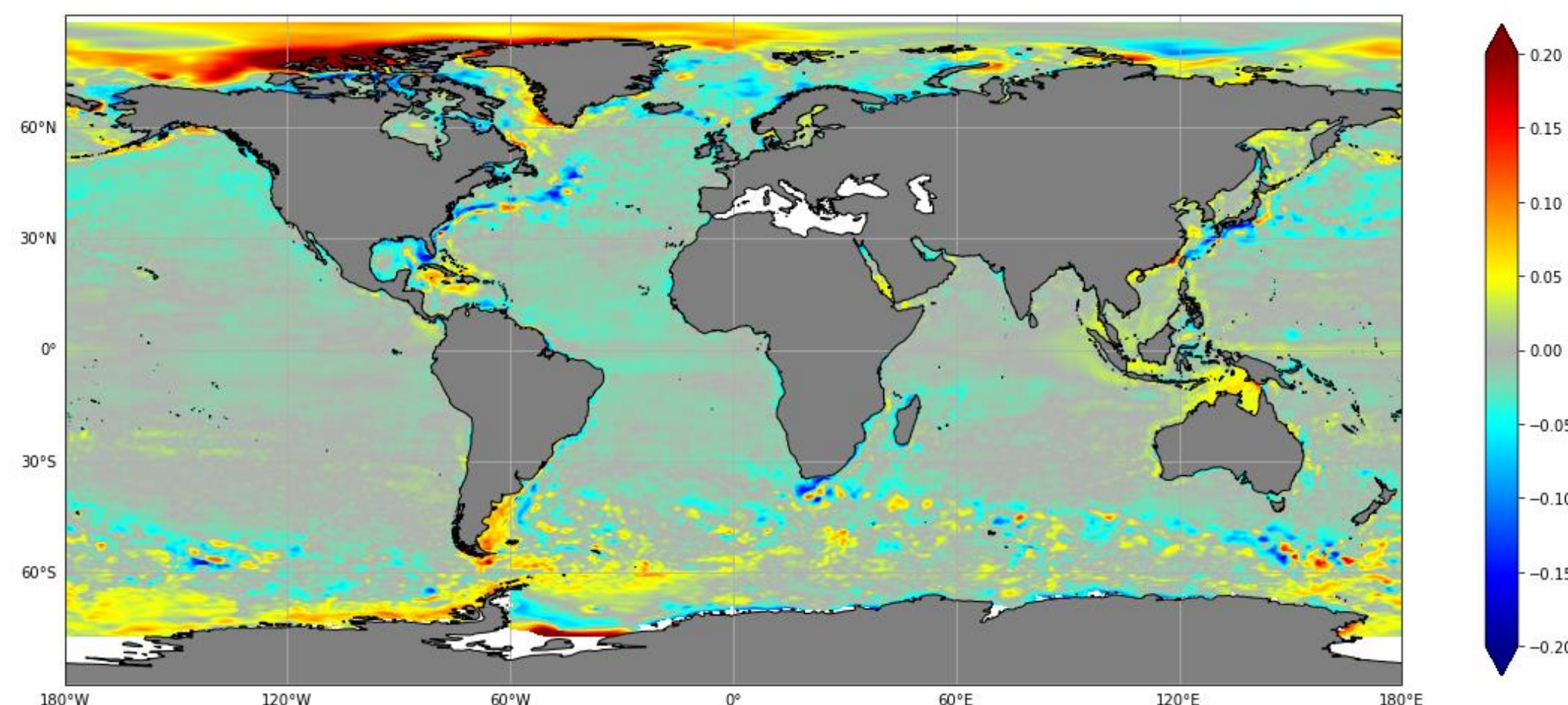
Questions clés :

- Quelle est l'origine de ce biais ?
- S'agit-il d'un décalage réel du niveau moyen de la mer ou résulte-t-il de différences de définitions, de référentiels et/ou de méthodologies entre les deux produits ?

Quelle est la surface de référence du modèle ? Le géoïde ?

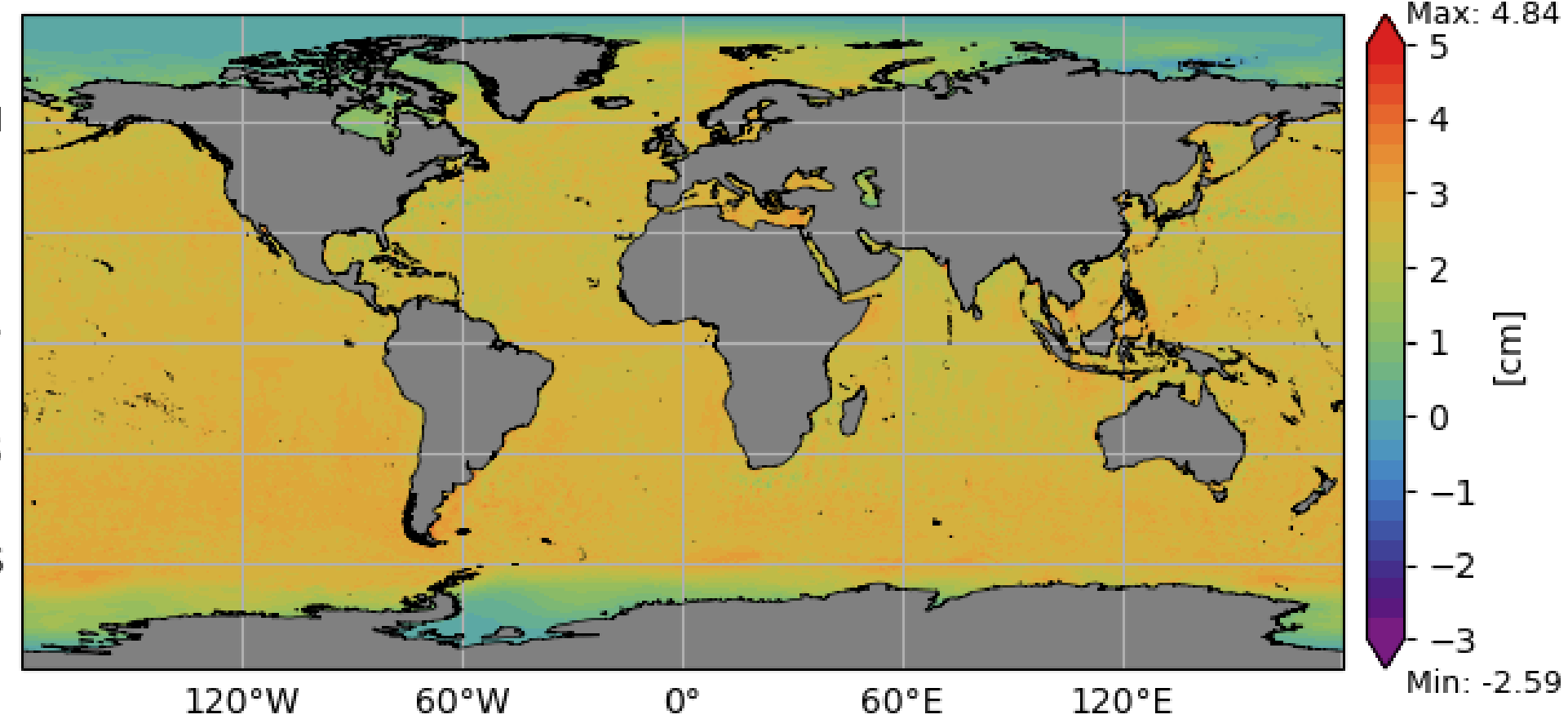
Une surface équipotentielle, mais pas forcément le géoïde ?

MDT22 - MSSH_glorys – 44,1cm

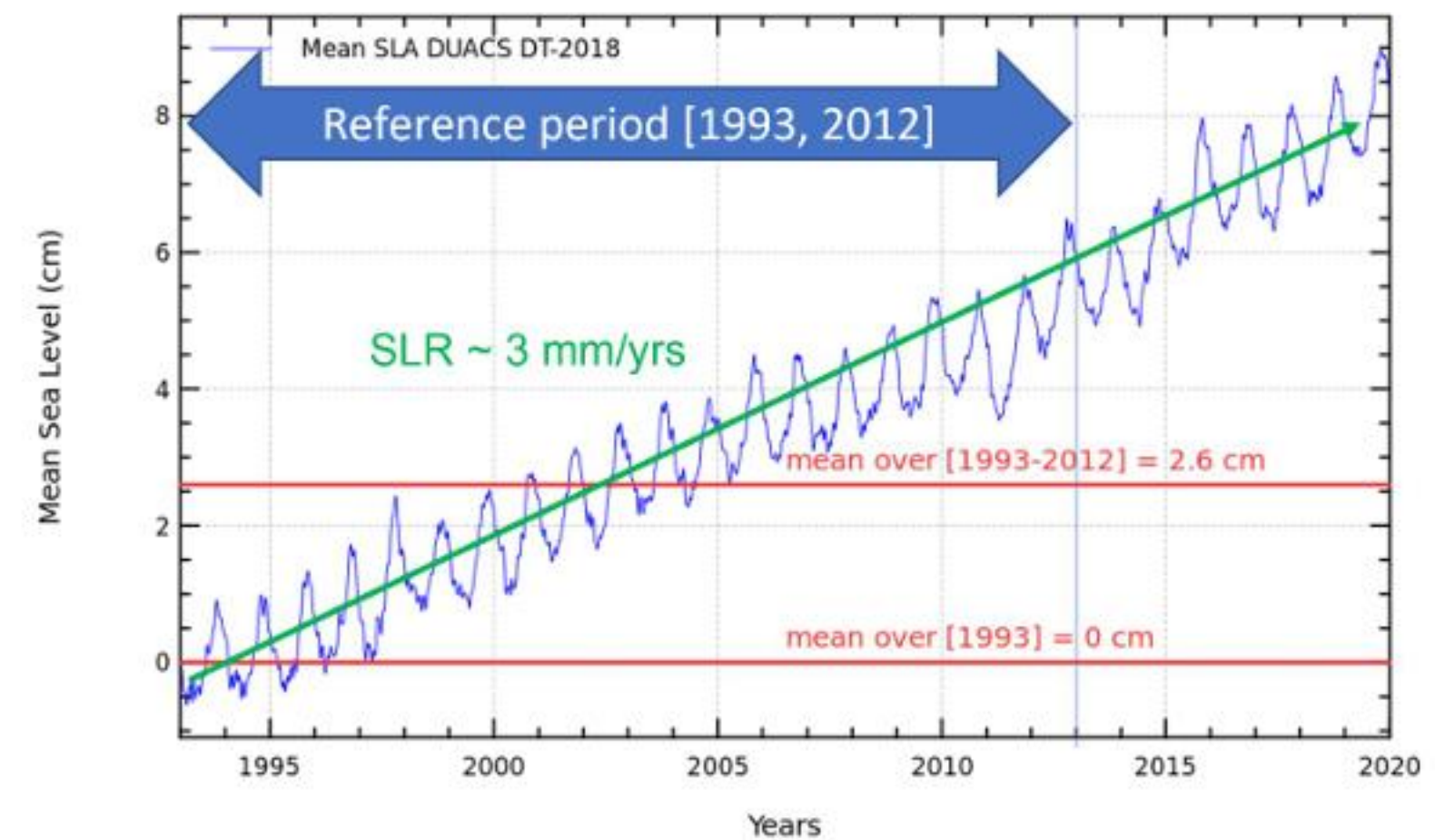


Sources des differences

Mean SLA on 1993-2012



Mean SLA over Global Ocean



Impact du référentiel

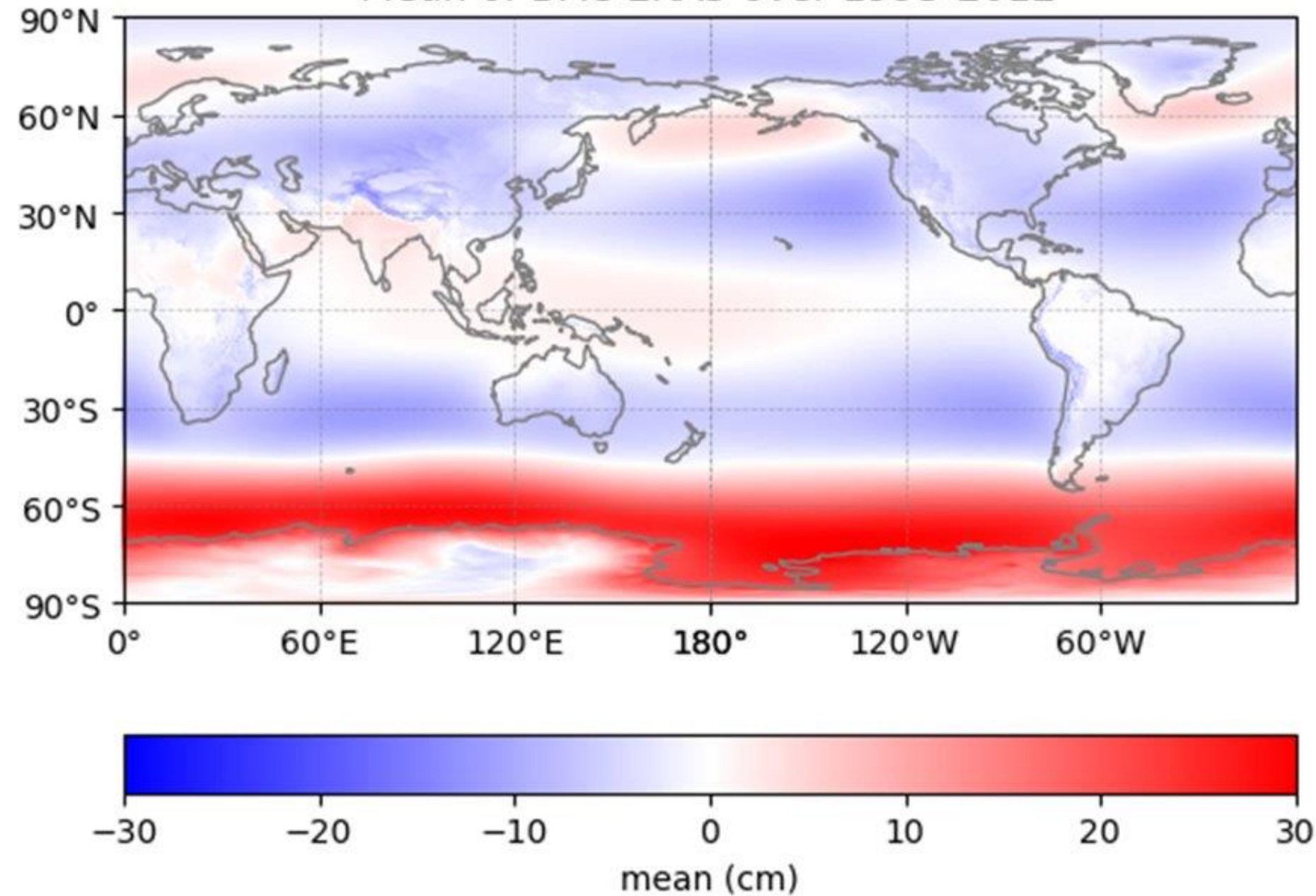
- MSSH : moyenne sur ~20 ans
- MDT : moyenne sur 20 ans, centrée sur 1993
- SLA moyenne sur 20 ans : effet limité (quelques cm)

+ Convention DUACS :

- Biais résiduel de la MDT ≈ 5 cm
- Hérité du changement de période de référence de 2012.

Sources des differences

Mean of DAC ERA5 over 1993-2012



Impact de la correction atmosphérique dynamique (DAC)

- DAC appliquée à la SLA, à la MSS et à la MDT
- Cette dynamique atmosphérique est-elle représentée dans les modèles ?

Ordre de grandeur de la DAC :

- ~20 cm dans l'ACC (moyenne sur 20 ans)
- ~10 cm au nord de 50°S

Autres sources possibles du biais

Marée : MDT référencée au niveau moyen des marées (via le géoïde)

Impact de l'utilisation d'une gravité constante (g) ?

Autres différences de référentiel ou de méthodologie ?