



Des satellites au service de la surveillance des océans, et des lacs et des rivières

=> la mission SWOT Surface Water Ocean Topography



- 1 Un peu de contexte
- 2 Altimétrie satellitale & SWOT
- 3 SWOT pour les océans
- 4 SWOT pour l'hydrologie



Rosemary Morrow
LEGOS/Université Toulouse III
CNES SWOT Ocean Lead



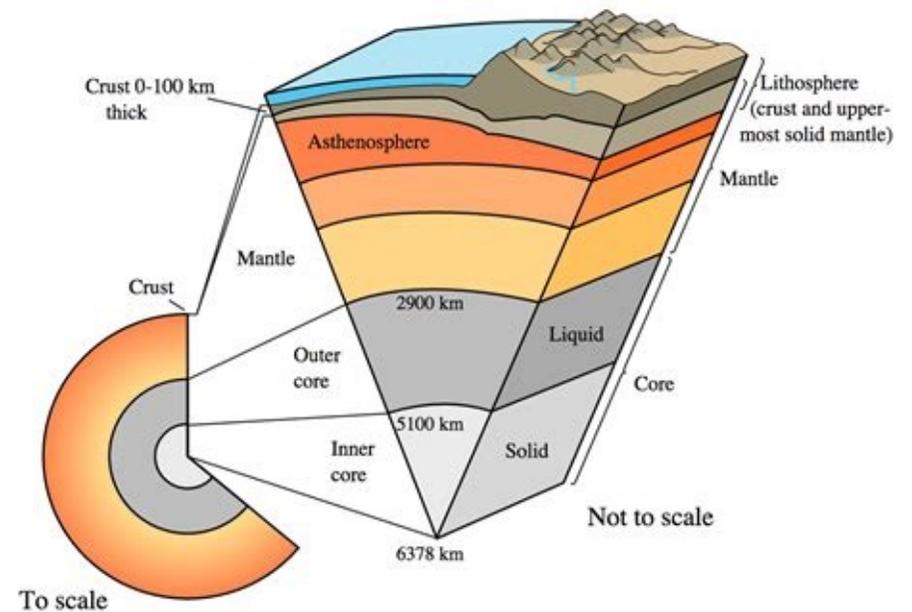
Notre planète bleue ...



Les océans couvrent 70% de la superficie de la Terre

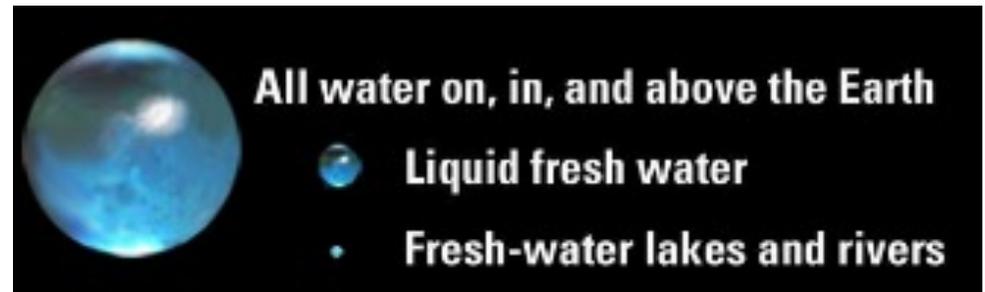
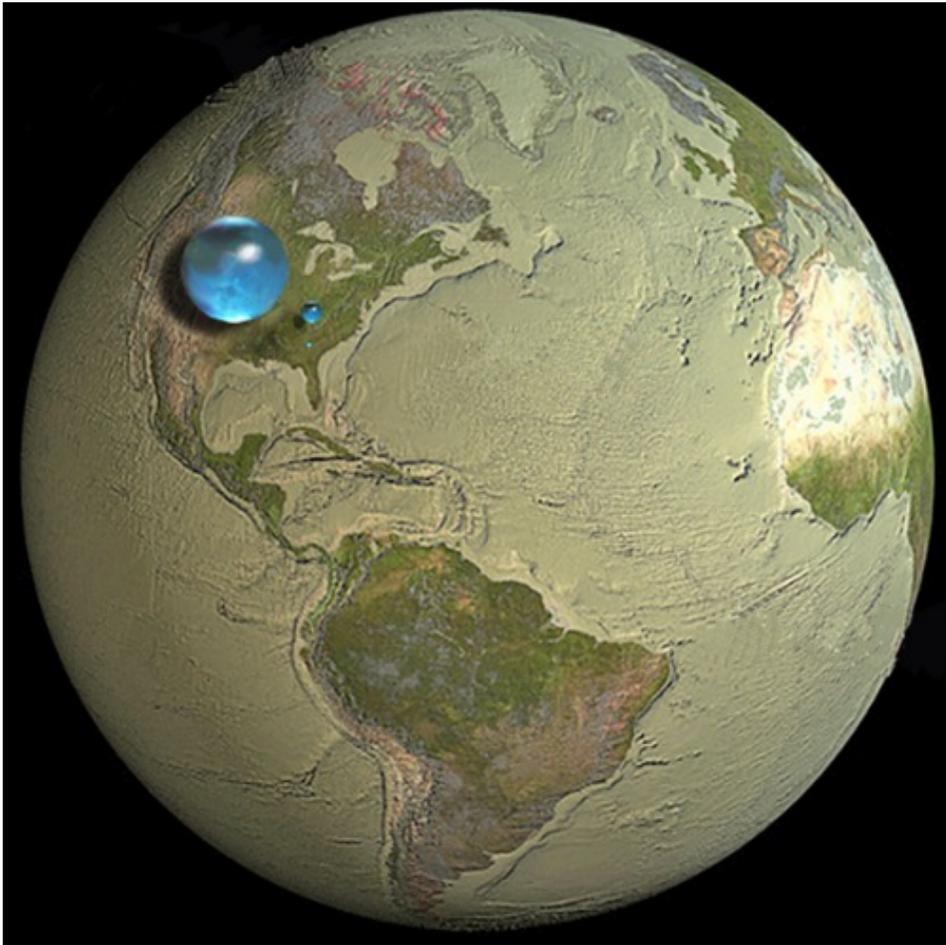
Profondeur moyenne des océans : 3,7 km

Rôle majeur dans l'équilibre de notre climat



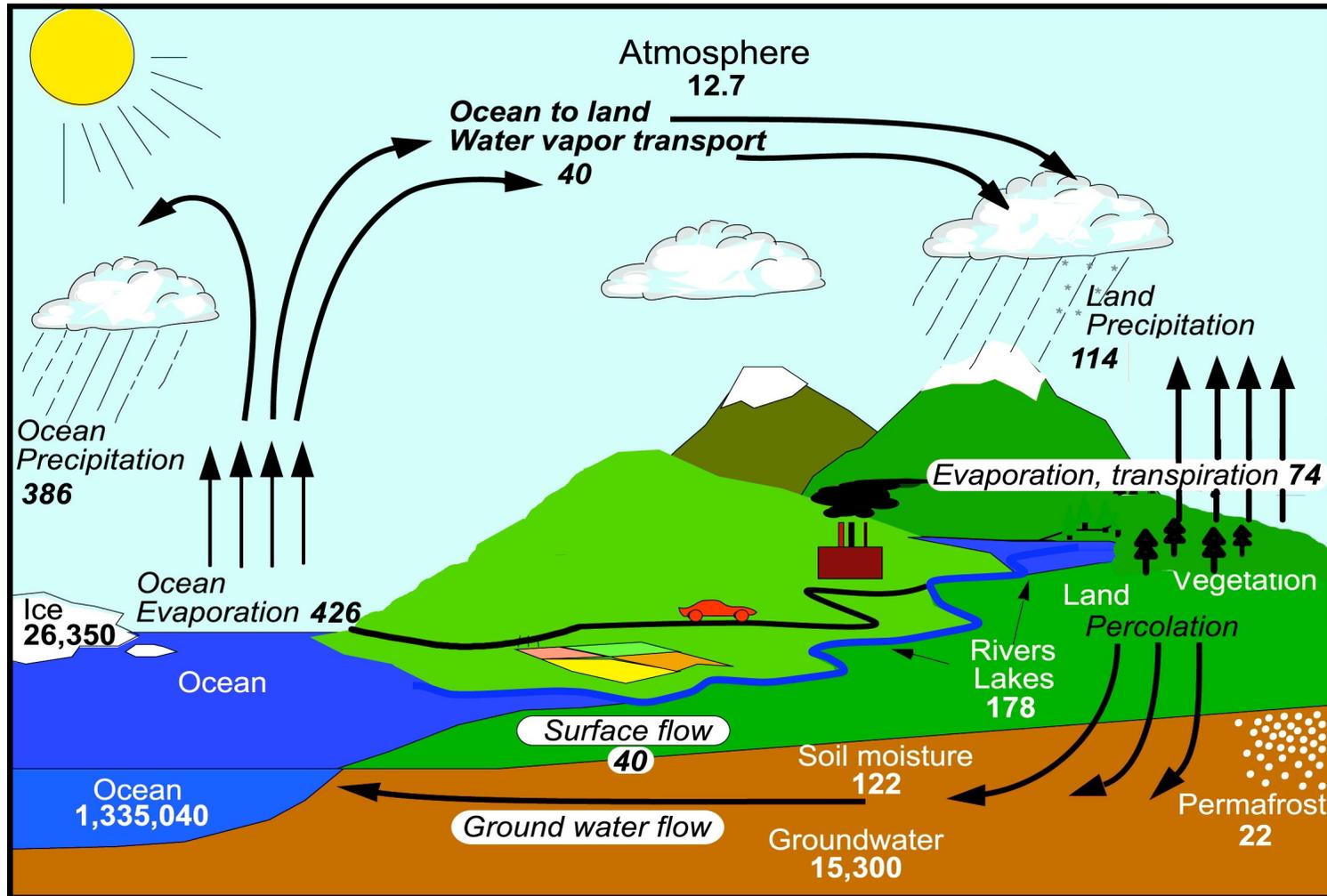
« A l'échelle cosmique, l'eau liquide est plus rare que l'or »

Hubert Reeves, astronome canadien



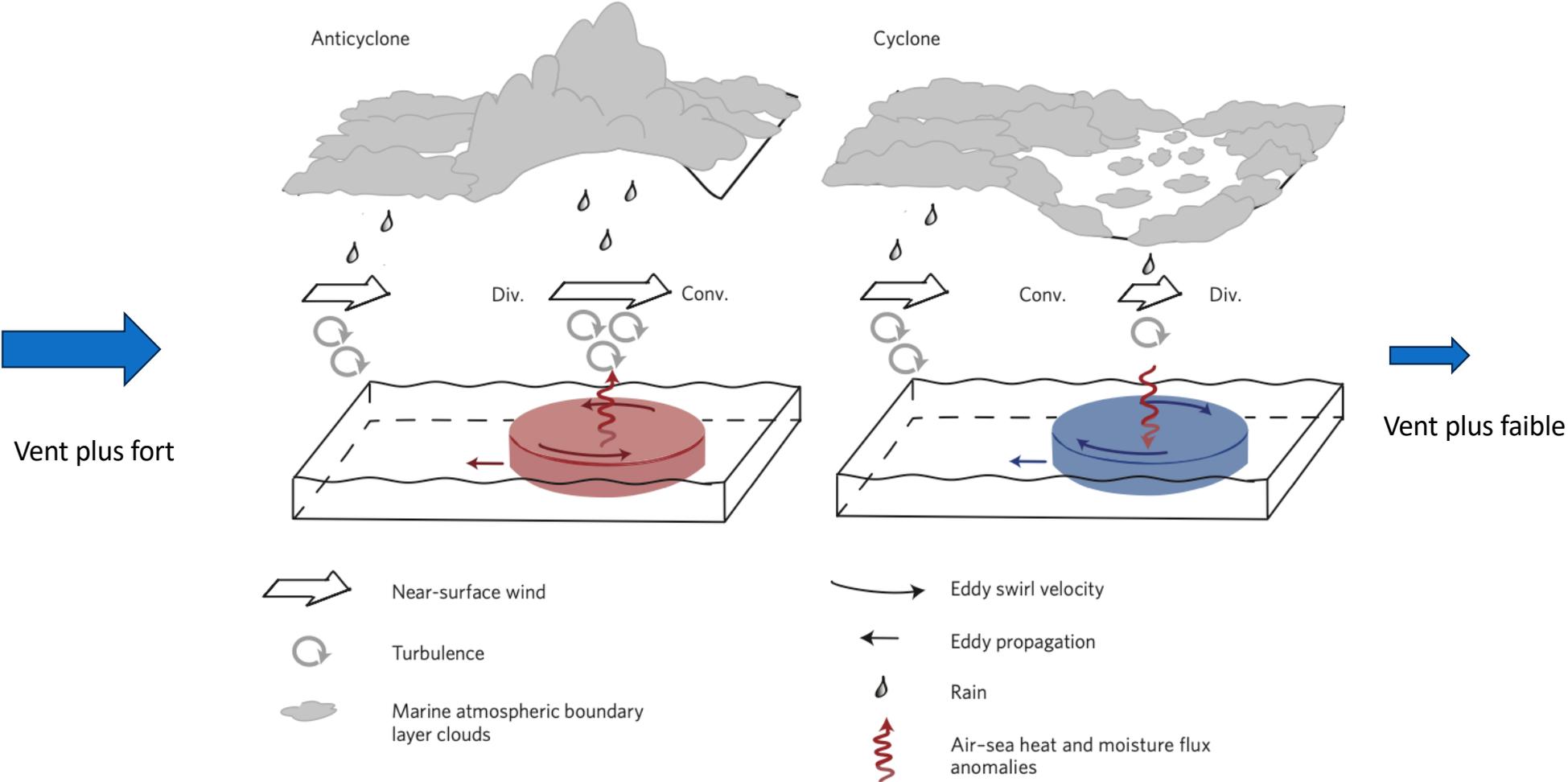
Howard Perlman, USGS,
Jack Cook, Woods Hole Oceanographic Institution,
Adam Nieman
Data source: Igor Shiklomanov
<http://ga.water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>

Observer des éléments clés du cycle de l'eau global



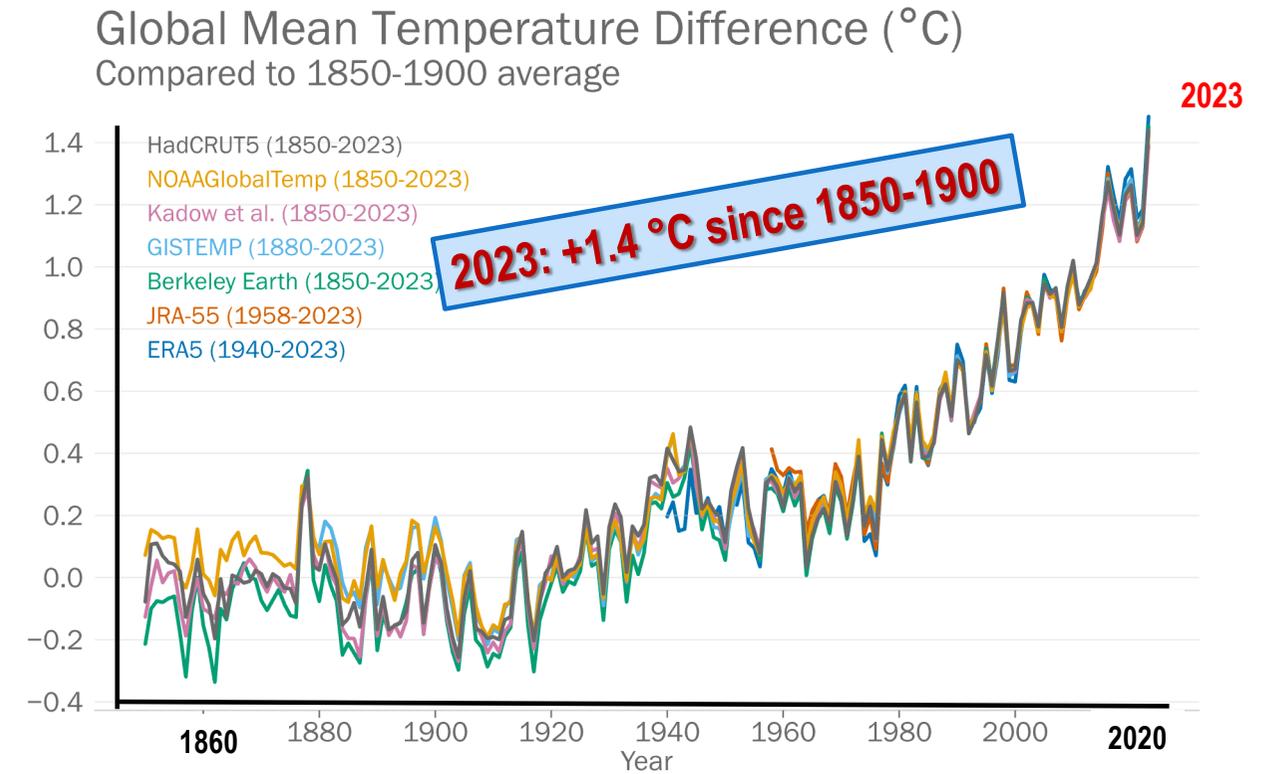
Units: Thousand cubic km for storage, and *thousand cubic km/yr* for exchanges *1990s

Role de la température de l'océan sur le cycle de l'eau



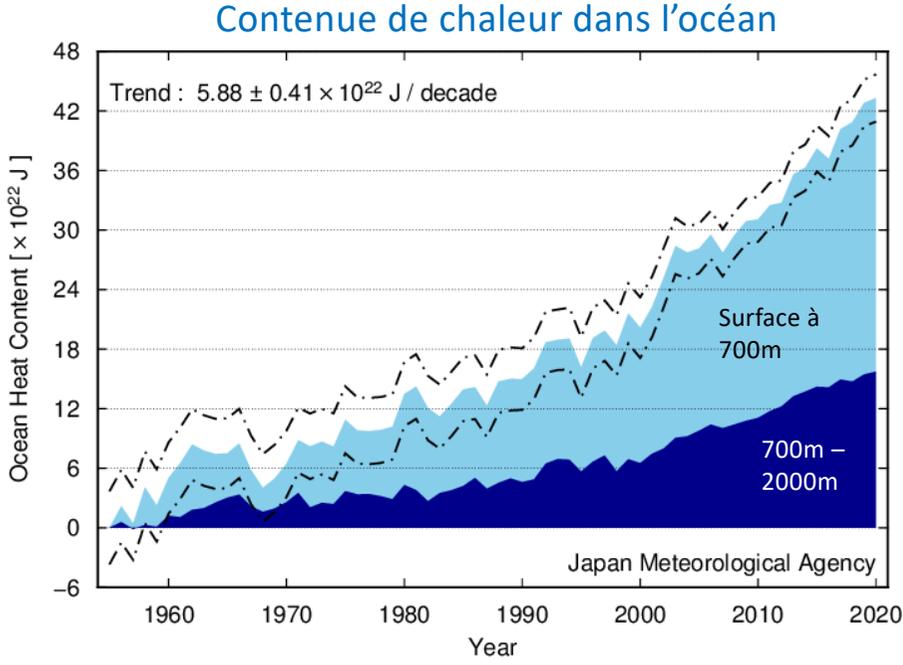
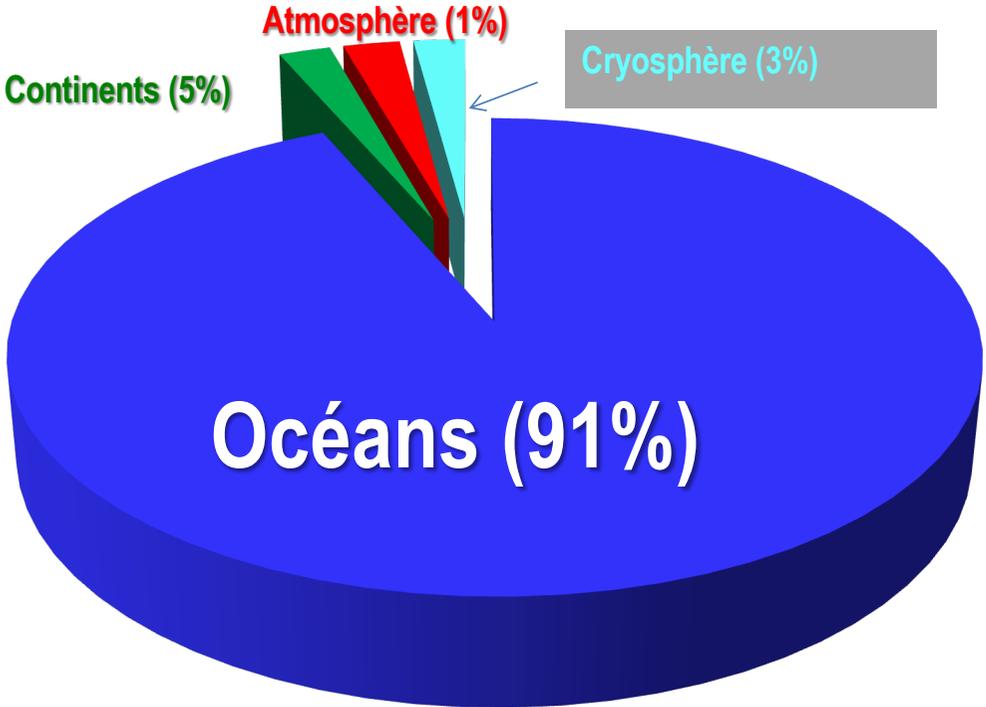
Evolution de la température moyenne de la Terre depuis 1850

Notre planète se réchauffe



World Meteorology Organisation, 2024

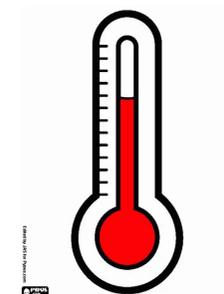
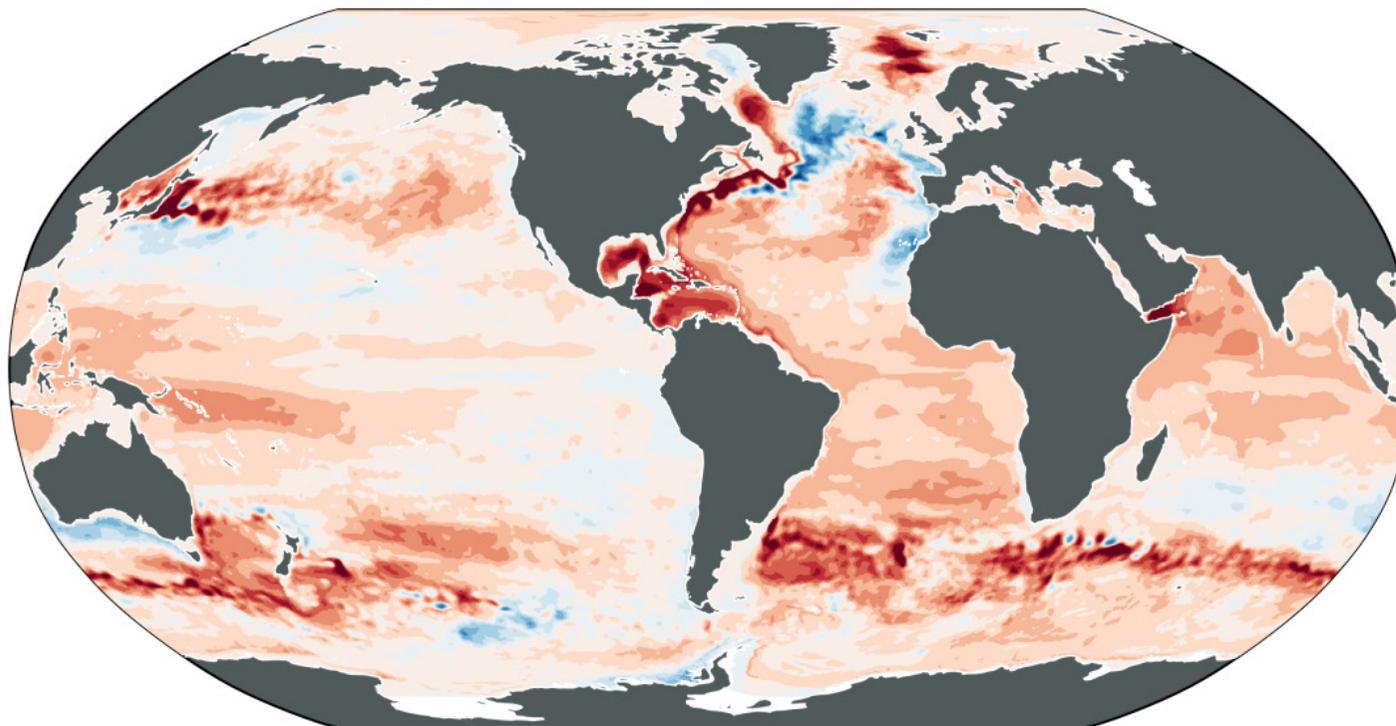
Excès de chaleur
Accumulée dans les différents réservoirs du système climatique depuis 50 ans



IPCC/GIEC AR6 2021

Augmentation de la chaleur dans l'océan entre 1993 et 2023

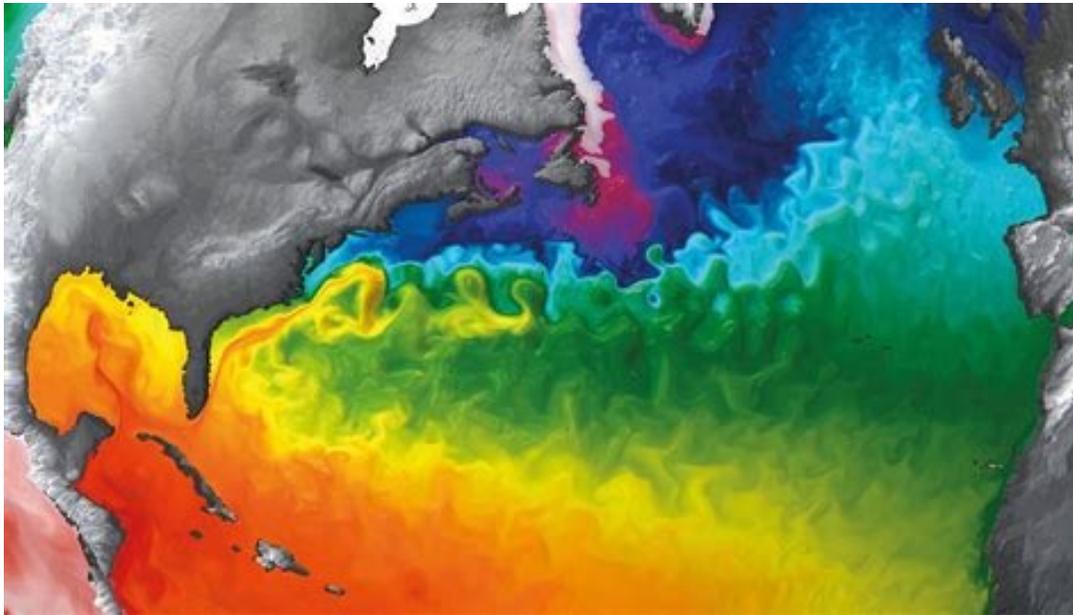
Depth: upper 2000 m • Data: ORAS5 • Credit: C3S/ECMWF



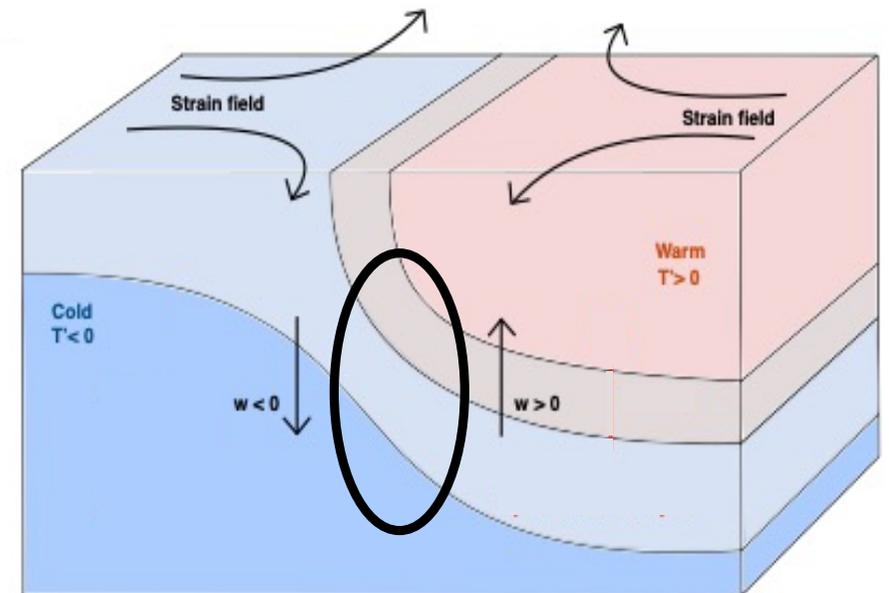
Comment cette chaleur est redistribuée dans l'océan ?

Par des courants océaniques, le mélange, la convection

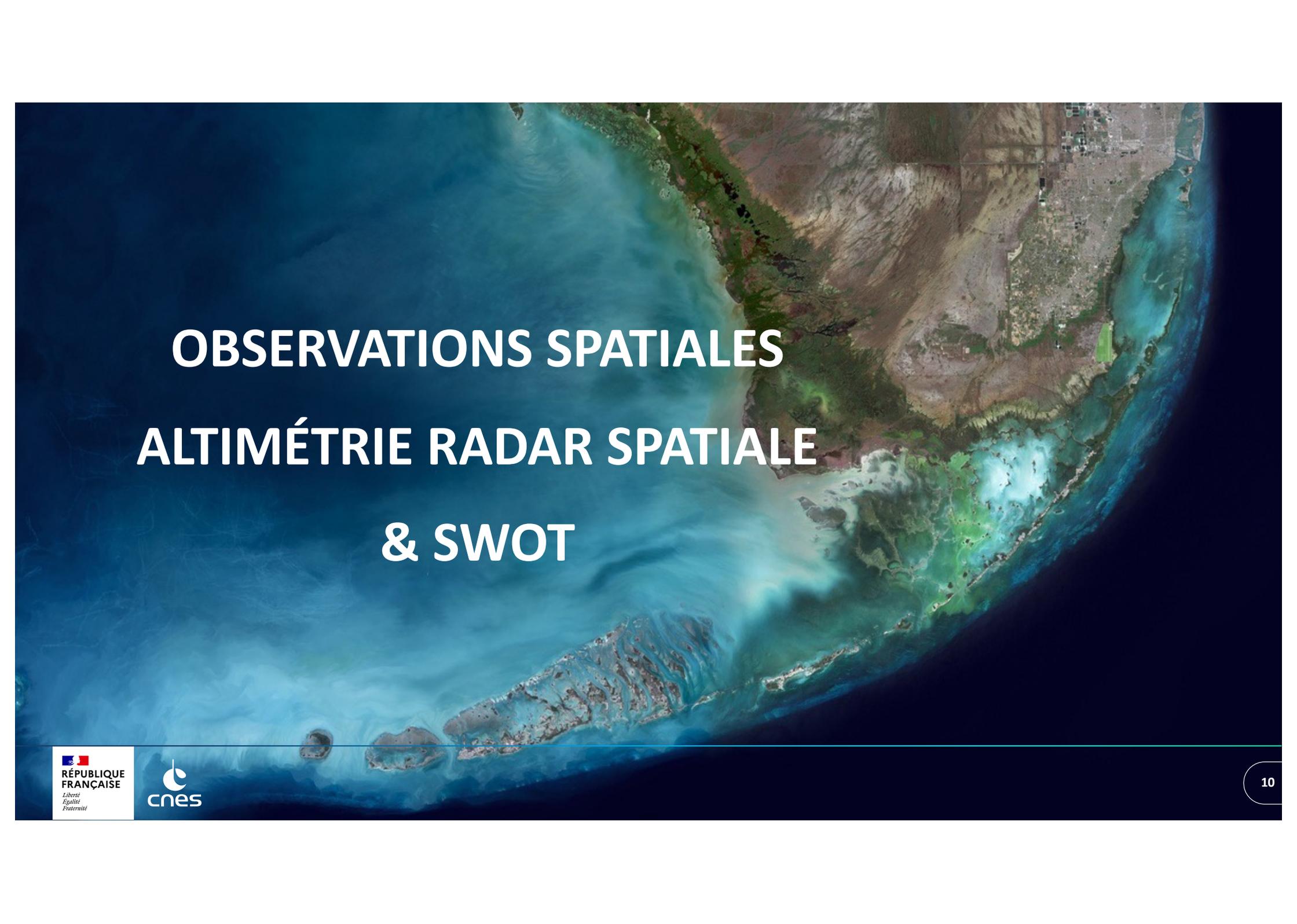
Horizontalement : eg le Gulf Stream



Verticalement : par la convection et les étirements du courant de surface



Aujourd'hui on observe la dynamique des grands méandres et tourbillons et leurs étirements > 100 km de largeur

A satellite image of a coastal region, likely the Gulf of Mexico, showing a city, a bay, and a large island. The text is overlaid on the image.

OBSERVATIONS SPATIALES ALTIMÉTRIE RADAR SPATIALE & SWOT

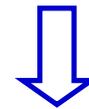
Comment observer et prévoir la circulation océanique ... et son rôle dans l'équilibre de notre climat?



Observations satellitales (en surface)

(l'eau empêche la propagation des ondes EM)

- Température et salinité de surface
- Couleur de l'eau
- Vents / vagues
- **Niveau de la mer** : marée, vagues, & intégrale des variations en profondeur

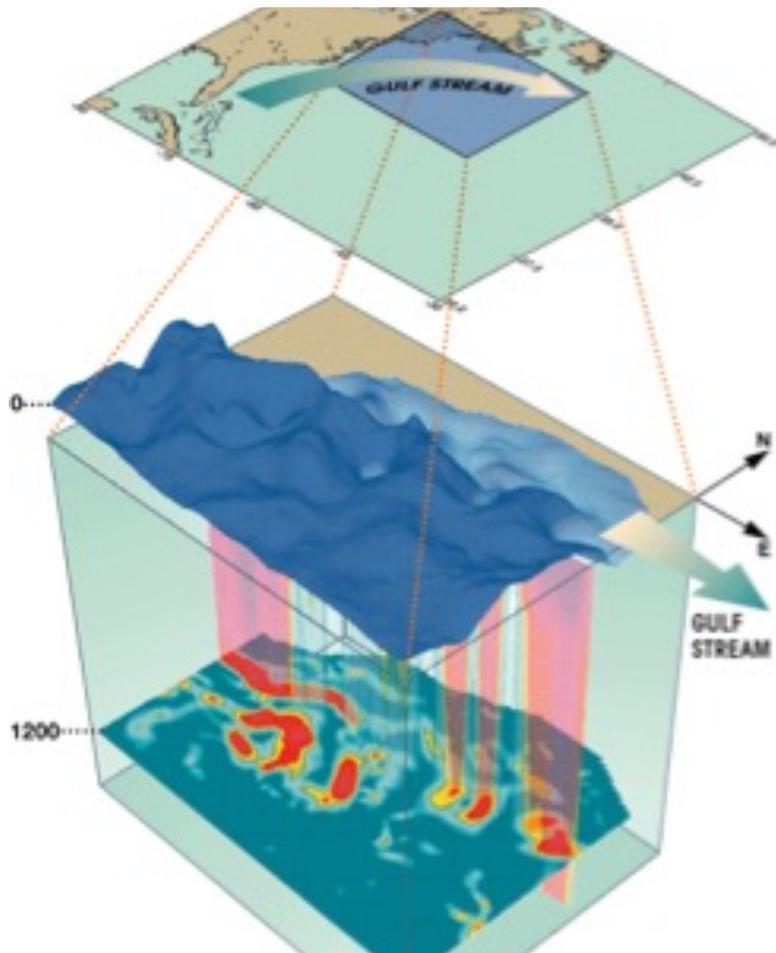


Assimilation dans les Modèles

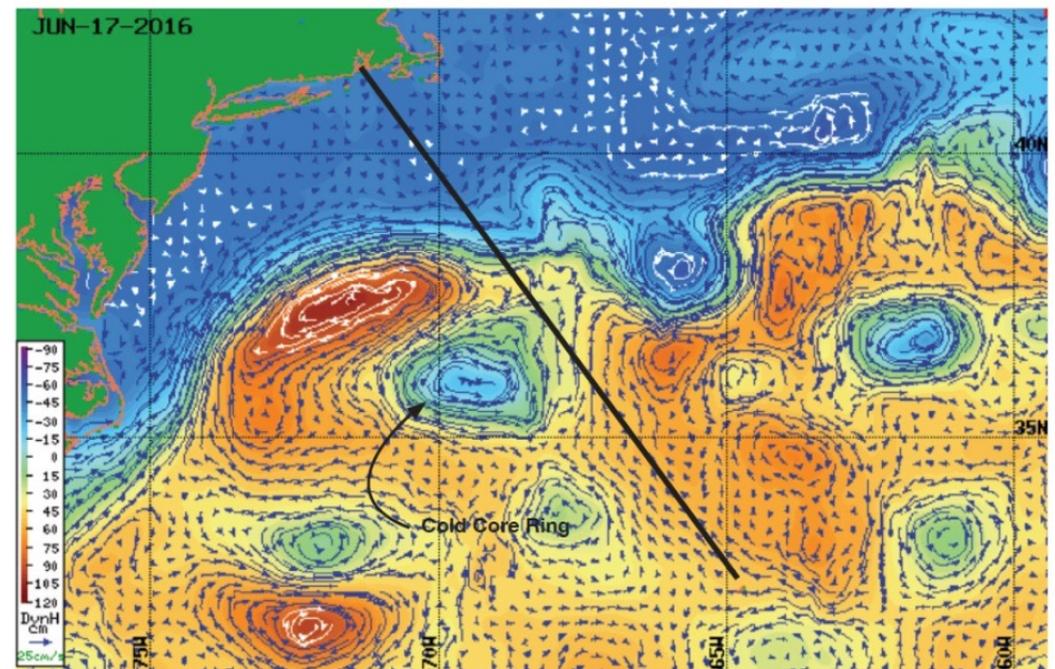


Observations *In situ* (en profondeur)

Lien entre l'élévation du niveau de la mer et des courants en profondeur



Élévation du niveau de la mer : représente une intégrale verticale de la distribution de chaleur/masse en profondeur
Courants de surface dits « géostrophiques » sont dérivés des gradients de la hauteur



Aujourd'hui, courants & méandres > 100 km diamètre

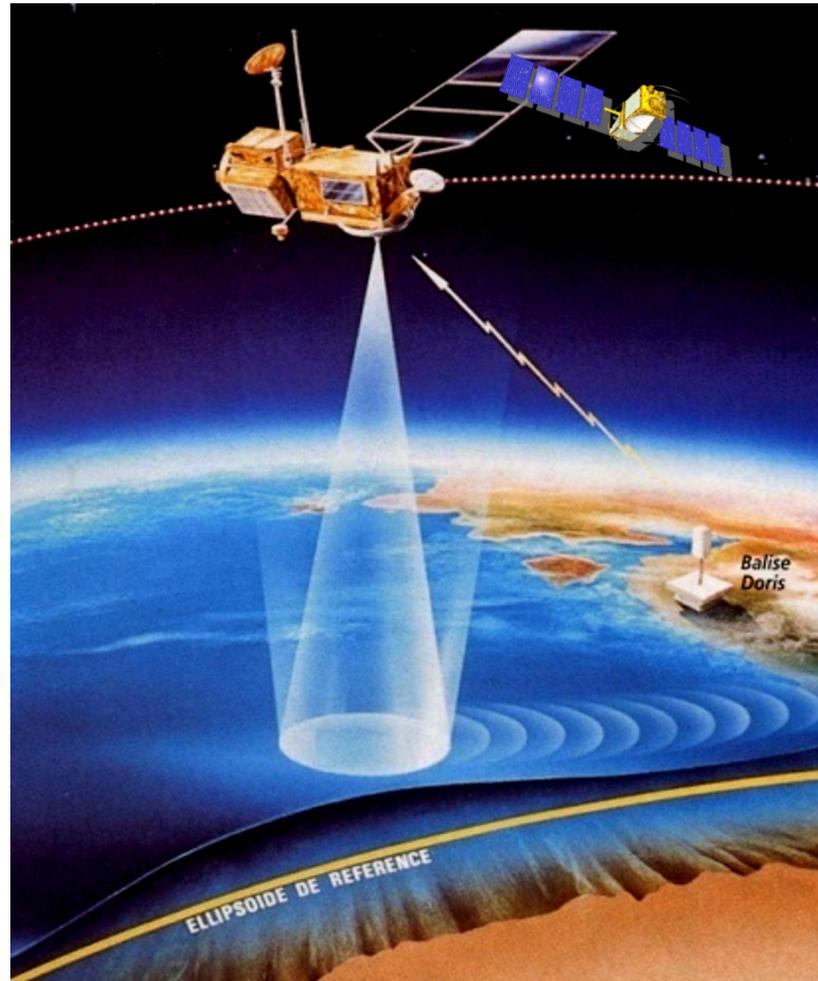
Depuis 30 ans on mesure le niveau de la mer, des lacs et rivières et la circulation océanique depuis l'espace → **Altimétrie radar spatiale**



Distance/Range Radar :

$$d = \text{vel} * \text{temps}/2$$

Vel = vitesse du lumière



Altitude
800-1300 km

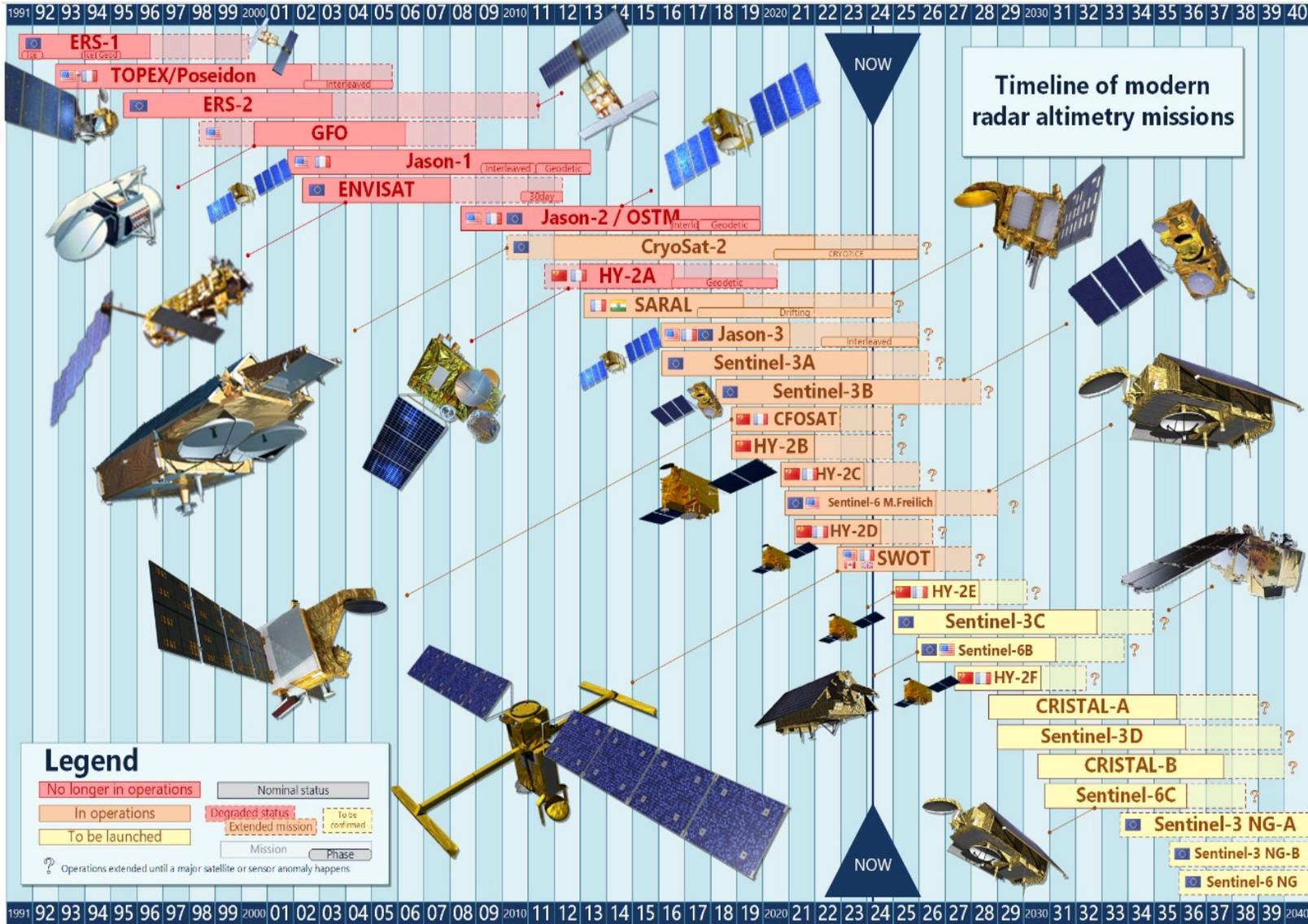


Couverture globale
en dix jours (→ cycle orbital)

Hauteur de la mer :
1-10 cm



Constellation des satellites altimétriques de haute précision depuis 1990



Orbite à 10j :
T/P & Jason & Sentinel-6A,B

Orbite à 35j :
ERS & Envisat & Saral

Orbite à 27j :
Sentinel-3A,B

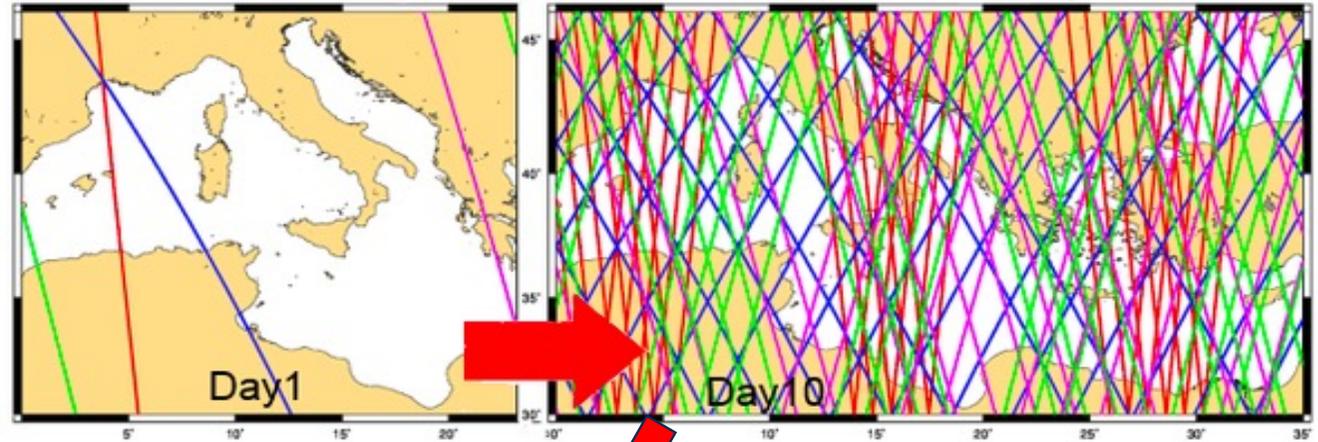
...

Altimétrie radar : applications

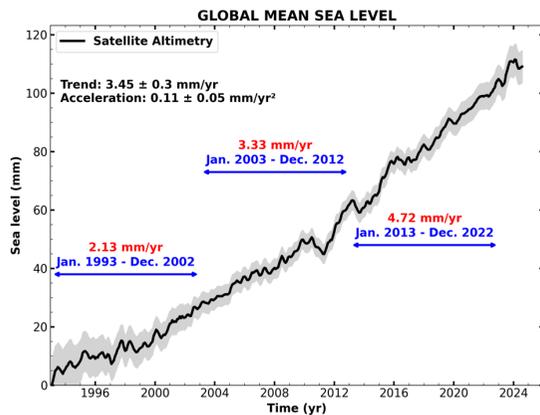
Mesure radar en 1D sous la trace du satellite



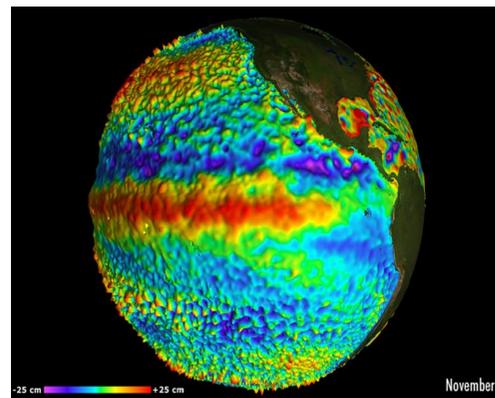
Couverture non-régulière de 4 missions altimétriques



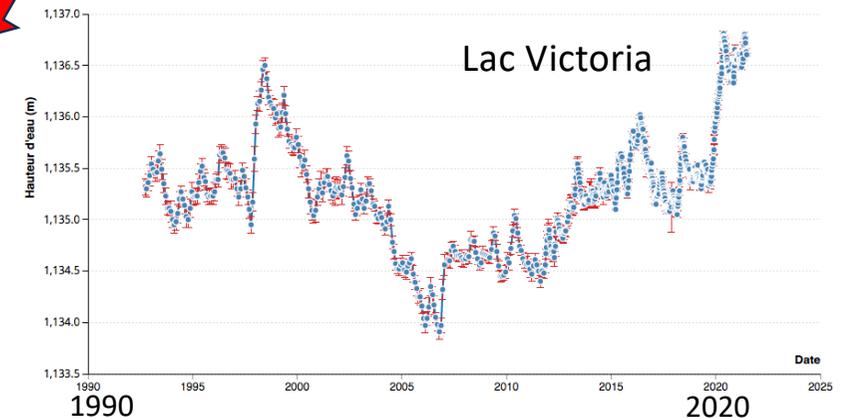
Hausse du niveau moyen de la mer



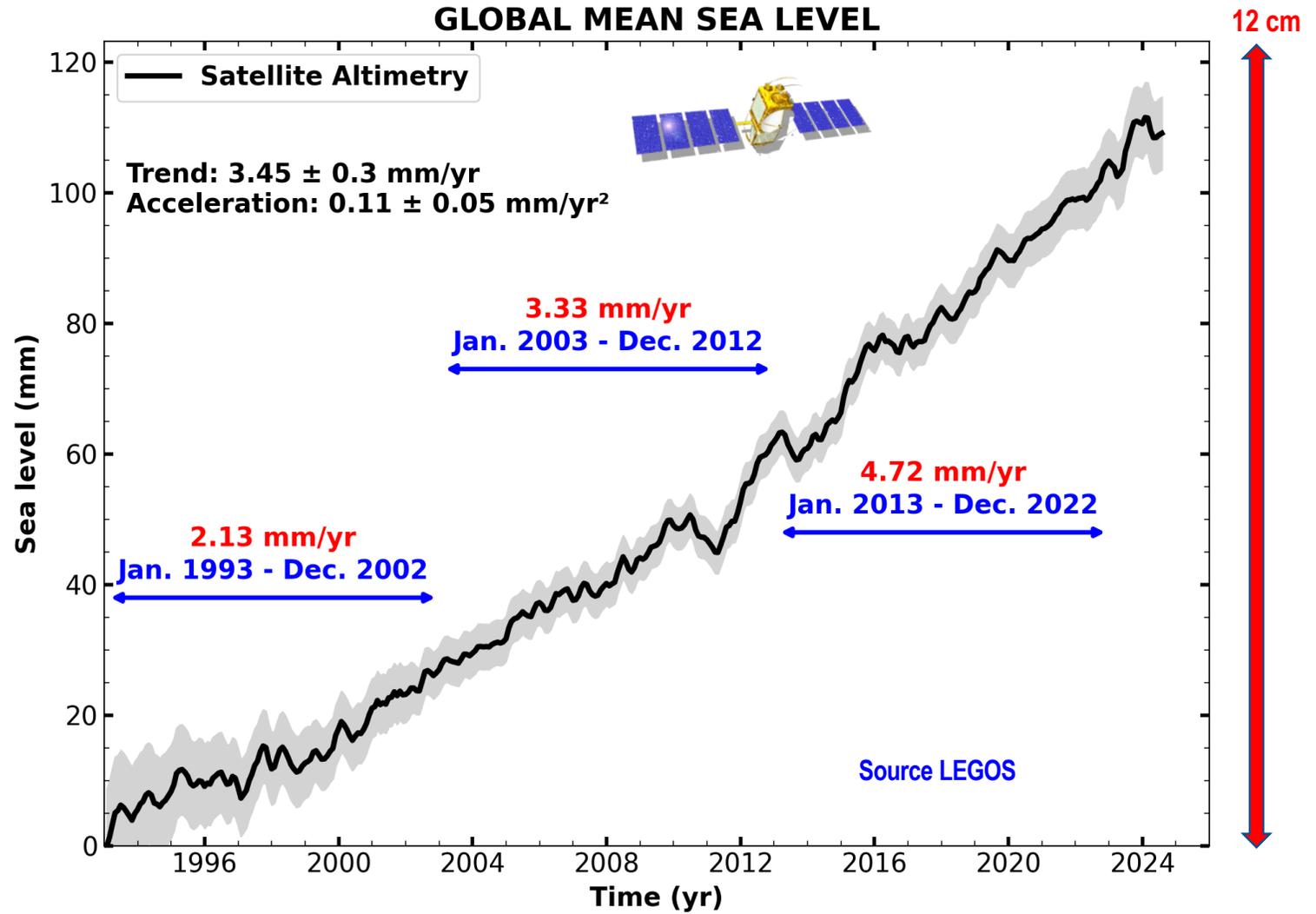
Cartographie 2D de l'océan structures > 100 km et > 10 jours



Suivi des grands lacs et fleuves

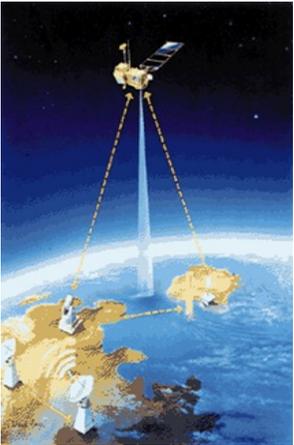


Hausse du niveau moyen des mers (du 1/1/1993 jusqu'au 13/7/2024)

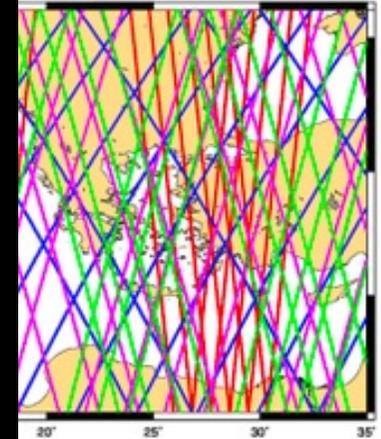
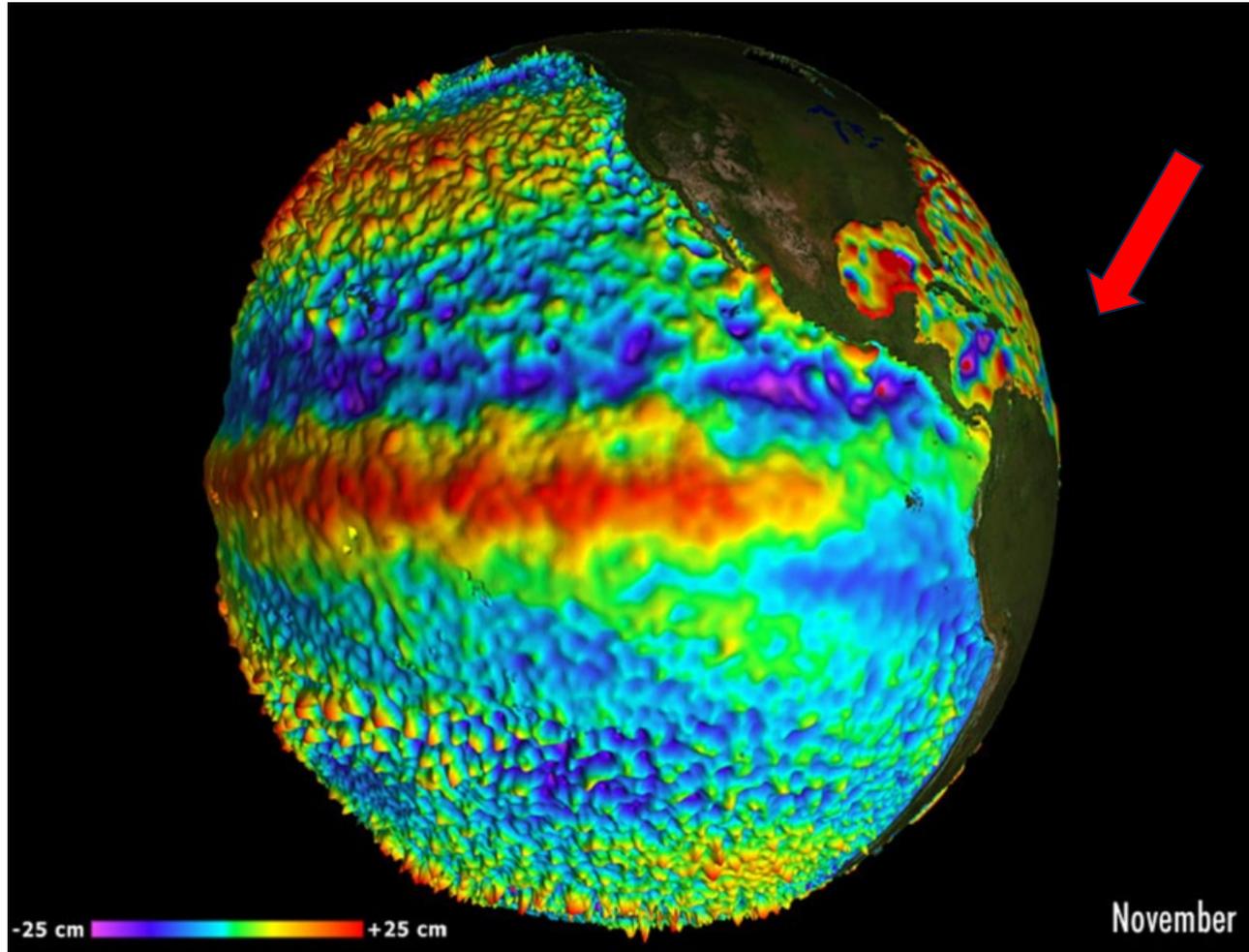


Altimétrie radar : applications

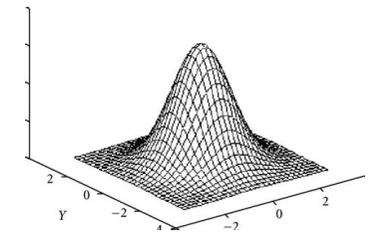
Mesure radar en 1D sous la trace du satellite



Couverture non-régulière de 4 missions altimétriques

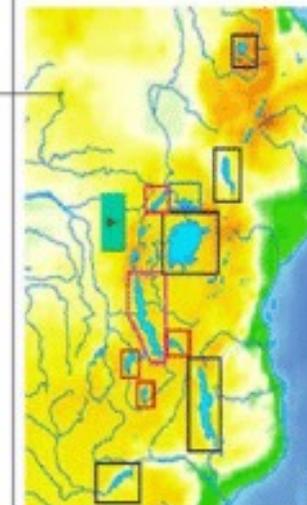
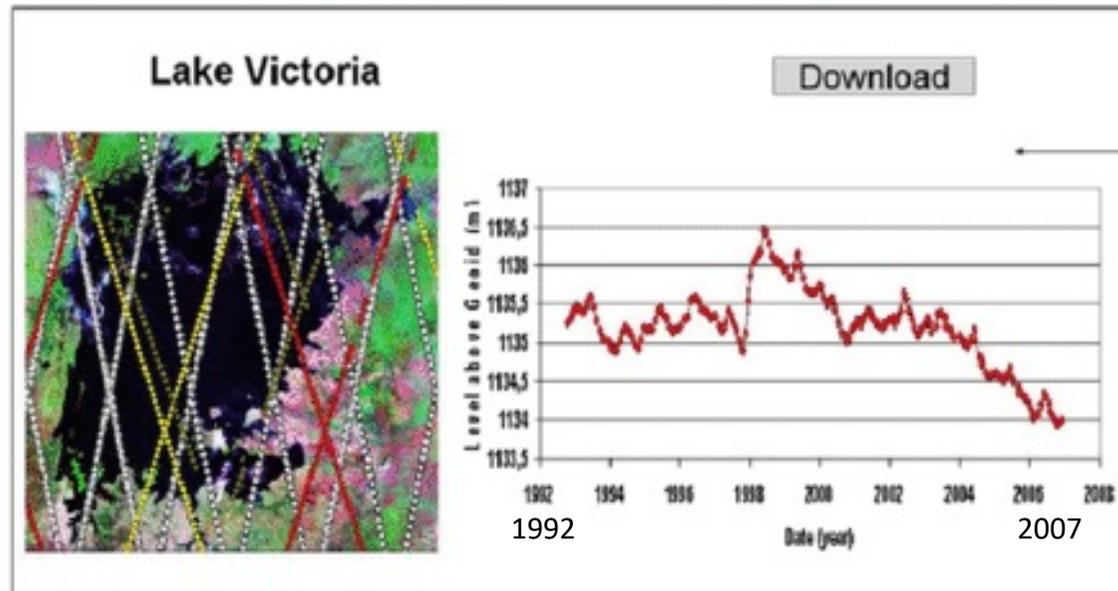
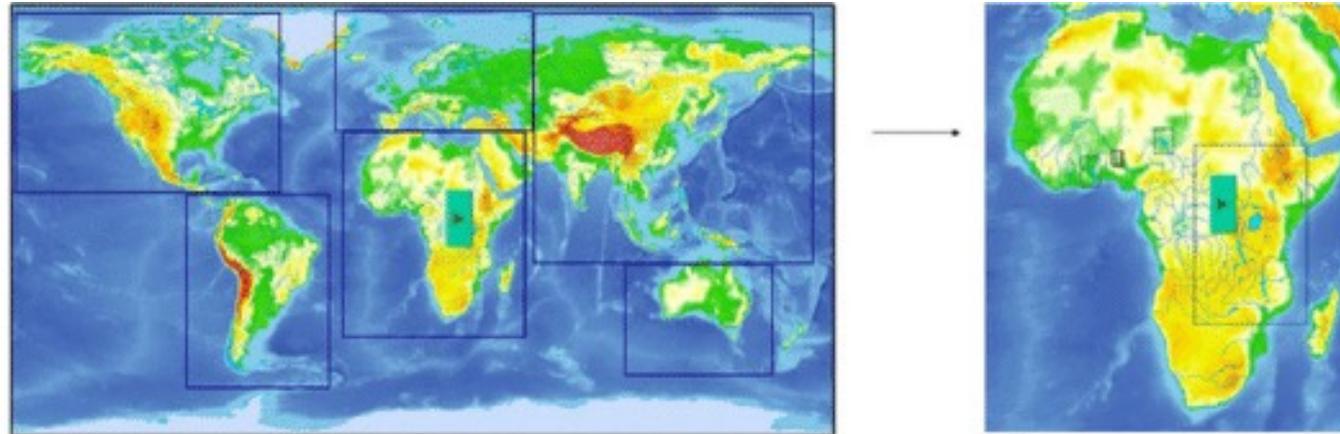


Cartographie 2D de l'océan dynamique > 100 km et > 15 jours

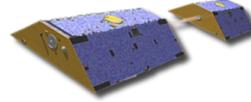
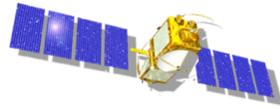


Altimétrie radar : applications

Mesure radar en 1D sous la trace du satellite



Suivi de
10,000 grands
lacs et fleuves
> 1 km largeur



Nouveau défi de SWOT :
Mesurer le niveau de la mer et des courants
de surface, et le niveau des lacs et des
rivières à très fine échelle
depuis l'espace

SWOT : MISSION NASA – CNES

+ soutien des Agences Spatiales UK & Canada

Une rupture technique et scientifique

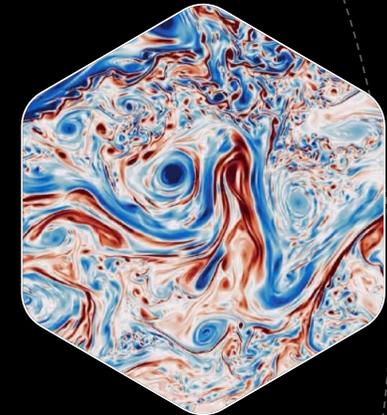
Lancé en décembre 2022

Objectifs scientifiques ambitieux

- Comprendre les mécanismes océaniques des petits tourbillons à méso-échelle, les couplages océan/atmosphère (enjeu climatique) et biologie/dynamique océanique
- Comprendre les processus hydrologiques pour déterminer les flux et les stocks d'eau sur les continents

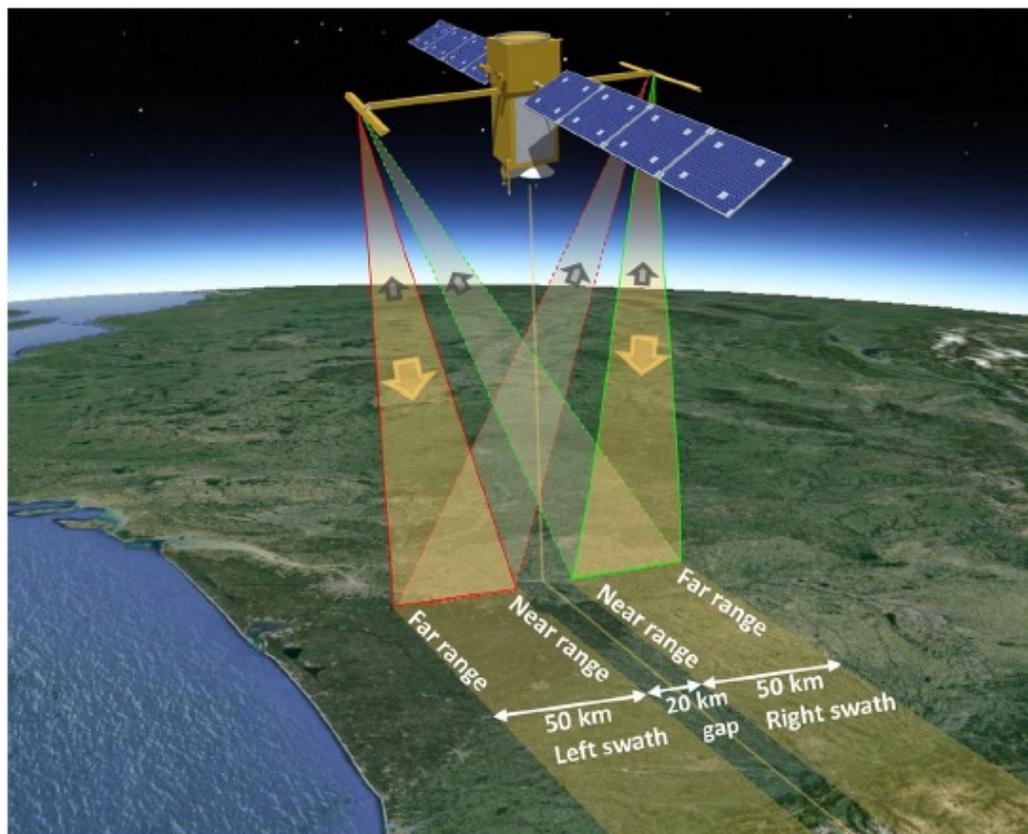
Pour des bénéfices sociaux importants

- Prédire notre environnement des prochains jours/semaines
- Prédire et gérer les événements extrêmes
- Comprendre et gérer nos besoins en eau et nourriture



Mission SWOT « Surface Waters-Ocean Topography » (lancé decembre 2022)

→ une révolution pour la gestion des eaux de surface et l'étude des océans et zones côtières



SWOT : 1er imageur SAR global utilisant la technique d'interférométrie

Observations du niveau de l'eau sur les océans & surfaces continentales

2 fauchées de 50 km de largeur

Resolution spatiale de 10-70 m

Entre 78N & 78S chaque 21 jours

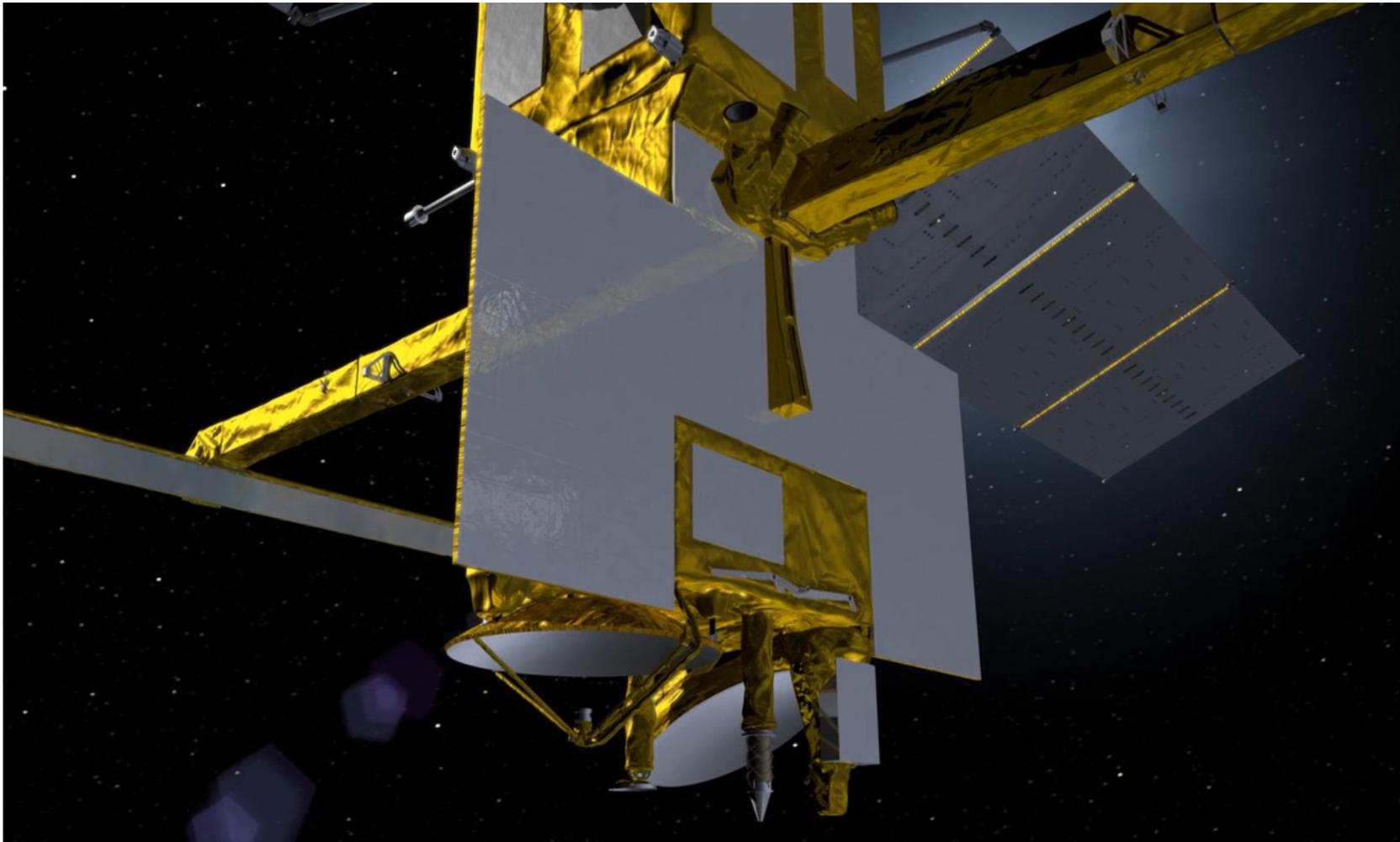
Données : Premier traitement interférométrique en temps réel à bord

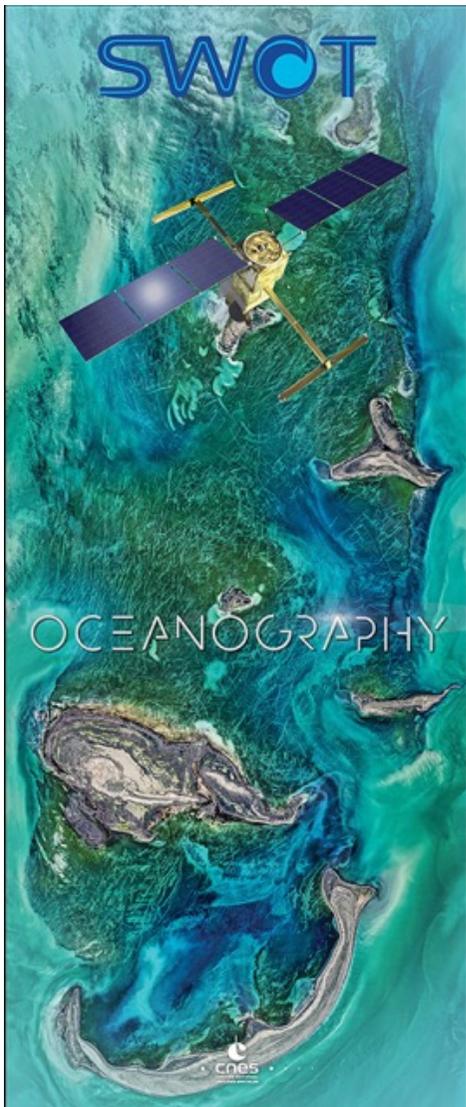
- 1 To de télémétrie par jour (5 stations terrestres)
- 20 To de produits par jour
 - Dont 15 To transférés par jour au JPL



Mission SWOT « Surface Waters-Ocean Topography » (lancé decembre 2022)

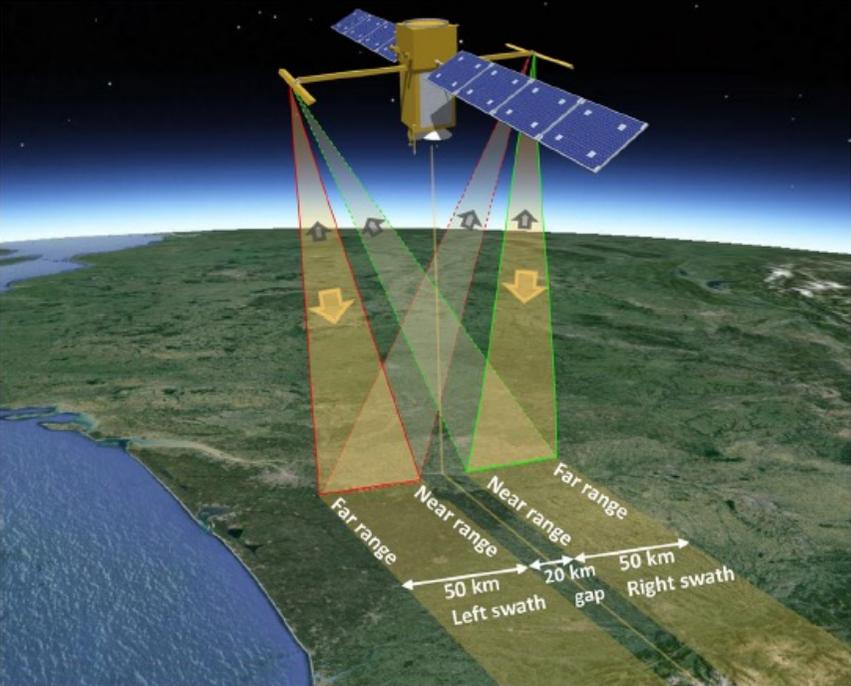
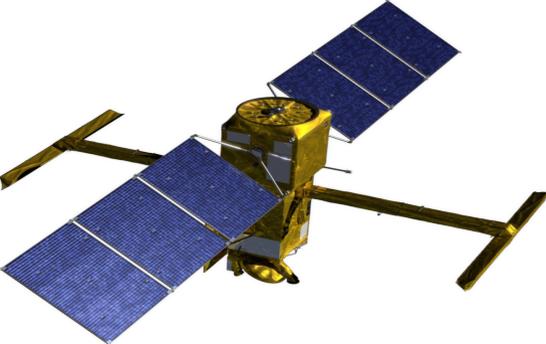
→ une révolution pour la gestion des eaux de surface et l'étude des océans et zones côtières



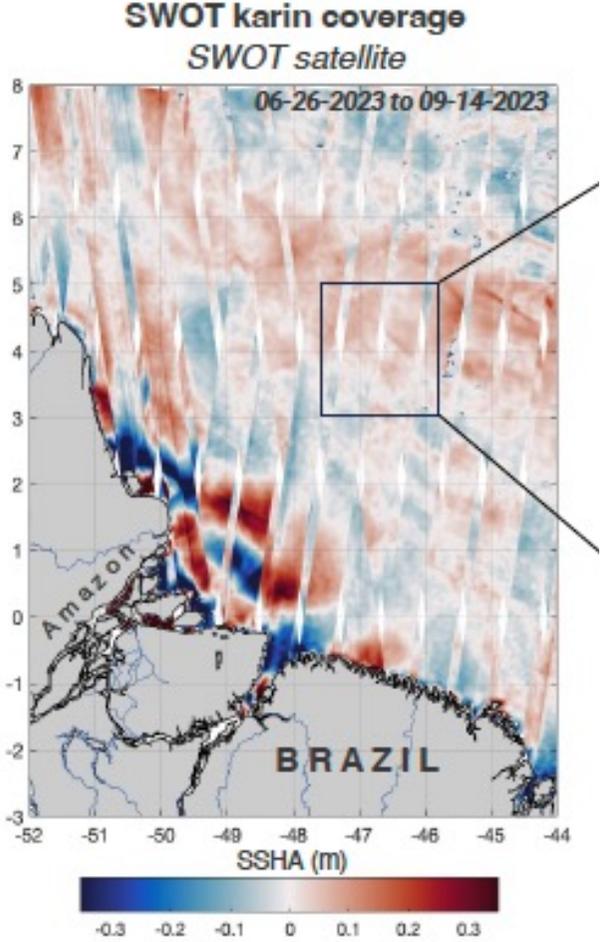
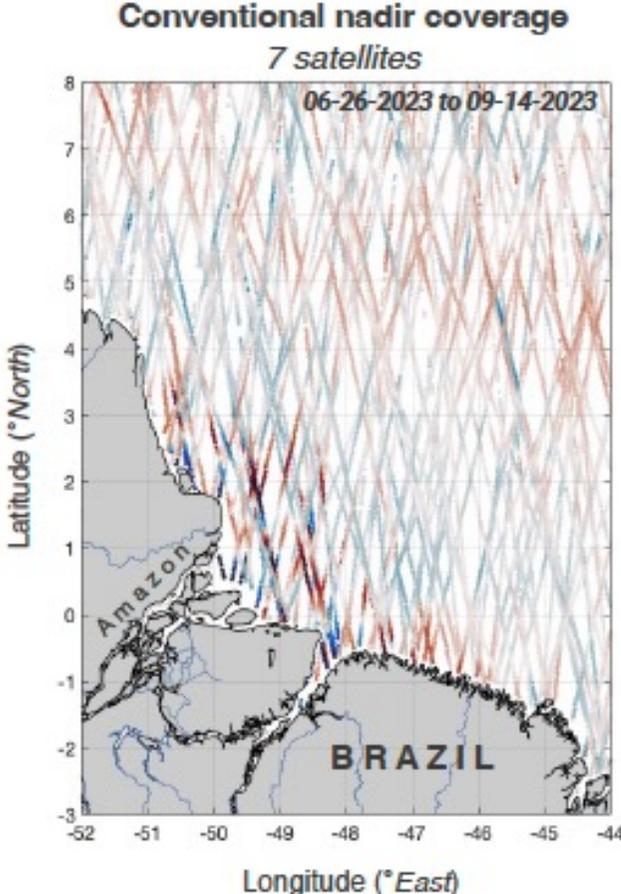


SWOT ET LES OCÉANS

SWOT « Surface Waters-Ocean Topography »



CNES / LEGOS



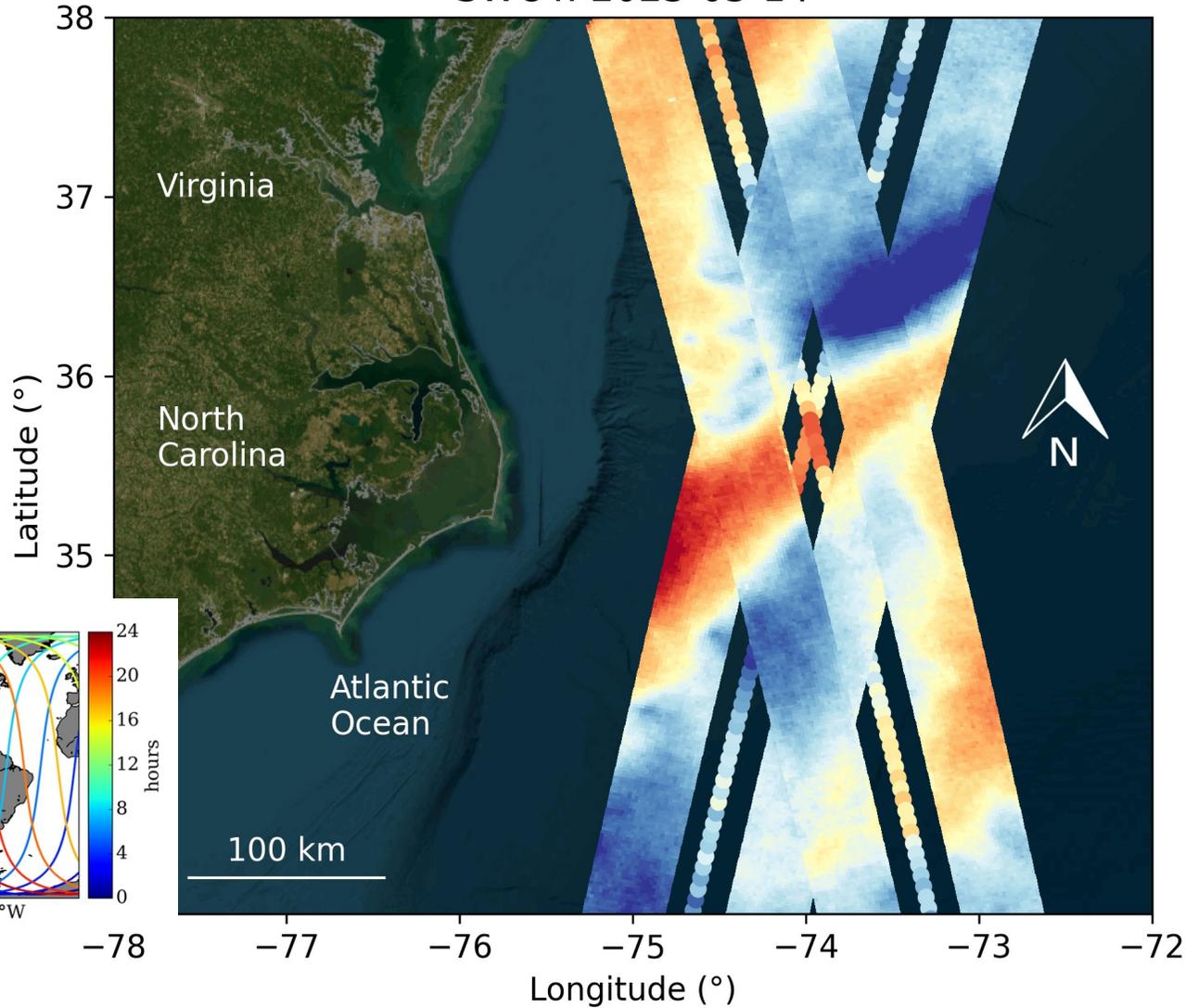
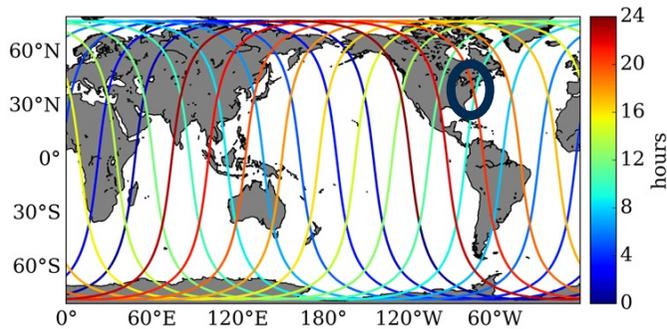
JPL-NASA

Premiers 3 mois de la mission : observations répétées chaque jour

SWOT: 2023-03-14



Traces au sol répétées
chaque jour



Credit : CNES266

SWOT : courants dits « géostrophiques » dépendent de la pente 2D de la topographie (Gulf Stream)



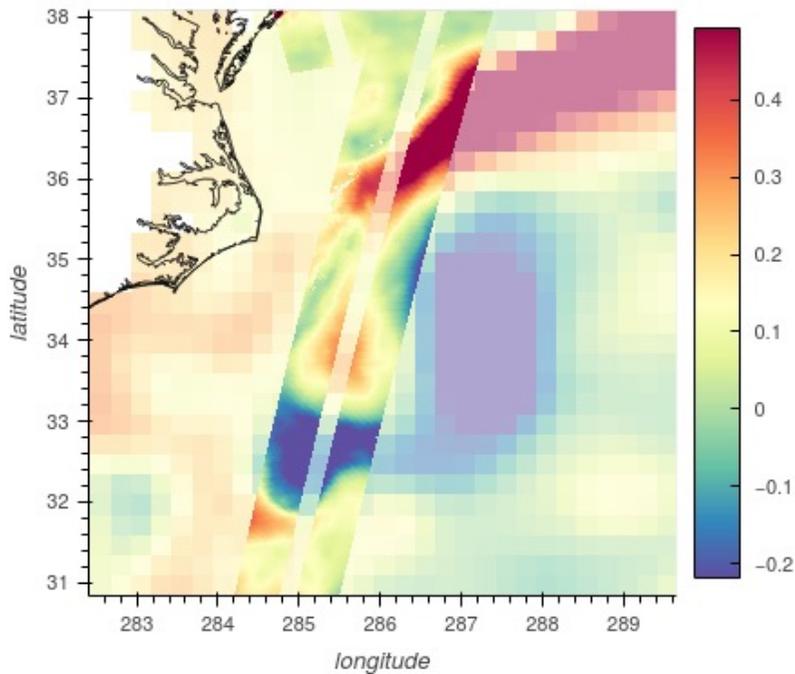
Augmenter la résolution

Altimétrie Copernicus : Pixel à 25 km, structures > 100 km

SWOT : Pixel à 2 km, structures > 10 km

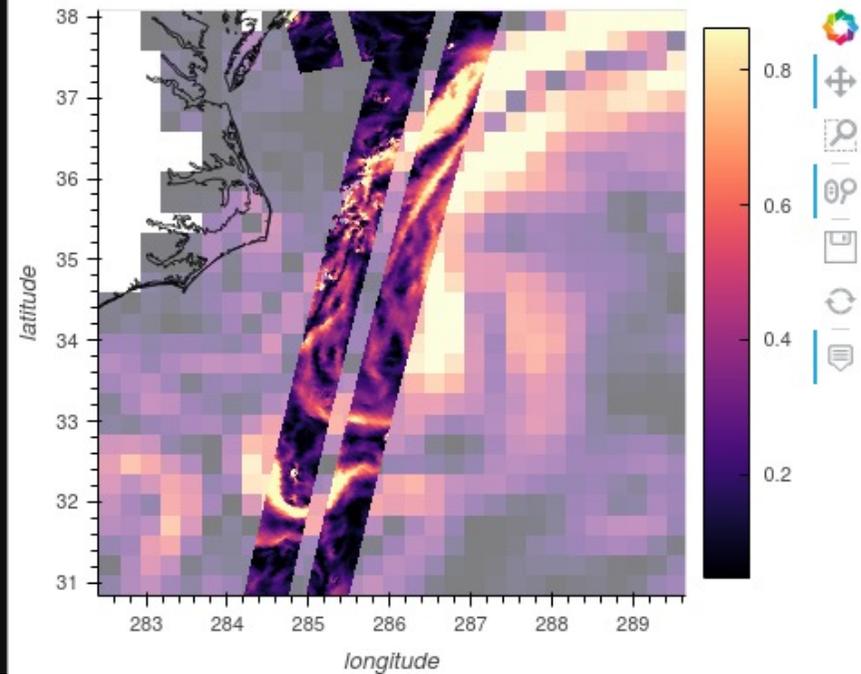
Topographie / niveau de la mer

Copernicus + SWOT



Courants Horizontaux

Copernicus + SWOT

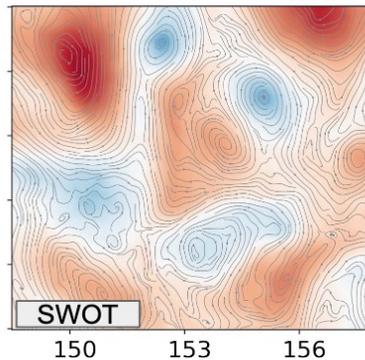
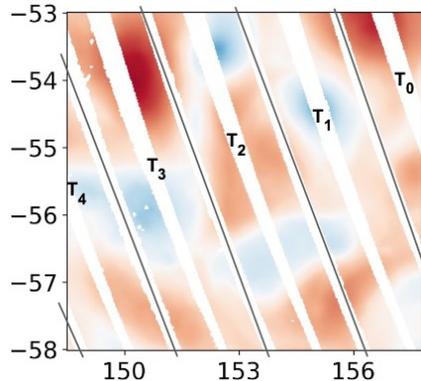


Gulf Stream : 1^{er} Juin 2023

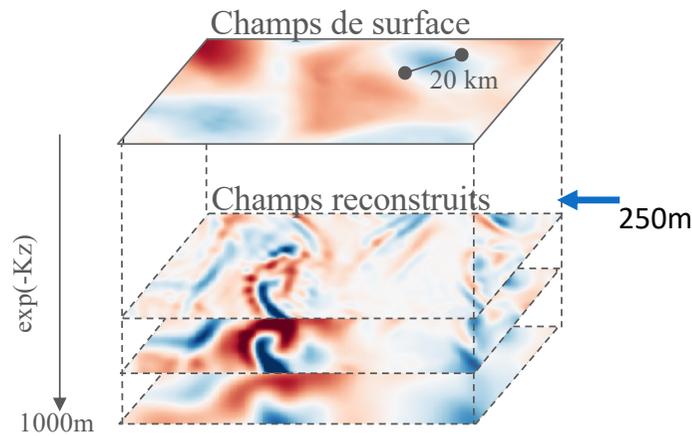
SWOT mesure 2D en surface : reconstruction de courants en profondeur

Credits : Elisa Carli (PhD @ LEGOS/CNES), CLS, F. Le Guillou (ESA)

Interpolation de traces sur une grille 2D régulière

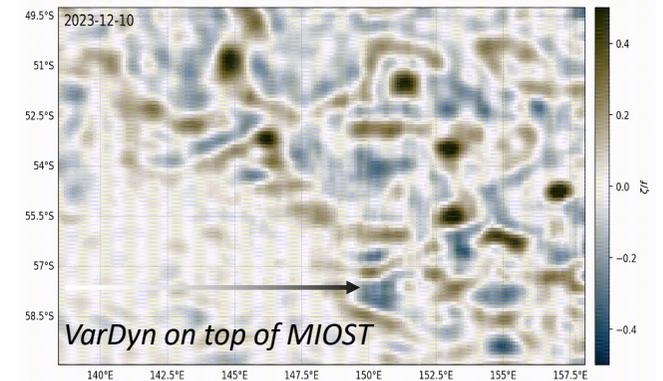


Reconstruction de champs de courants 3D en profondeur, à partir de la hauteur de la mer 2D de SWOT

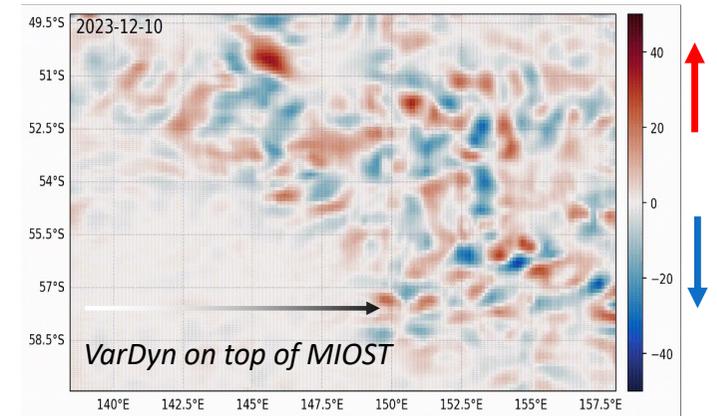


Effective Surface Quasi-Geostrophy (eSQG)

Courants horizontales @ 250m de profondeur



Courants verticales @ 250m de profondeur



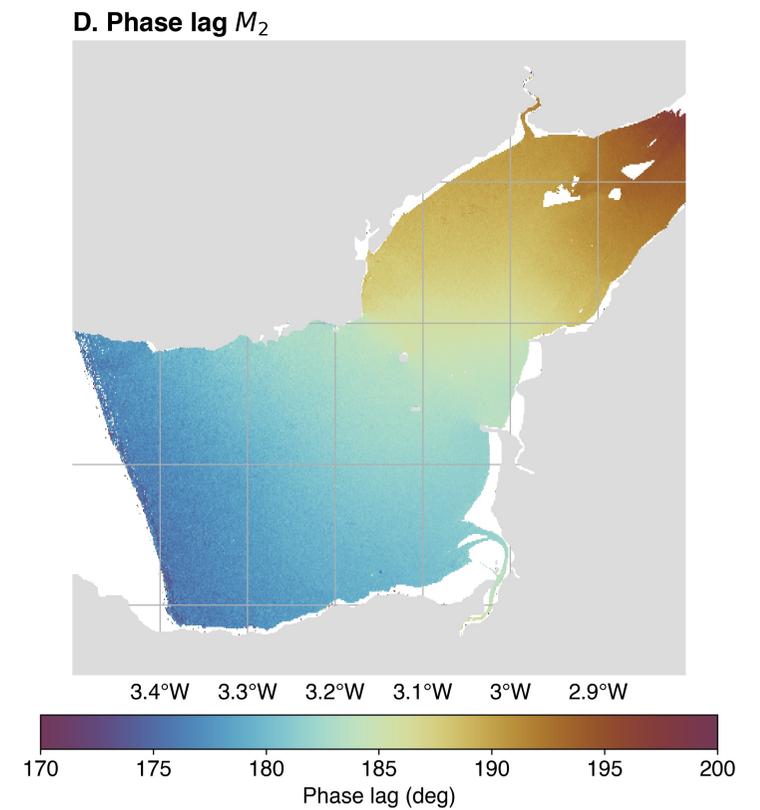
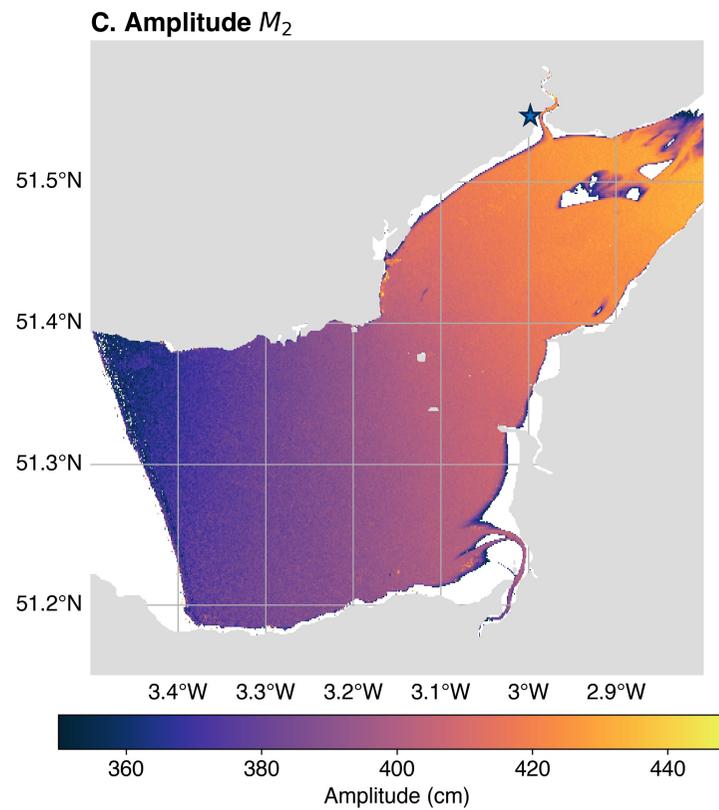
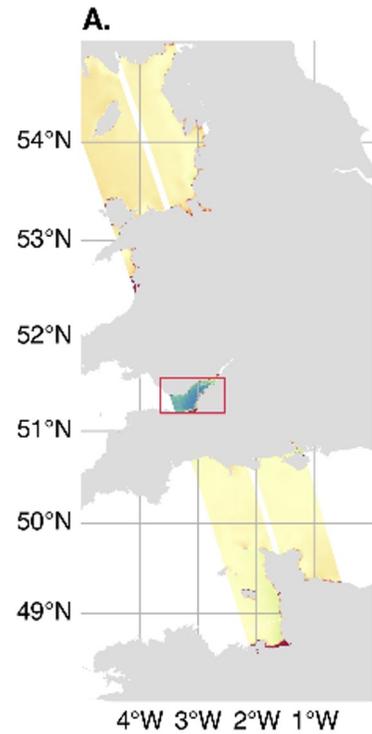
Courants verticaux qui apport la chaleur vers l'océan profonde ...

SWOT : amelioration de la marée : ici en zone côtière

Bristol Channel
(amplitude de 12 m!).

Un marégraphe chaque 250 m !
Les marées dans les rivières et estuaires !

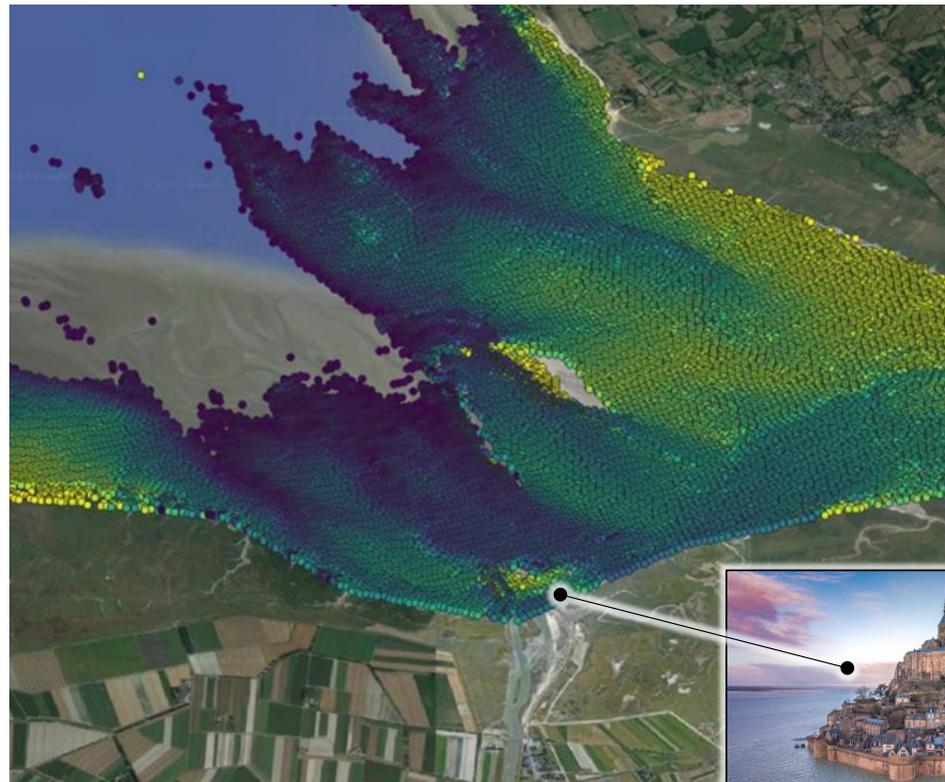
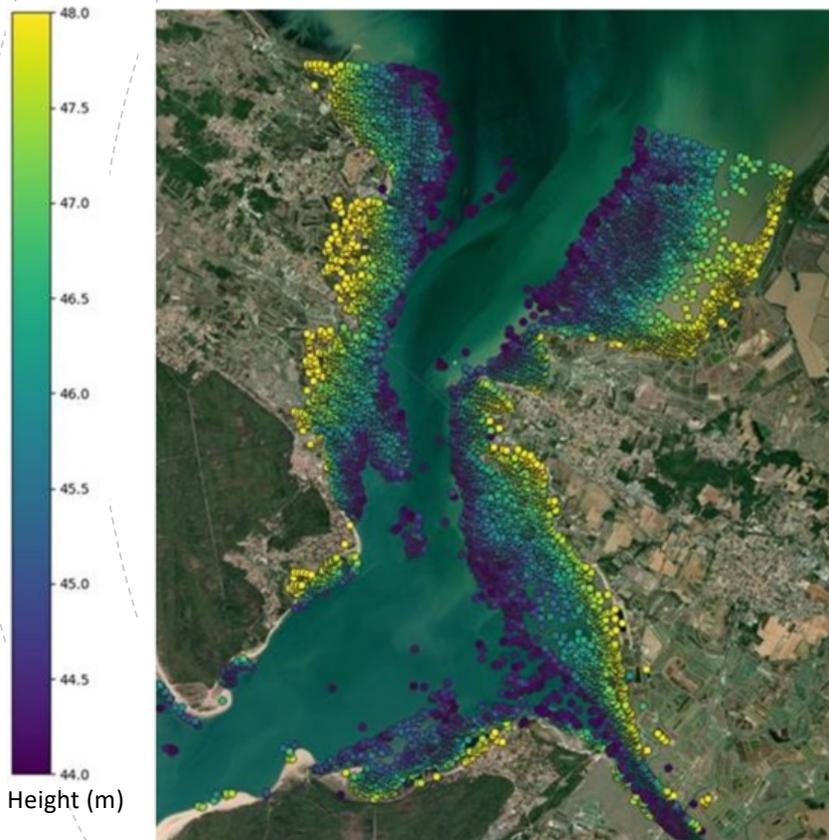
Amplitude & phase de
l'onde M_2 de la marée :



Hart-Davis et al., 2024

ESTIMATION DE LA BATHYMÉTRIE : ZONES COUVERTES PAR LA MARÉE

Example: Intertidal bathymetry in Moeze Oleron and Mont Saint-Michel Bay (France)

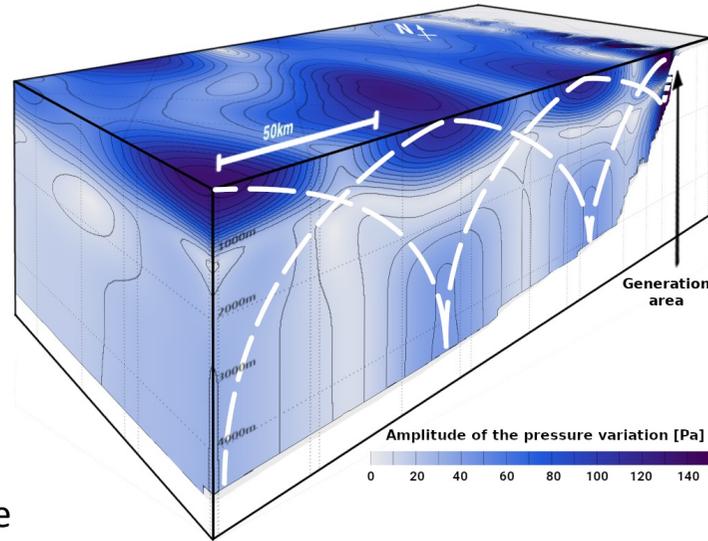
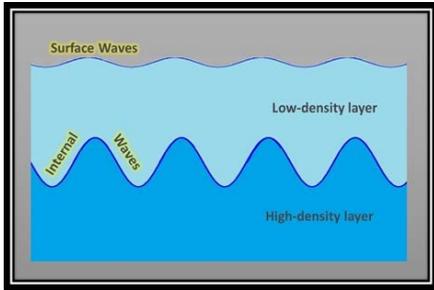


Credit :
E. Salameh &
D. Desroches



- Marée basse, sable mouillée

Marée en interaction avec la bathymétrie : génération de la marée interne



Pacifique Nord :
Propagation de la marée interne

Zhao19 eastbound component

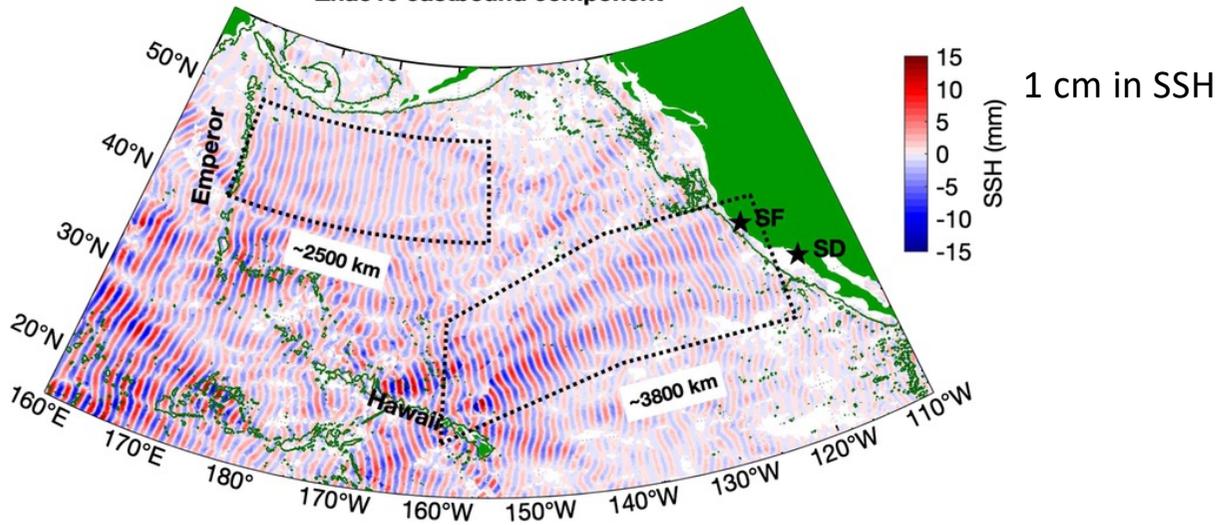
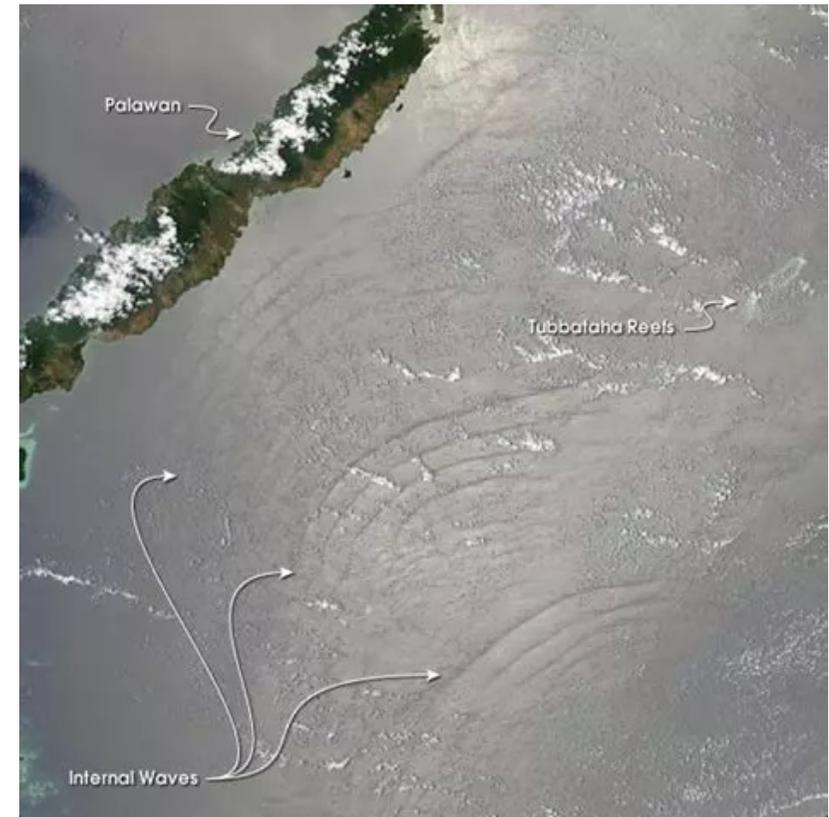


Image MODIS : ondes internes, mer de Sulu
Zone de divergence – sombre



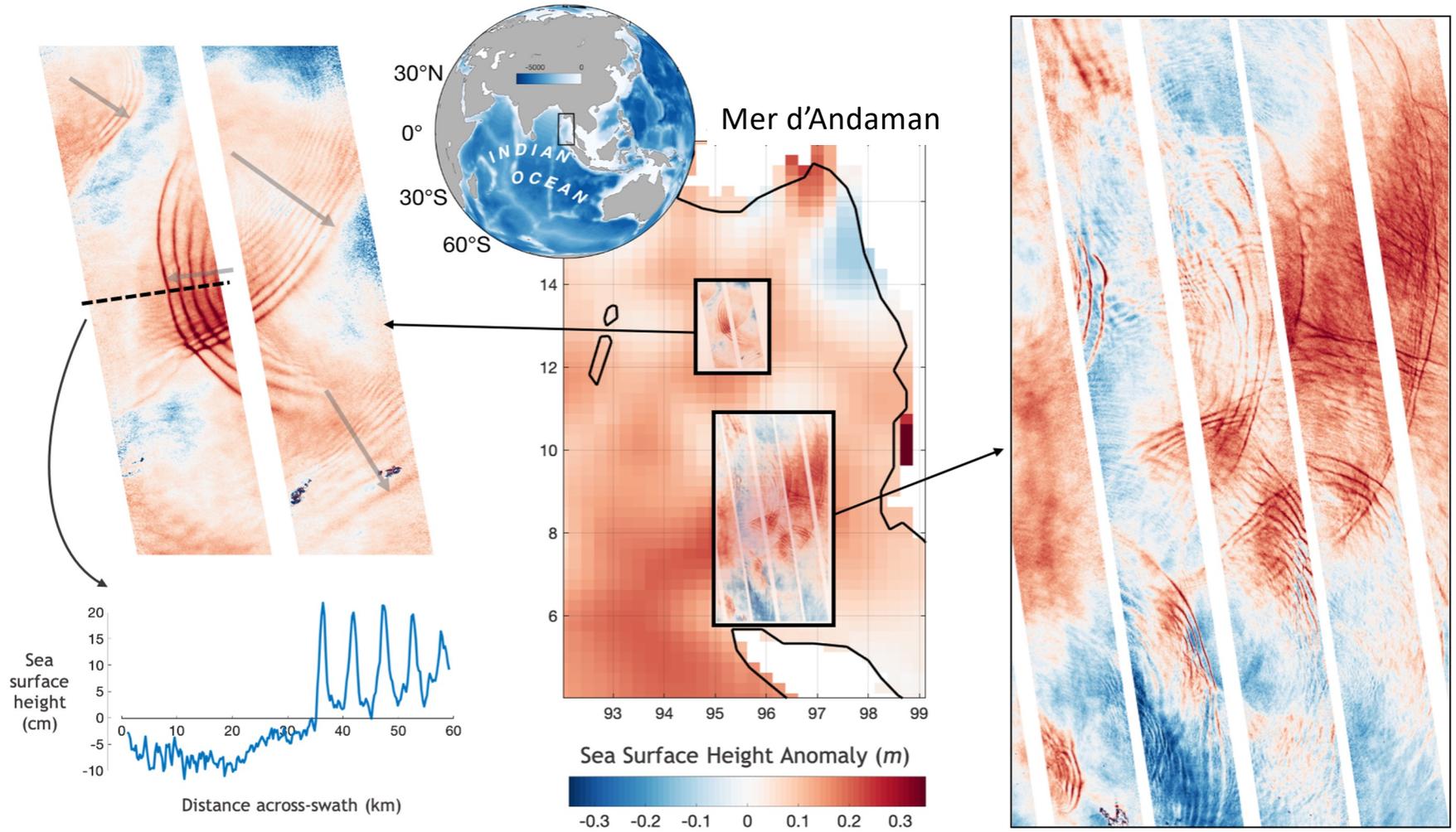
SWOT observe des ondes internes de la marée : solitons



Avant SWOT :
moyenné sur 10
km, amplitude
de 2-3 cm

SWOT :
amplitude de
20 cm!

Important pour
transfert
d'énergie et le
mélange



Courtesy Matt Archer

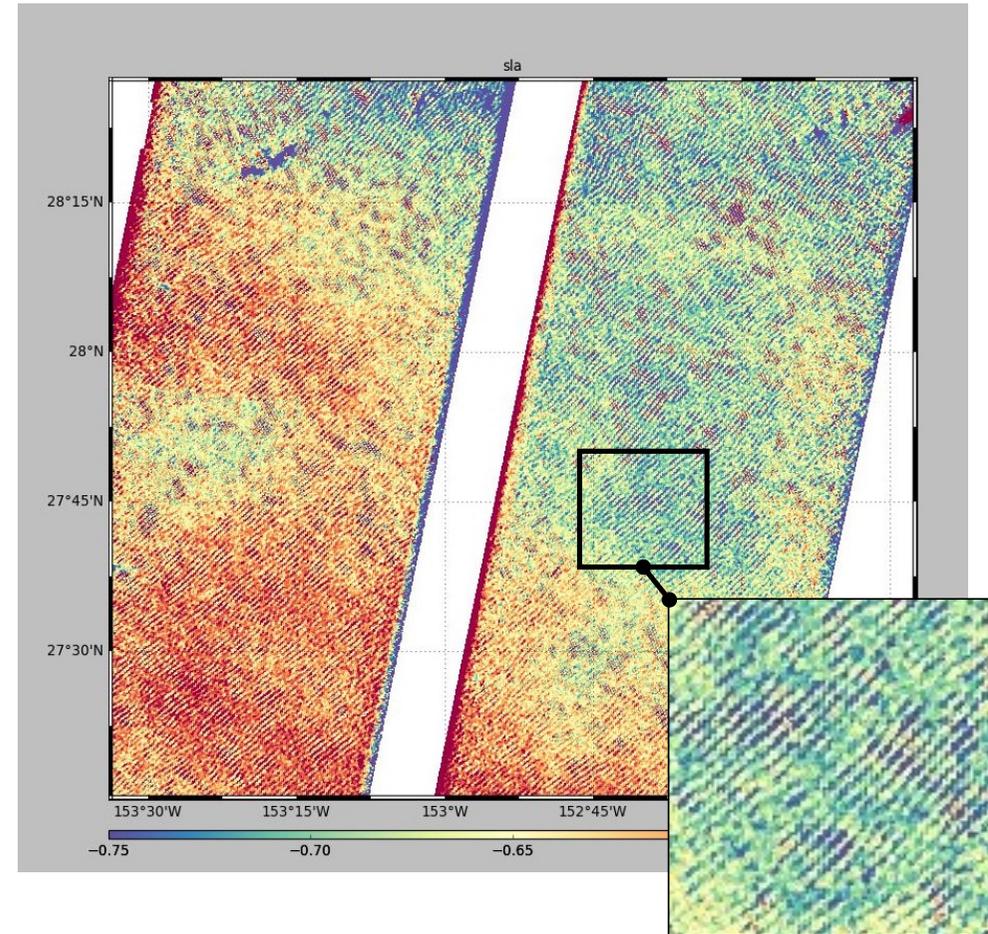
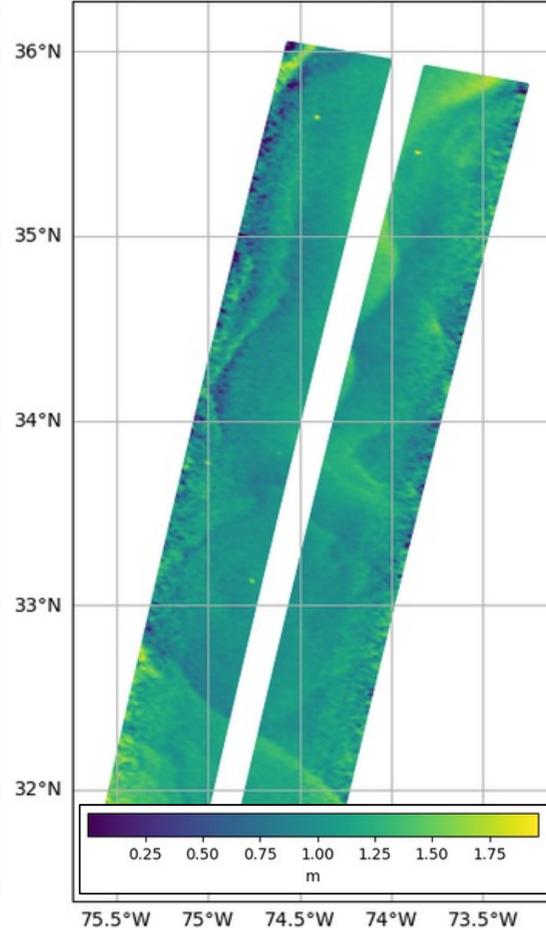
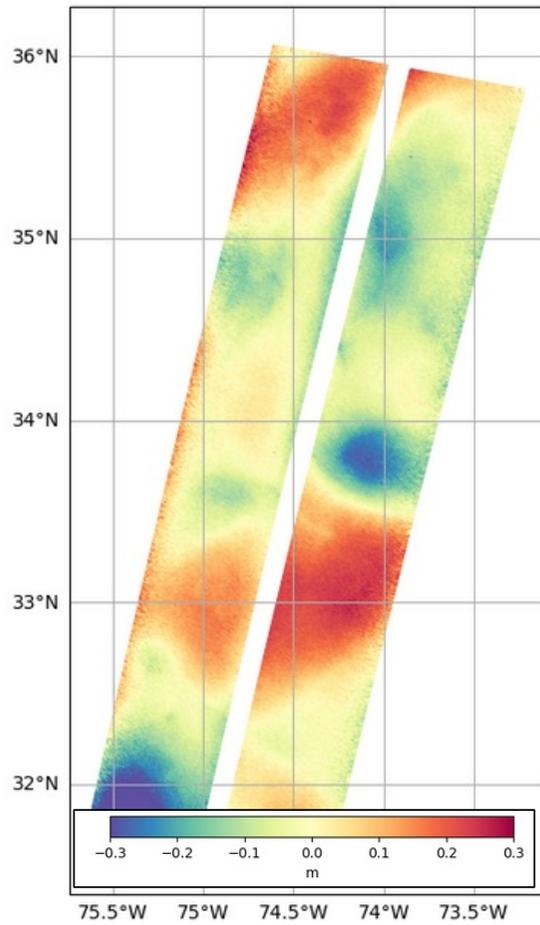
SWOT : les observations conjointes des courants, vagues et de la houle chaque 2 km



SWOT Hauteur de la mer

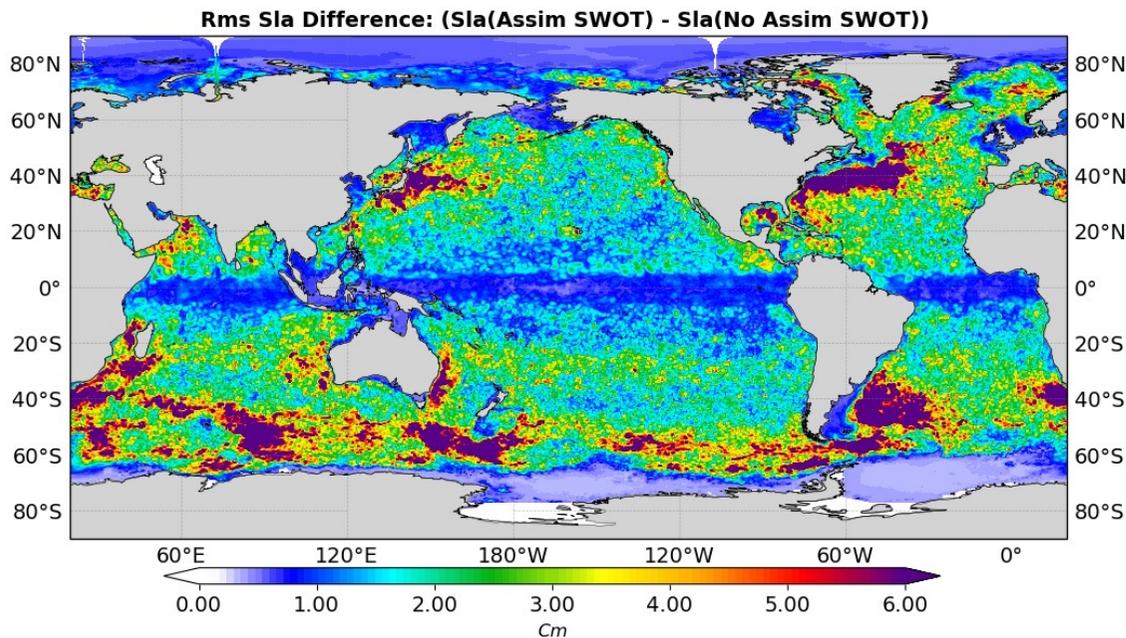
SWOT hauteur de vagues

SWOT hauteur de la houle



Utilisation SWOT – océanographie opérationnelle Score (Prévision)

SLA Erreur : SLA (avec SWOT) – SLA (sans SWOT), Sep/Oct/Nov 2023



Erreur de Model par apport de données non-assimilées Saral/Altika

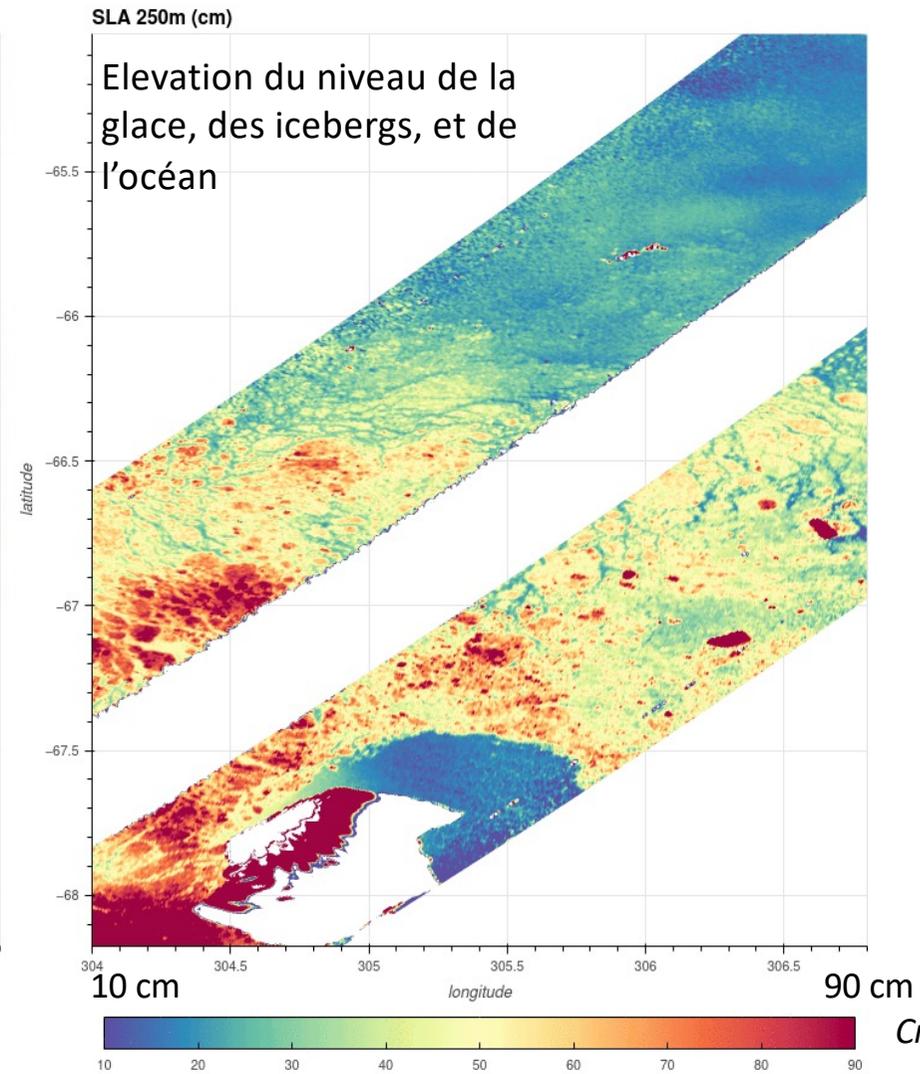
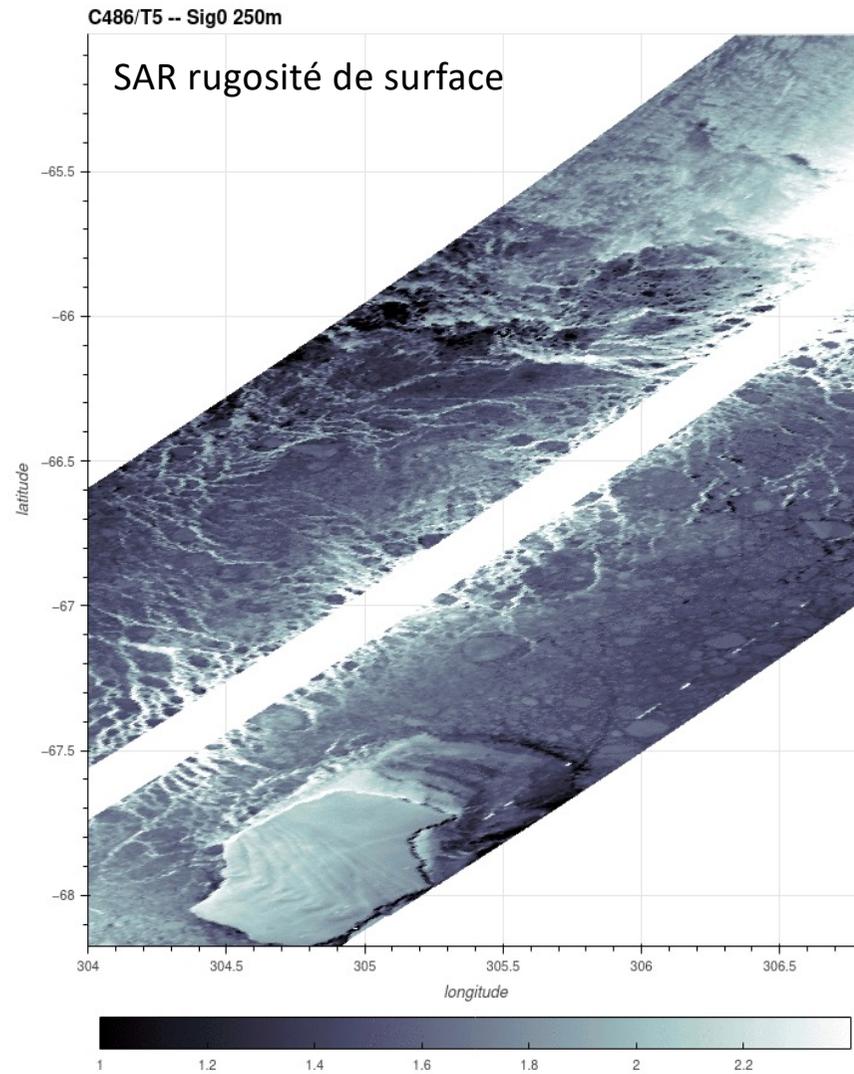
	Open Ocean		Coastal region	
	Analyse	Prévision	Analyse	Prévision
Faible variabilité	15.1%	12.9%	13.4%	10.5%
Haute variabilité	14.5%	10.6%	14.0%	10.8%

Amélioration avec SWOT

Avec SWOT: plus de structures à petite méso-échelle partout, impact positif dans toutes les régions

M. Benkiran, MOi

1^{ères} Observations Glace de mer : colocation image radar & élévation



SWOT



HYDROLOGY



SWOT POUR L'HYDROLOGIE



SWOT Measurement Capabilities for Rivers

Elevation: 36.06 m

Les altimètres conventionnels au nadir mesurent l'élévation de la surface de l'eau dans environ 10 000 rivières à partir de stations virtuelles.

SWOT mesure l'élévation de la surface de l'eau en continu de plus de **200 000 rivières dans le monde**, ainsi que leur étendue. La pente peut être extraite pour dériver le débit de rivières.

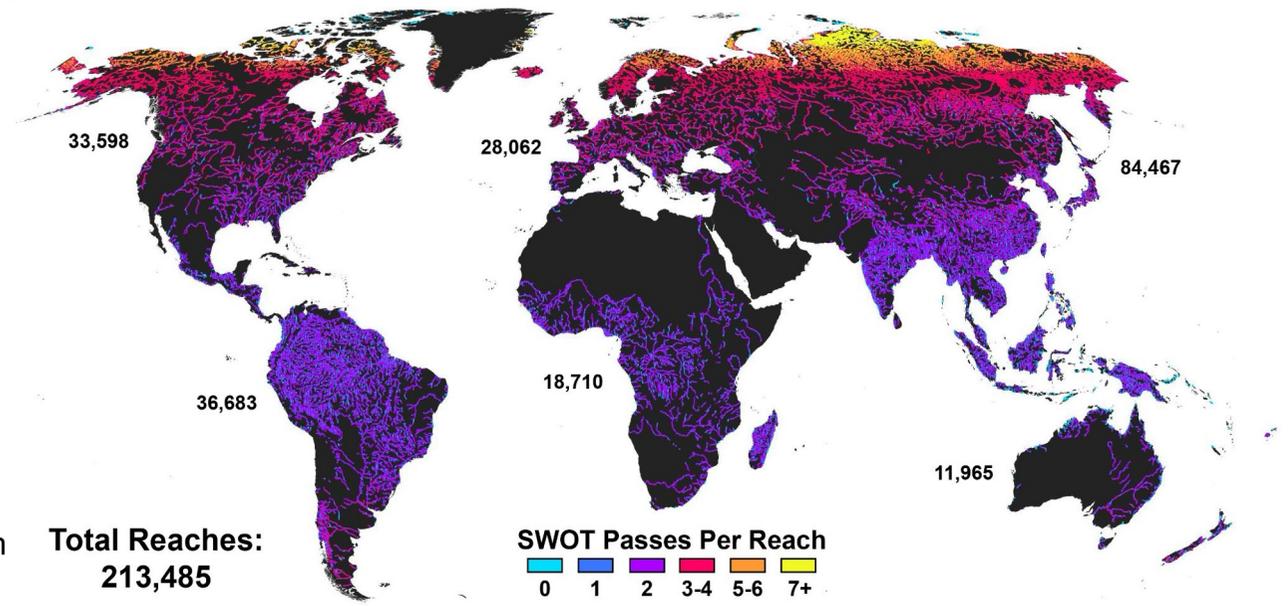
50 Kilometers

Elevation: 16.21 m



Rivière Sacramento, Californie

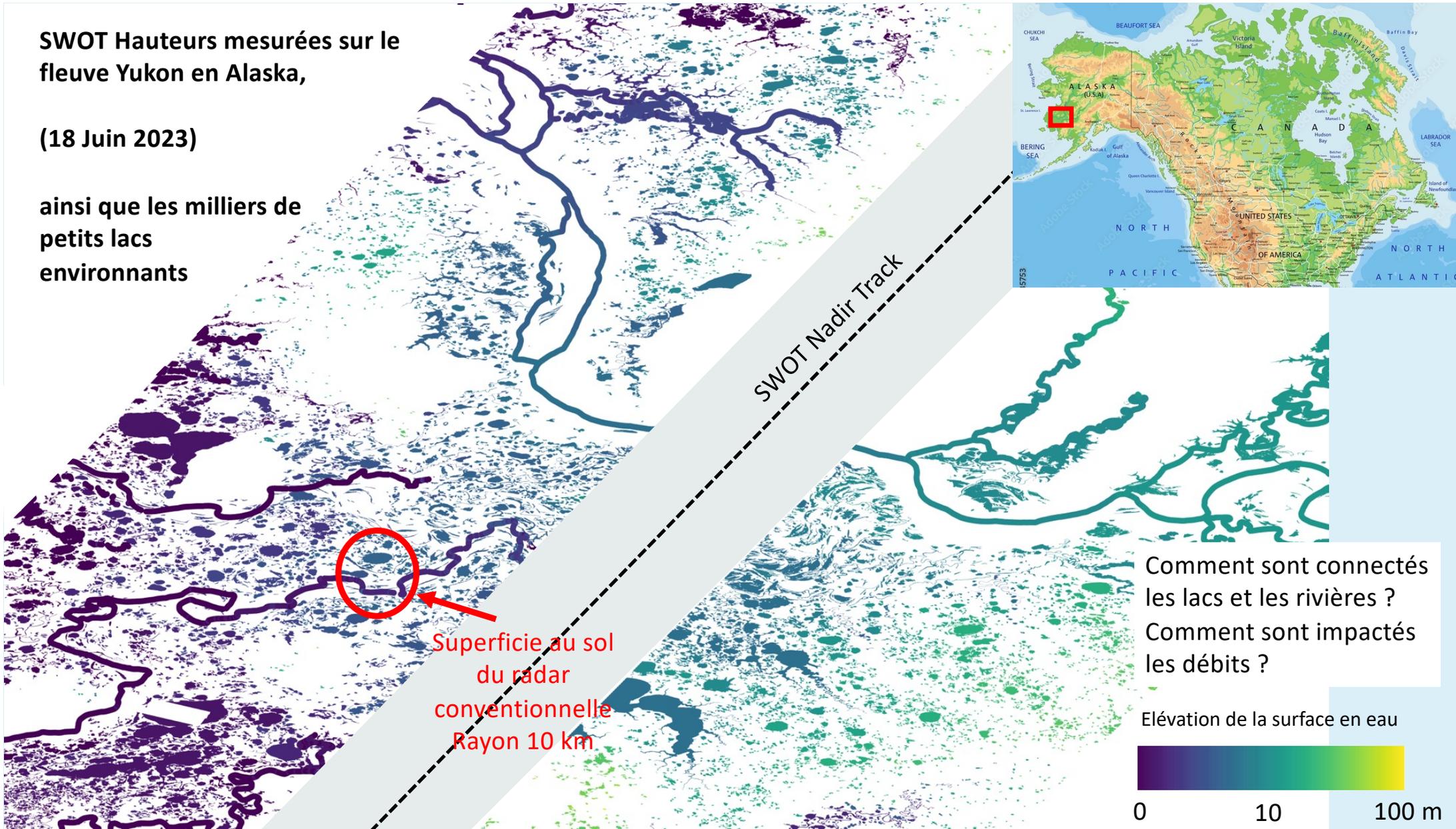
SWOT produit de rivières



**SWOT Hauteurs mesurées sur le
fleuve Yukon en Alaska,**

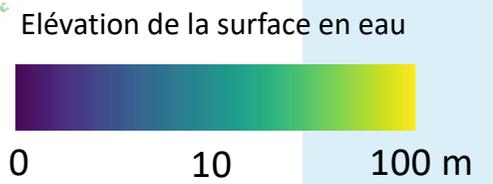
(18 Juin 2023)

**ainsi que les milliers de
petits lacs
environnants**

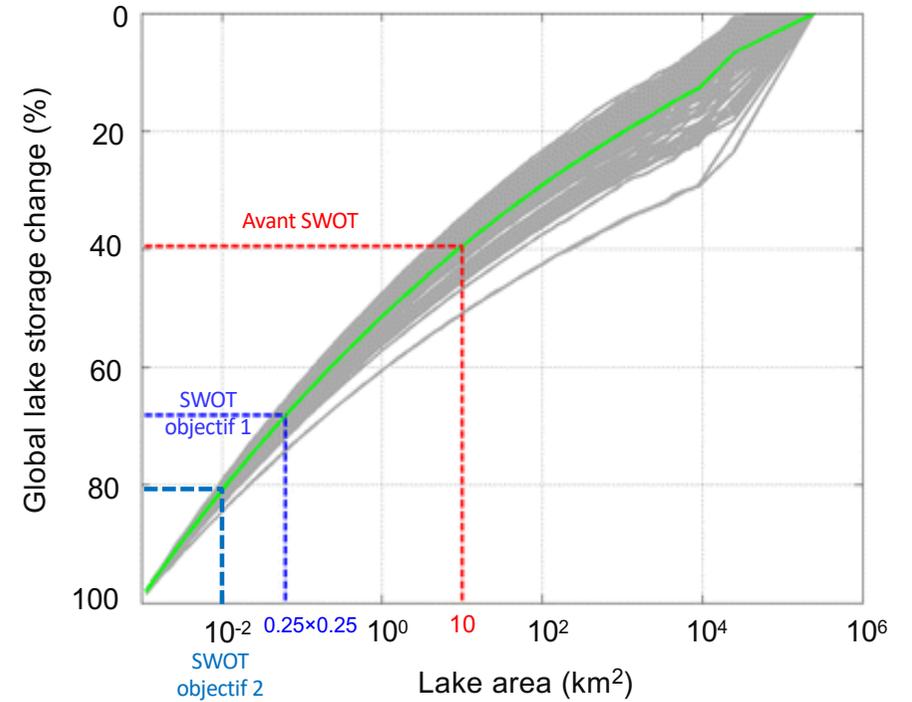
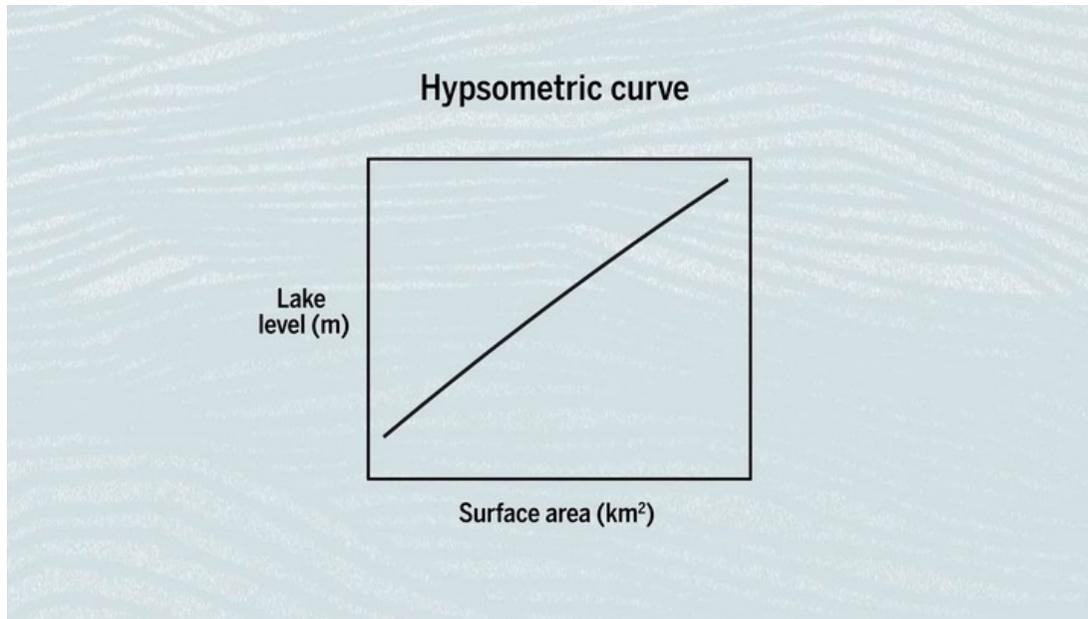
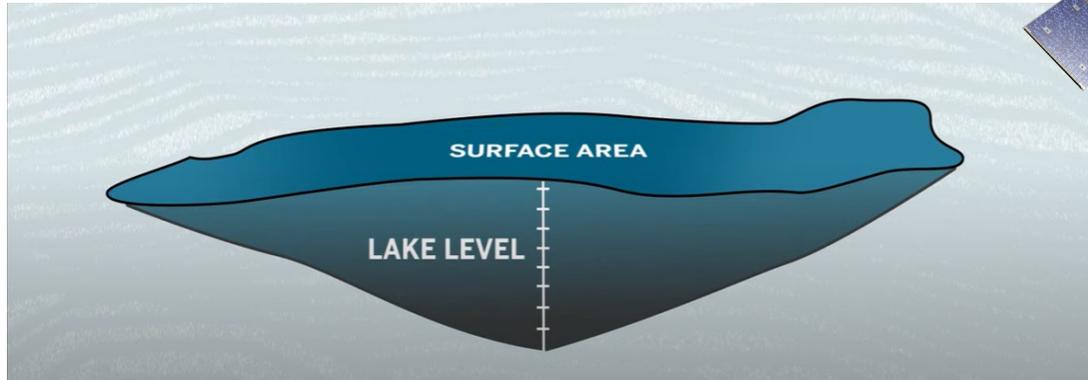


Superficie au sol
du radar
conventionnelle
Rayon 10 km

Comment sont connectés
les lacs et les rivières ?
Comment sont impactés
les débits ?

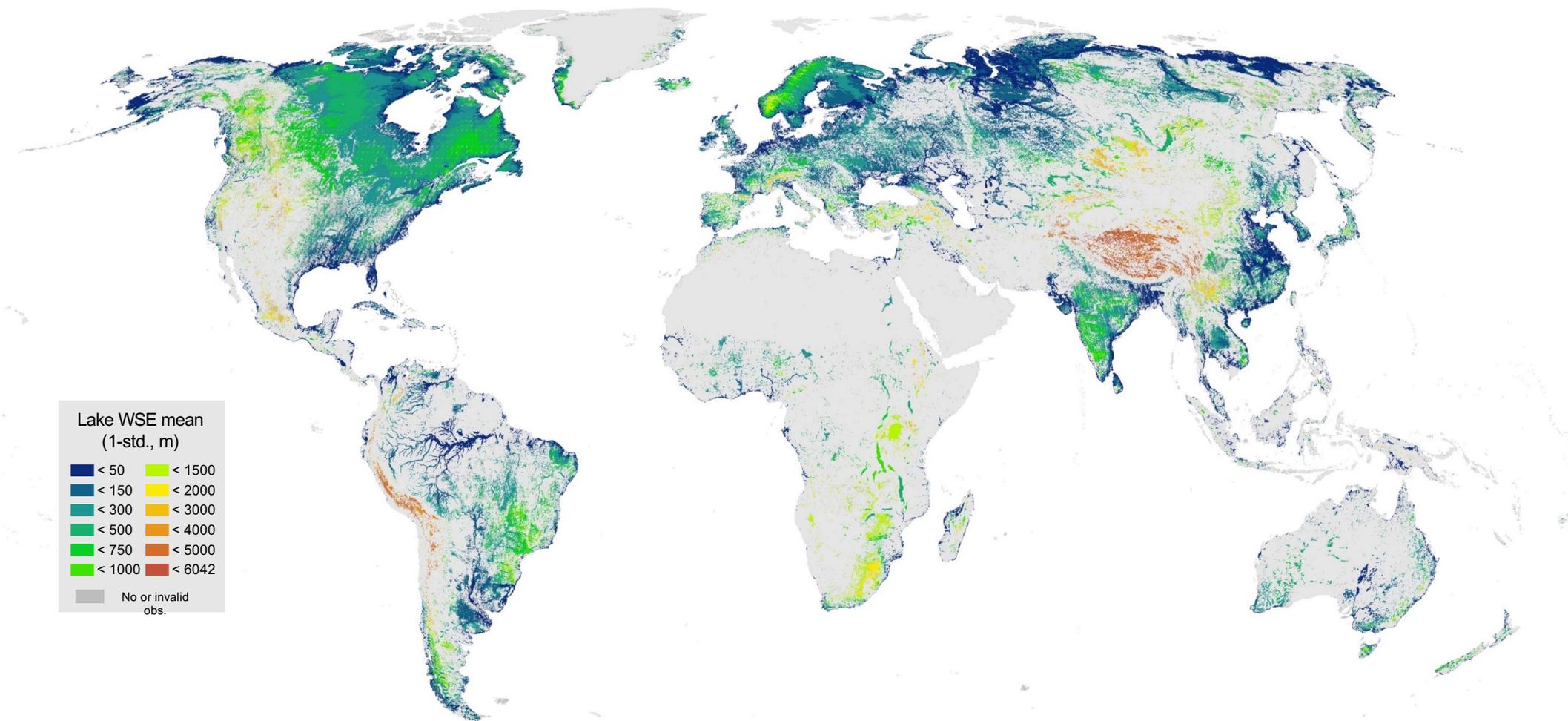


Passer de la hauteur à un volume de lac



- **> 6.25 ha ou (250 m × 250 m):** on s'attend à estimer jusqu'à **65% des changements** de volume des lacs
- **> 1 ha or (100 m × 100 m) area:** on s'attend à estimer jusqu'à **80% des changements** de volume des lacs

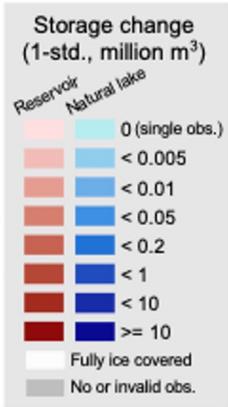
Élévation de surface moyenne telle que mesurée par SWOT sur tous les lacs entre Janvier et Mai 2024



En 4 mois, 2,872,216 lacs > 1 Ha ont été observés avec SWOT, sur les 5,9 million de lacs dans la base à priori, **89% de la superficie des lacs globaux**

Variations de stockage mesurées par SWOT sur tous les lacs entre Janvier et Mai 2024

Reservoirs
Lacs naturels



As early estimates, lake water storage variation is estimated by SWOT-measured WSE variation multiplied by the static prior lake area.

More accurate, realistic results will become available with the accumulation of SWOT data.



Les réservoirs représentent moins de 10 % du nombre de lacs mondiaux, mais leurs variations saisonnières de stockage sont 56 % plus importantes, en raison de la gestion humaine.

SWOT : observations précieuses des inondations

En 2022 , Plus de 57 millions de personnes touchées par ces phénomènes climatiques, engendrant plus de 75 milliards d'euros de dégâts.

Inondations Saint Omer :

Plusieurs facteurs sont conjugués :

- le relief,
- des pluies abondantes et répétées
- Des sols saturés
- L'eau dirigée vers des canaux et rivières proches de leur embouchure,
- Impact des marées et des variations du niveau de la mer.

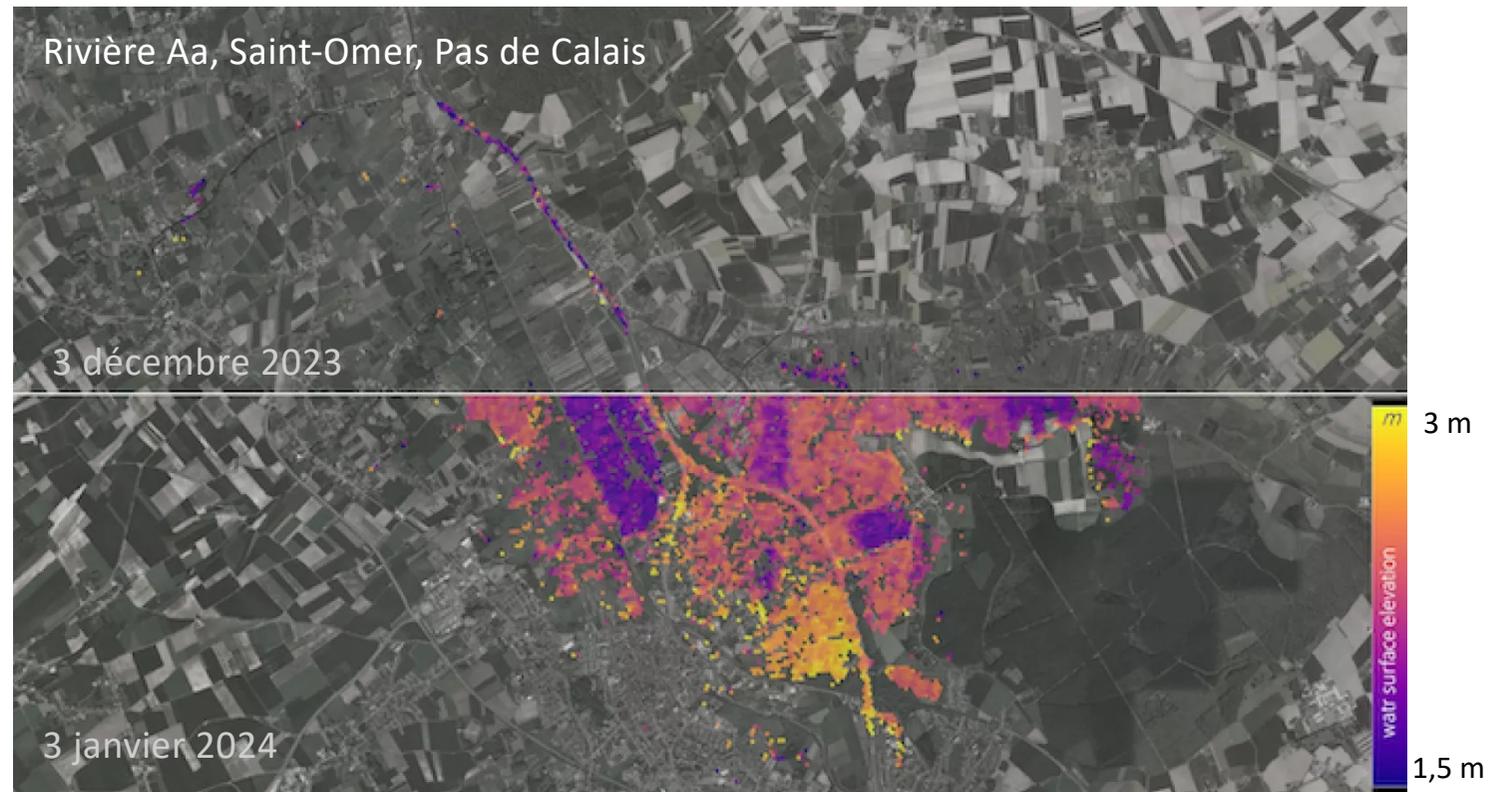


Image recomposée à partir de deux acquisitions du satellite SWOT à un mois d'intervalle au-dessus de la ville de Saint-Omer © CNES, 2024



VALIDATION IN-SITU
CAMPAGNES DE MER ET DE TERRAIN

Validation in-situ & aéroportée Internationale en 2023 (Campagnes de mer, validation des lacs et rivières ...)



SWOT – l'aventure d'une équipe, d'une grande famille

La clé du succès :

Ingénieurs, scientifiques et équipes d'applications travaillent ensemble depuis plus de 15 ans



SWOT Science Team 1st results Meeting, Toulouse 2023



GO SWOT!

SWOT est l'héritier de décennies de collaboration

1ère mission dédiée à l'océano + hydro à fine échelle, avec des enjeux considérables

Premiers résultats au-delà de nos attentes sur la précision des mesures instrumentales et la résolution spatiale

Océanographie :

- Premiers résultats éblouissants
- Richesse des observations variées
- Travail en cours pour leurs interactions < 100 km

Hydrologie :

- Nouveau signal à apprivoiser qui ouvre le champ des possibles
- Enjeux mondiaux très forts sur la gestion de nos ressources en eau

De **nouveaux domaines de recherche et d'application** : le côtier, la géodésie marine, la cryosphère, etc.

