



Conférence du Bureau des Longitudes
L'altimétrie satellitaire actuelle et à venir
Juliette Lambin, CNES

Sommaire

- ❖ Les océans et l'espace
- ❖ Le niveau de la mer n'est pas zéro...
- ❖ Applications et résultats scientifiques
- ❖ L'altimétrie du futur



L'océan en quelques chiffres

Atlantique



ne

Arctique



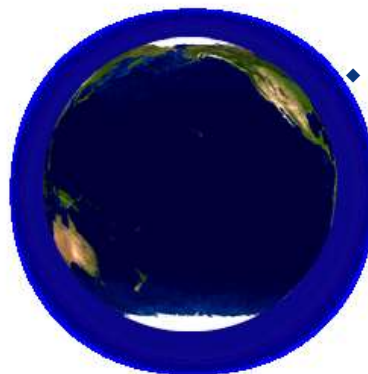
Pèse 300 fois plus lourd que
l'atmosphère

Les 3 premiers mètres stockent
autant de chaleur que toute
l'atmosphère



ndien





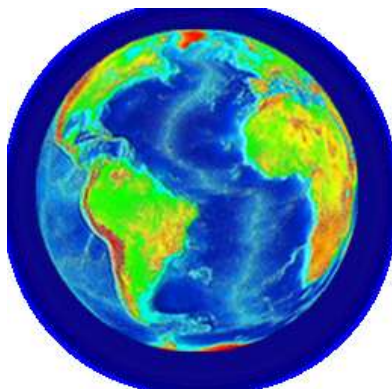
■ Rôle régulateur de l'océan:

- ♦ Emmagazine, transporte et redistribue la chaleur
- ♦ Participe au stockage du carbone
- ♦ Dynamique plus lente que l'atmosphère

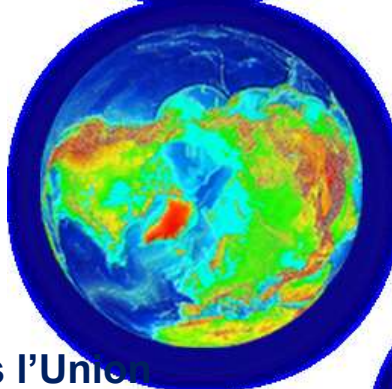
Notre climat
par l'interac
océan - atm

- Plus de 50% de la population mondiale vit à moins de 100 km des côtes

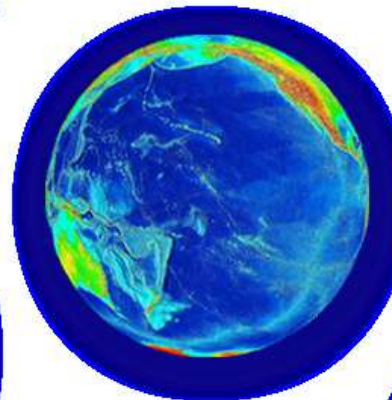
Atlantique



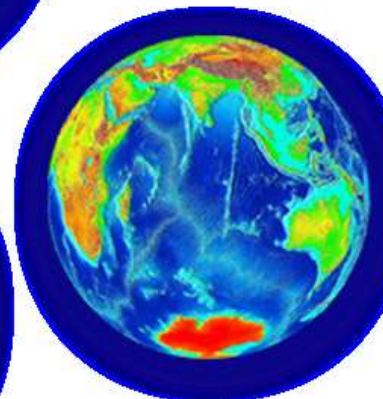
Arctique



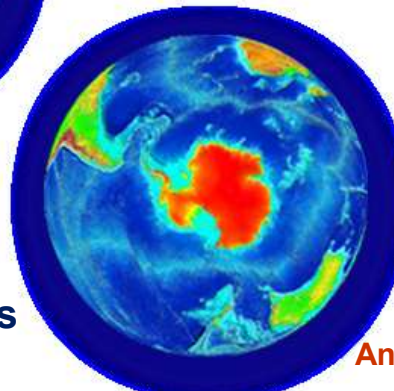
Pacifique



Indien



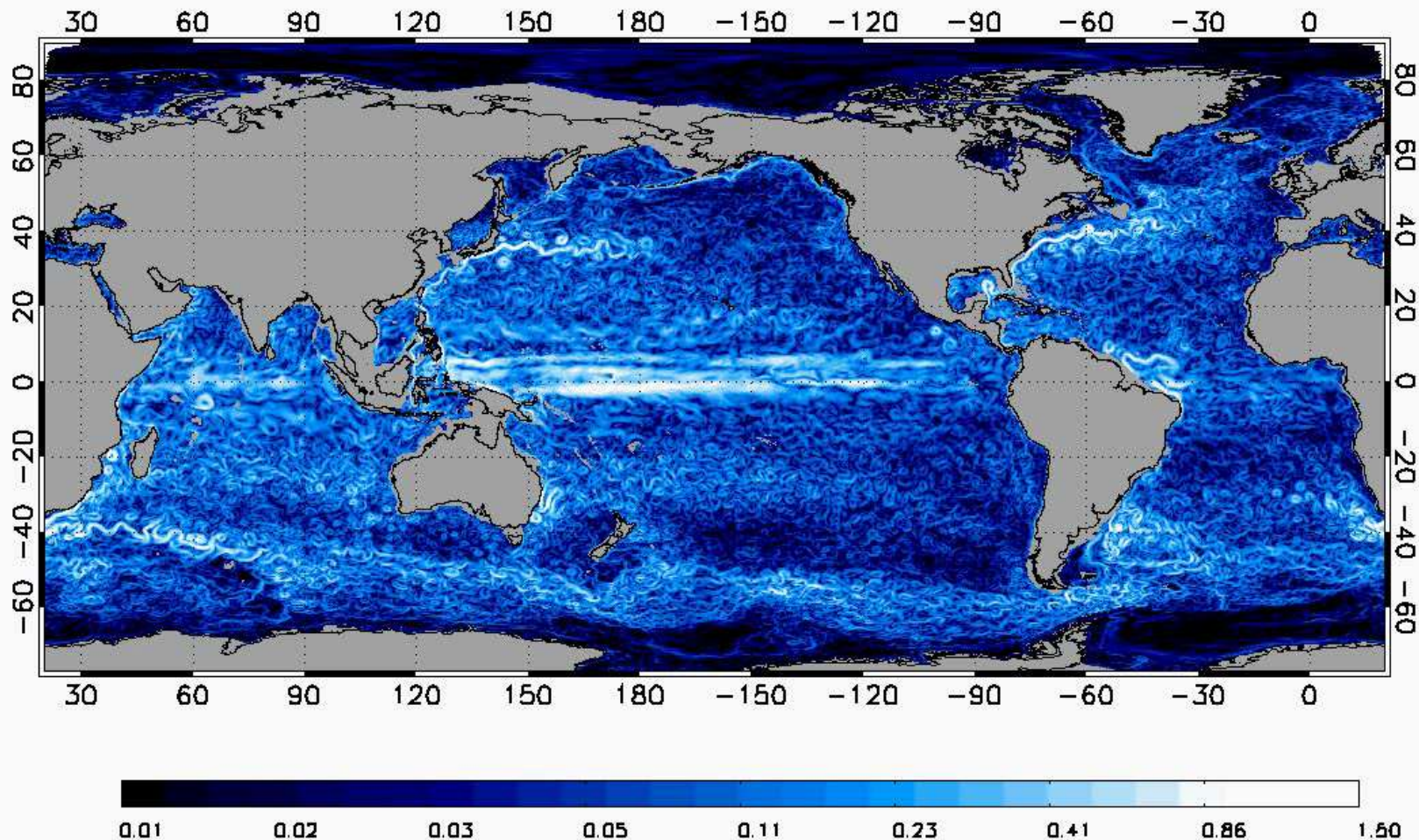
Antarctique



L' « économie bleue » dans l'Union Européenne:

- 5,4 millions d'emplois
- Un chiffre d'affaire de 500 milliards d'euros annuels

Un océan qui bouge!



Réanalyse
Mercator-Océan
Global, $\frac{1}{4}^\circ$

Les échanges avec l'**atmosphère** :

variations des propriétés de l'eau (température, pression, salinité)

⇒ circulation profonde et convection

Les **vents** entraînent l'eau en surface

⇒ courants de surface

La **rotation** de la Terre :

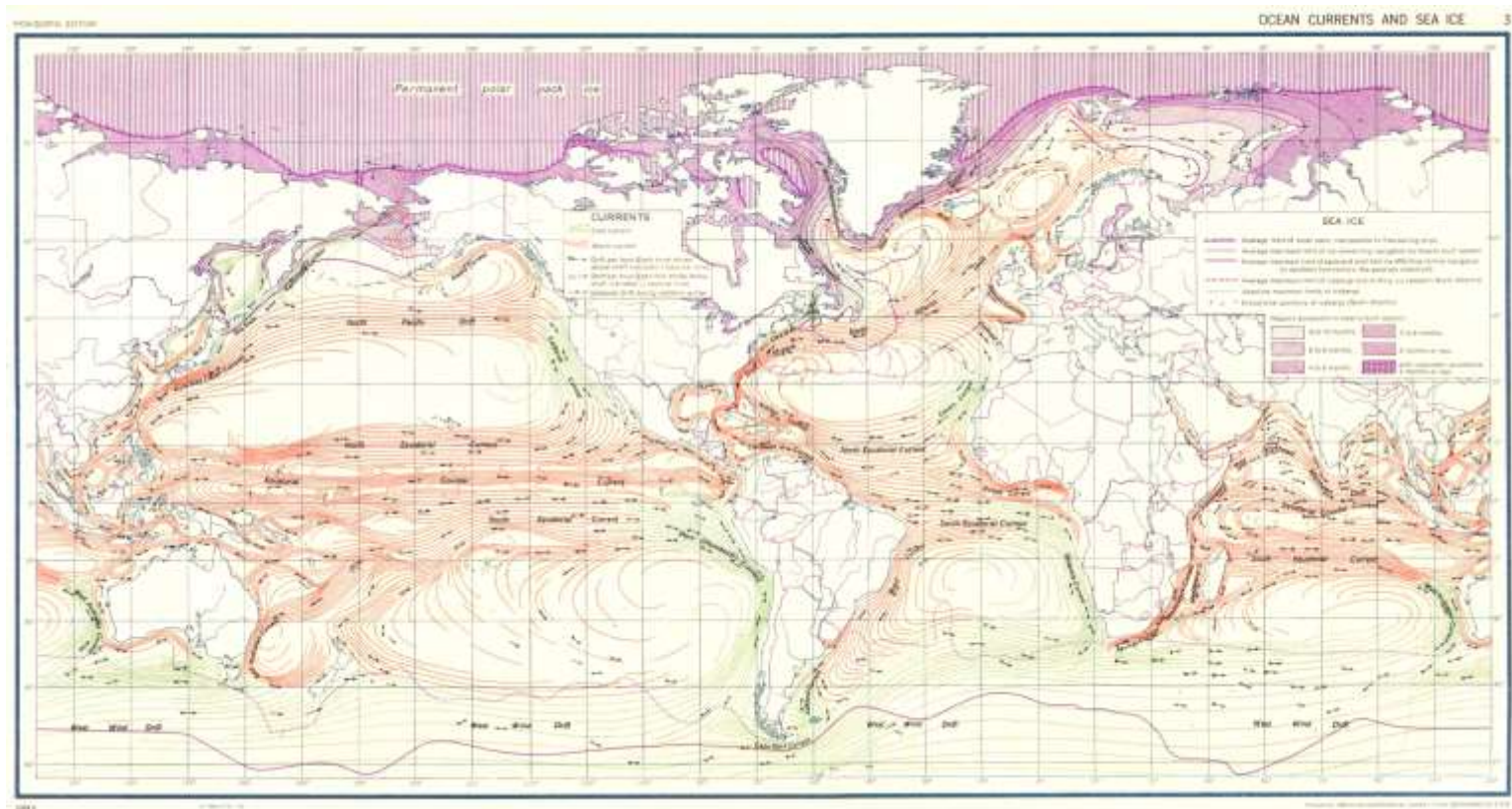
sens de rotation des grands courants dans les bassins océaniques

⇒ circulation géostrophique

La **gravité** (Terre, Lune, Soleil) = le poids de l'eau :

⇒ circulation verticale, marées

Les courants océaniques en 1943

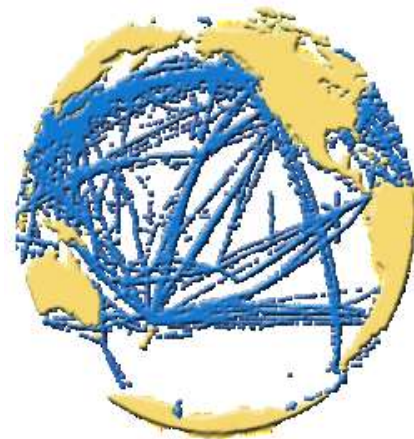
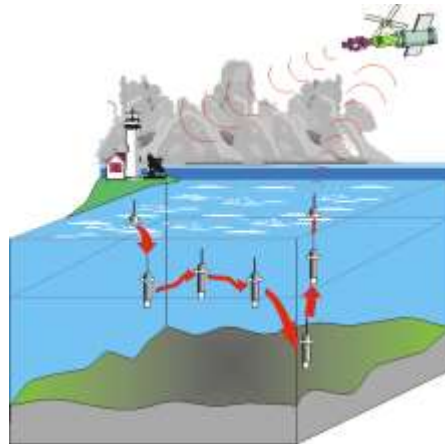


Interêt du spatial pour l'observation des océans

Les réseaux de mesure in situ

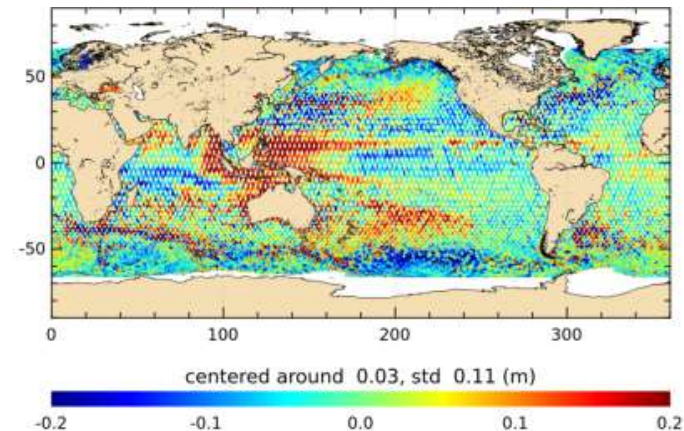


ARGO/Coriolis



Routes
maritimes

10 jours de mesures par le satellite Jason



L'océan physique et les mesures spatiales

Les satellites permettent de mesurer certains paramètres physiques de l'océan:

Température de surface
Vent de surface
Topographie de surface (altimétrie)

- Dynamique de l'océan
- Elévation du niveau de la mer
- Marées

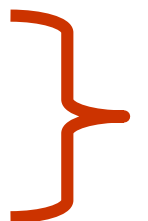
Etat de mer (vagues, houle)
Courant de surface
Salinité
Glaces de mer



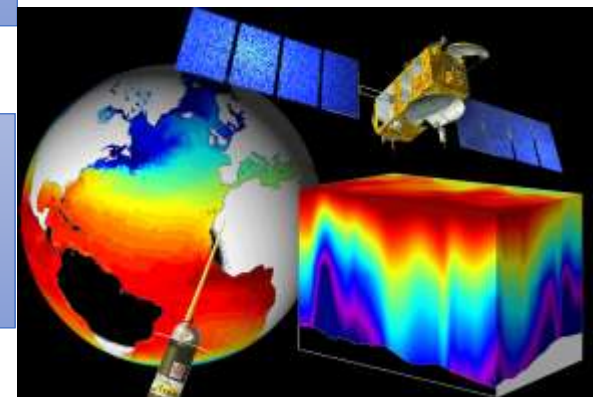
Description de la « machine océan » et de ses interactions avec l'atmosphère



Grande maturité de ces techniques, bon niveau de coordination internationale



Techniques plus récentes, mais déjà largement exploitées



l'environnement marin et les mesures spatiales

Essentiellement les mesures de l'océan « physique », plus:

La couleur de l'eau: accès aux concentrations en chlorophylle, et donc à la concentration en phytoplancton

Le suivi des animaux marins, via les systèmes Argos

La détection de surfaces « lisses », liées à des nappes d'hydrocarbures, des nappes d'algues

Assimilation dans des modèles (MERCATOR / MyOcean) ,
pour avoir une synthèse
de l'état de l'océan

Imagerie optique:
MODIS, Sentinel-3 (OLCI), GOCI

Système ARGOS

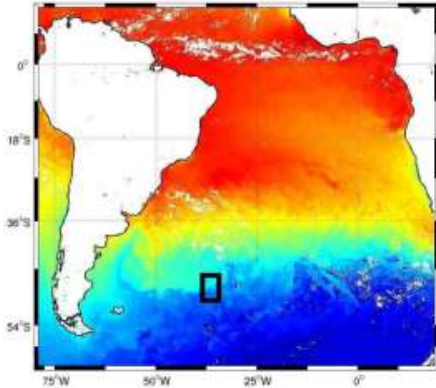
Radar: radarsat, Sentinel-1



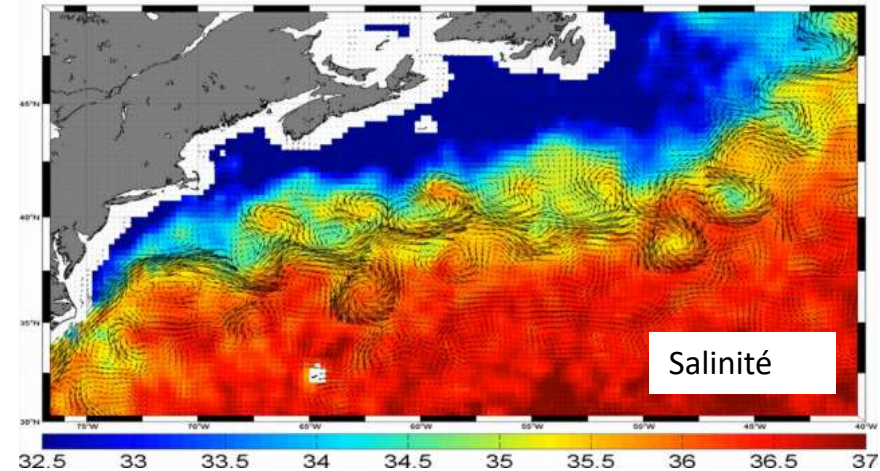
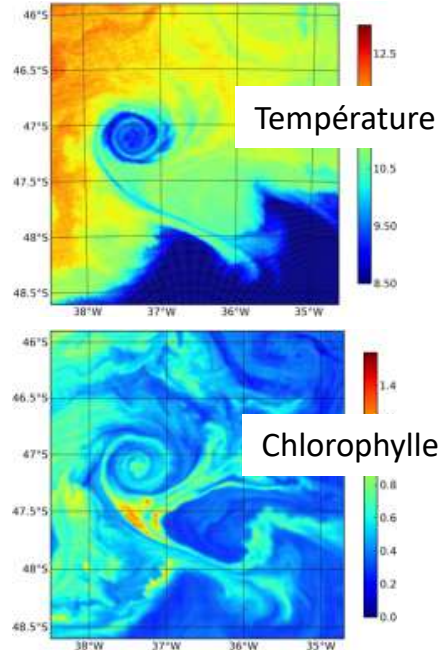
Mesures de paramètres en surface (1/2 – capteurs passifs)

Température, Salinité, Couleur de l'eau...

- observable de surface (qq cm pour T°, salinité, qq m pour couleur)
- couverture large, capacité d'imagerie de structures fines
- celles-ci pouvant être issue de phénomènes d'advection ou de production
- synthèses (journalières à mensuelles) pour des champs globaux

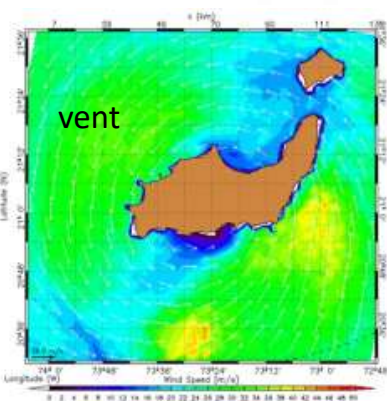
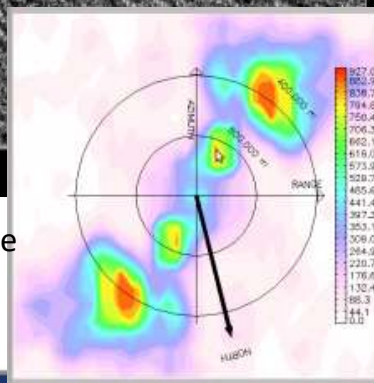
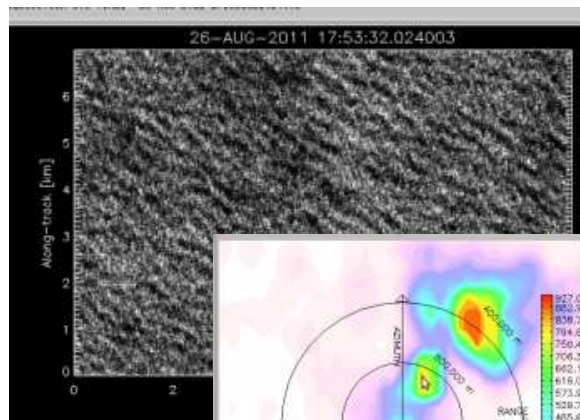
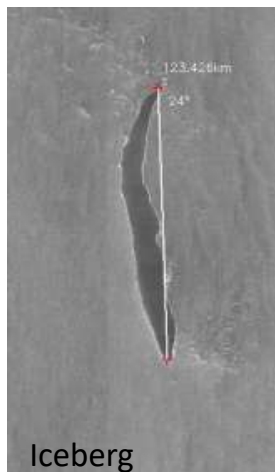


Imagerie optique,
infra-rouge



Radiométrie micro-onde

Paramètres de surface (2/2 – imagerie radar)



L'altimétrie: pourquoi?

ALTIMETRIE => mesure de la topographie de surface des océans

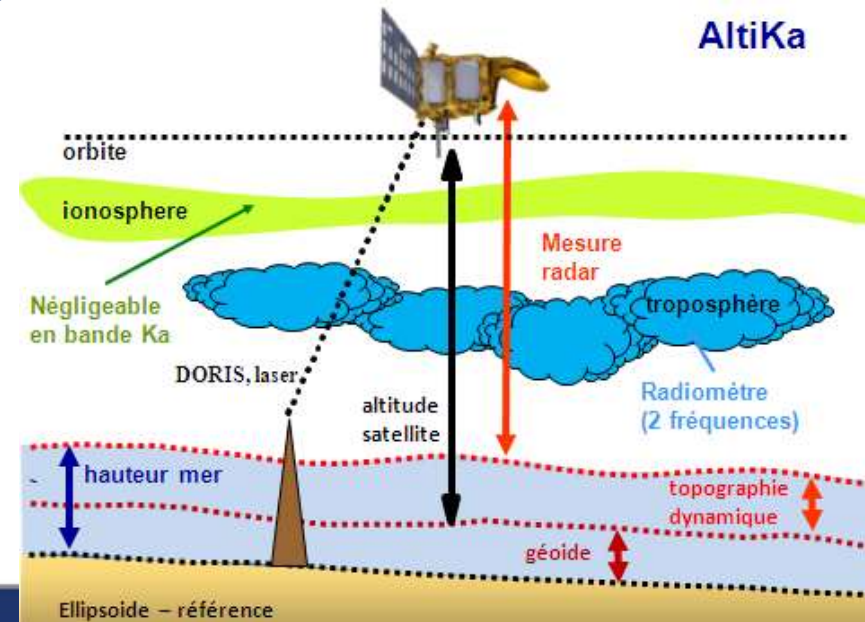
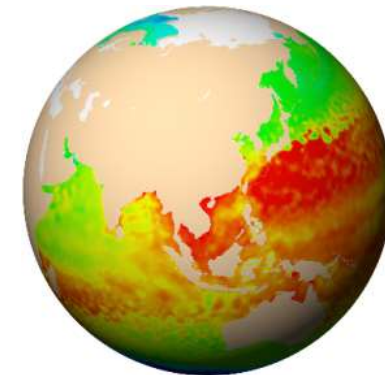
Phénomènes ciblés par cette observation

- Effet « gravitationnels »: géoïde, marées
- Variations de volume/masse: niveau de la mer
- Phénomènes climatiques (ex. el niño):
- Dynamique océanique:
 - ◆ Circulation thermohaline
 - ◆ Tourbillons, fronts
 - ◆ Réponse au forçage par les vents
- Produits dérivés:
 - ◆ Vent de surface et hauteur moyenne des vagues
 - ◆ Hauteurs des lacs, rivières, eaux continentales
 - ◆ Topographie des calottes glaciaires

Océan - Terre solide

Océan – Surfaces - Cryosphère

Océan - Atmosphère



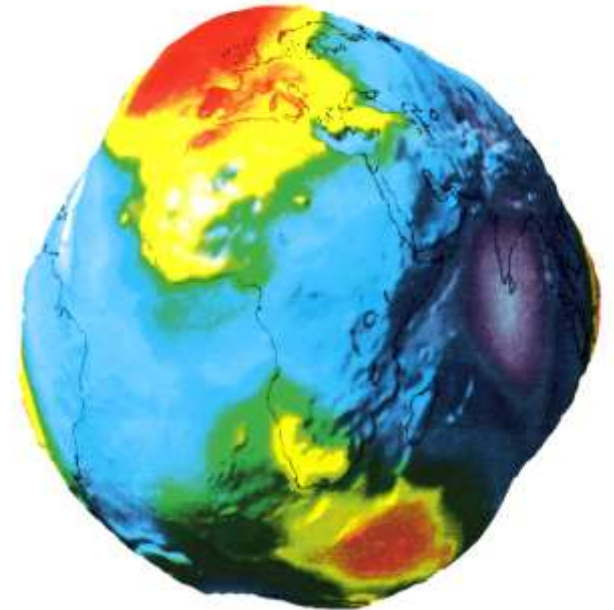
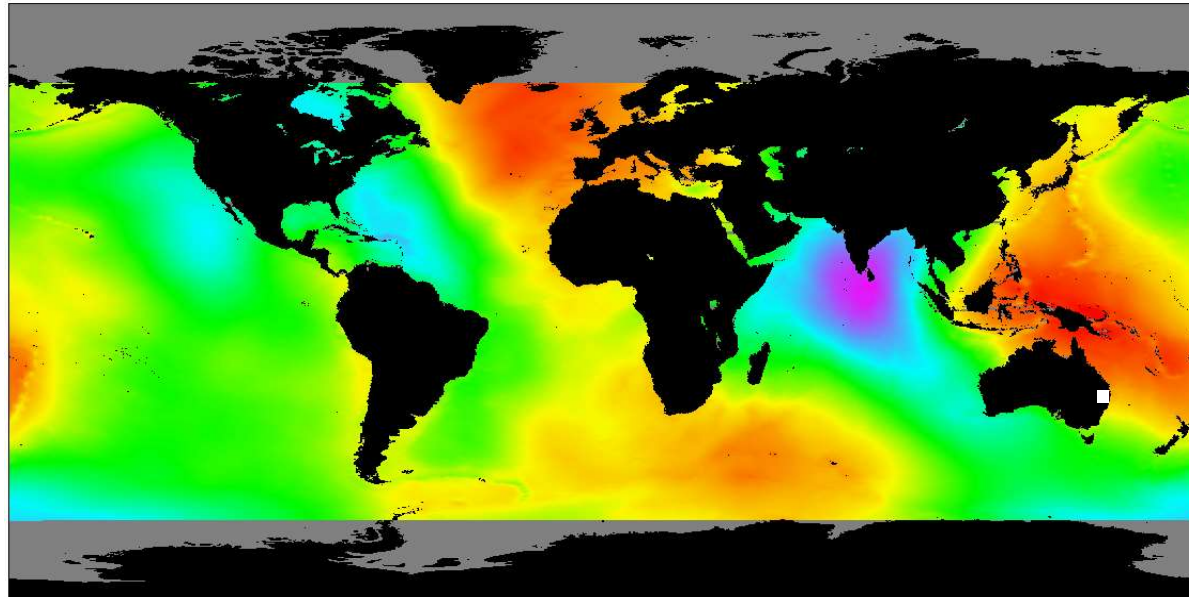
Le géoïde

- Le géoïde = surface **équipotentielle** du champ de gravité la plus **proche** du niveau moyen des océans.

Ordres de grandeurs :

15 km d'aplatissement aux pôles

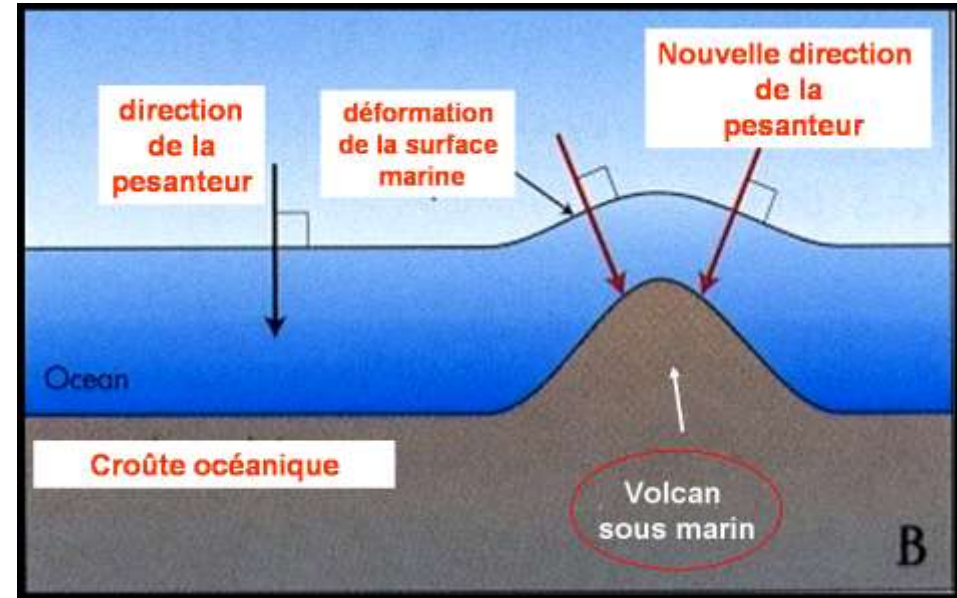
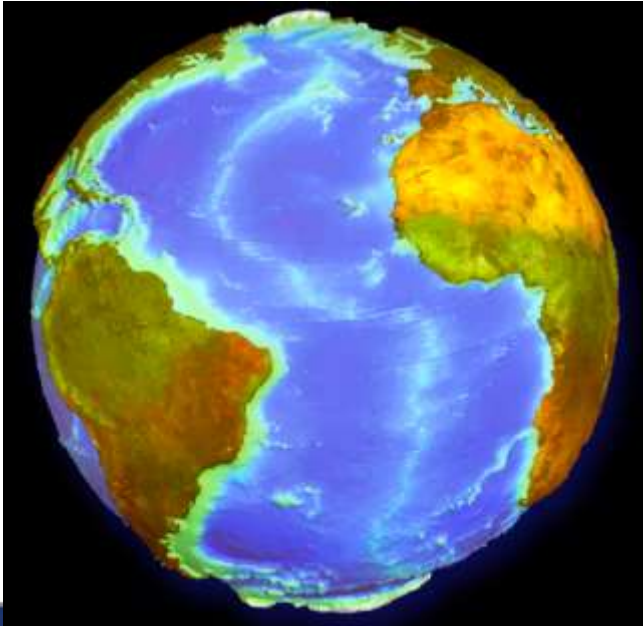
Géoïde – Ellipsoïde ~ 100-150 m



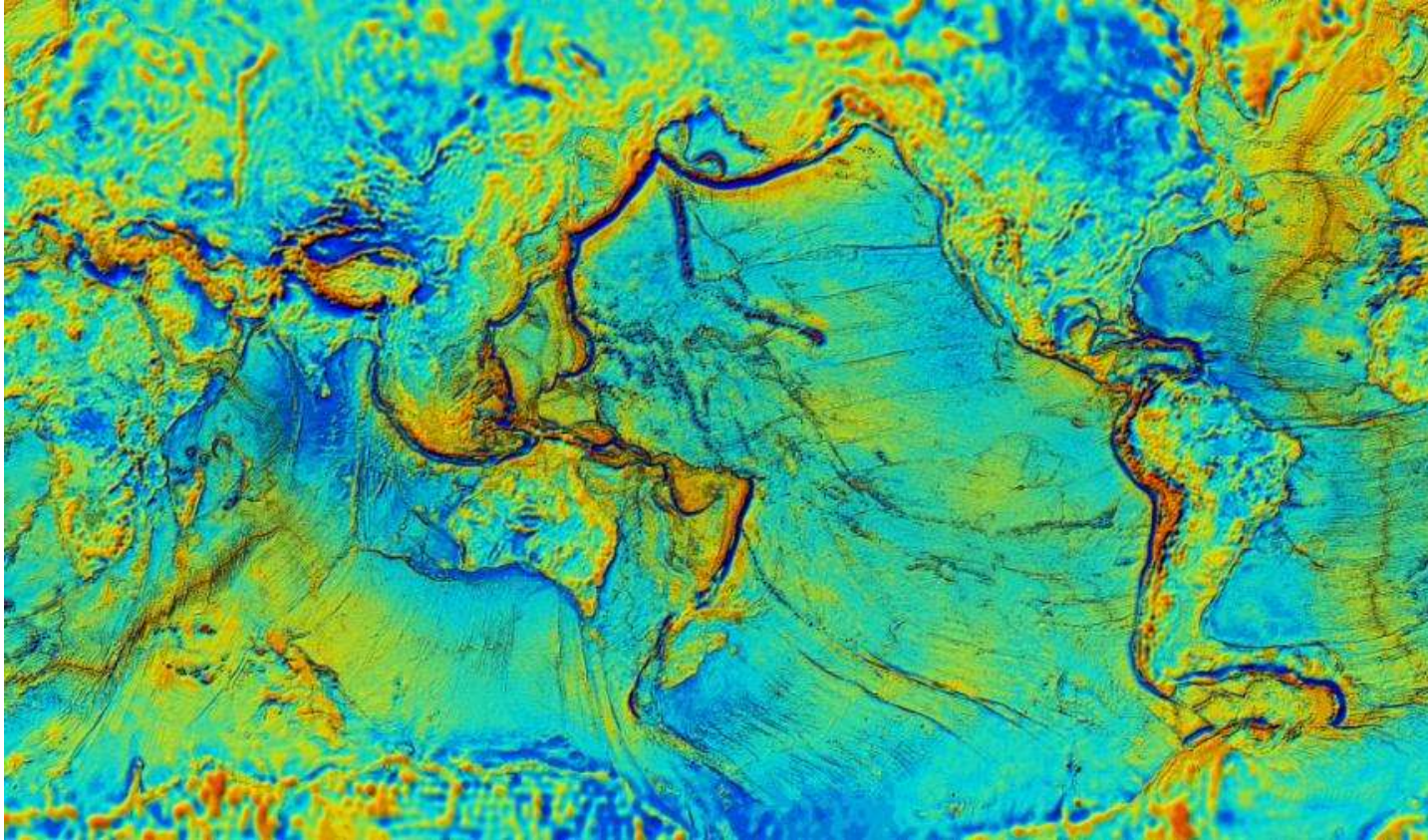
La Bathymétrie

Le relief du fond sous marin reflète l'activité géophysique interne de la Terre : Tectonique des plaques, volcans, ...

Irrégularités de ce relief liées aux variations locales du champ de gravité terrestre, donc au niveau moyen des océans.



Anomalie de gravité issues de Jason-1 (mission géodésique)

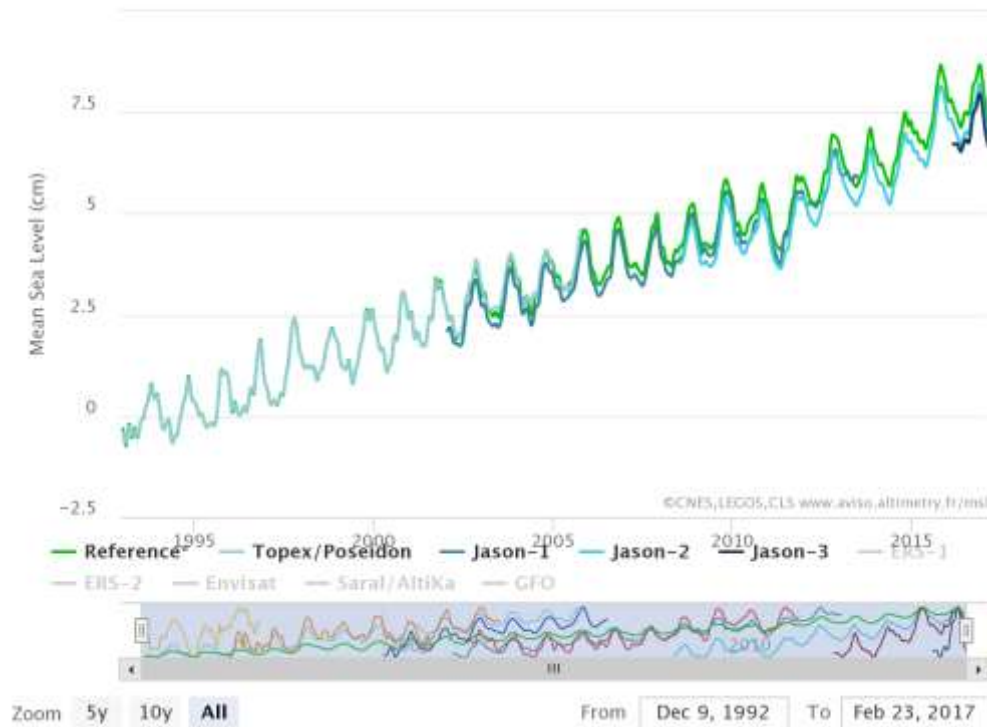


D. Sandwell, pers. Comm.

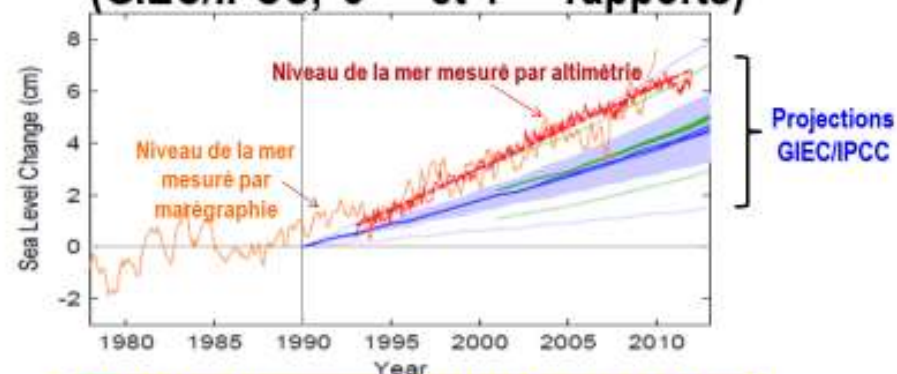
Evolution de la surface moyenne océanique

Mean Sea level (cm)

Mean Sea Level from Altimetry
ALL - Global - Not removed



Niveau de la mer: comparaison entre observations et estimations des modèles de climat (GIEC/IPCC, 3^{ème} et 4^{ème} rapports)

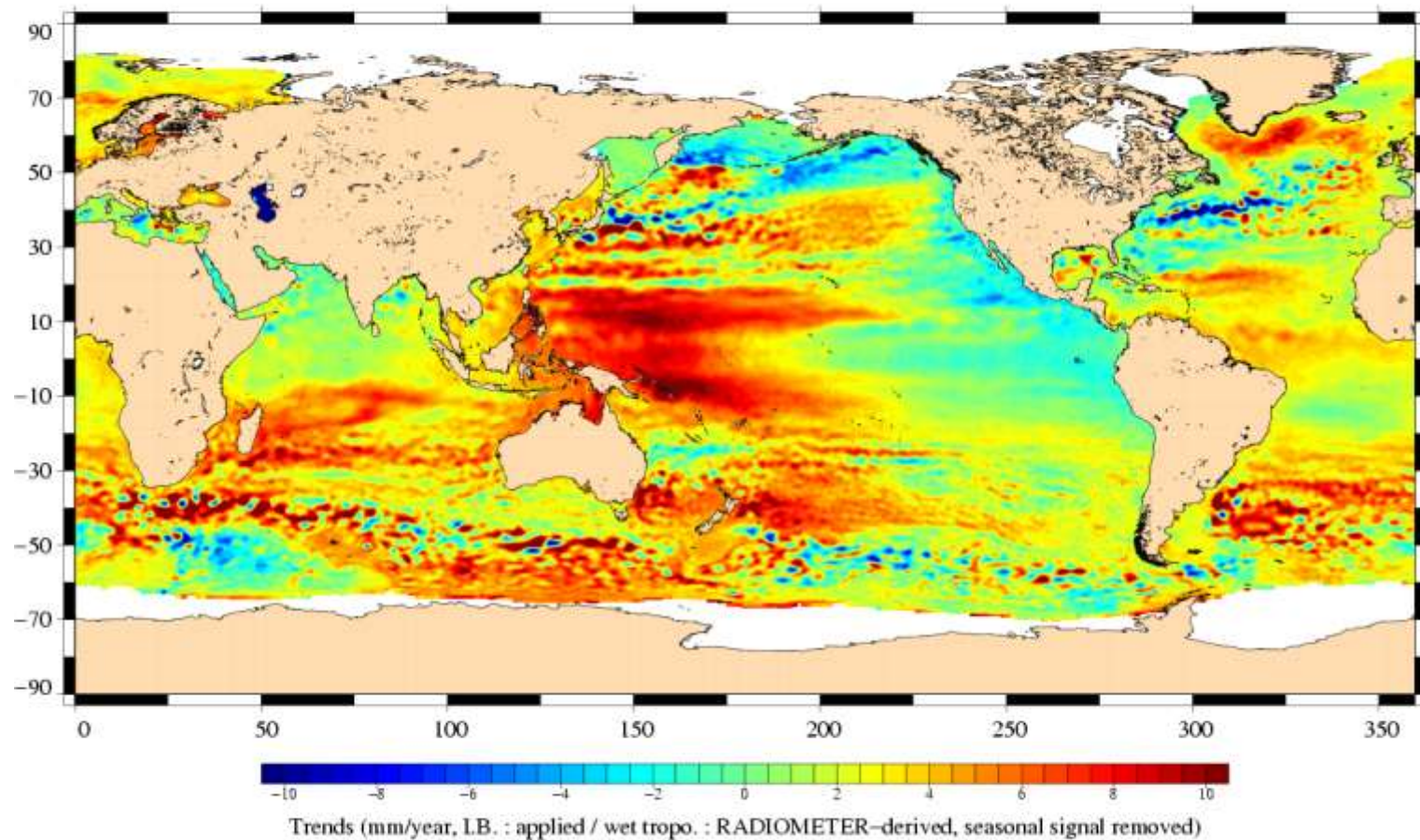


GIEC: Groupe Intergouvernemental sur l' Evolution du Climat
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

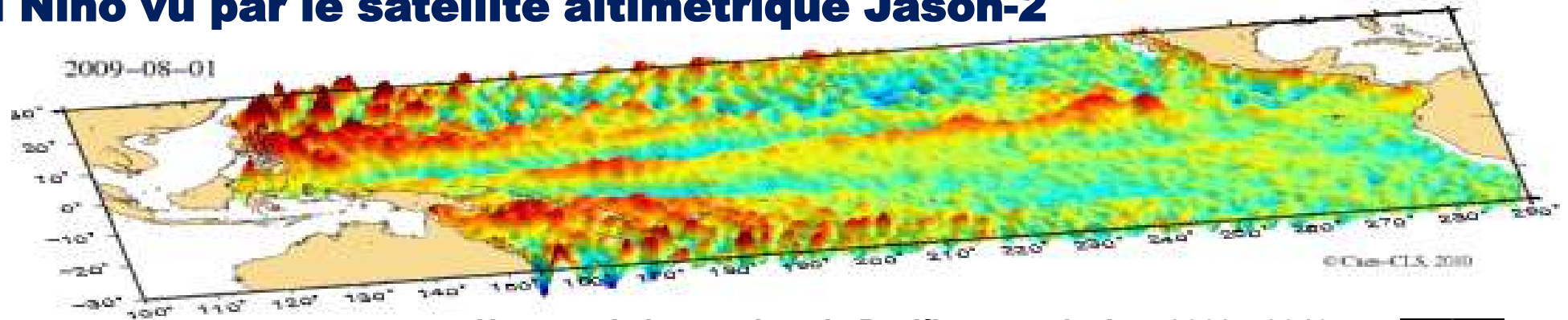
Source: IPCC, Cazenave (2012)

Surface moyenne océanique : variations géographiques (AVISO)

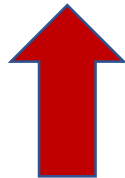
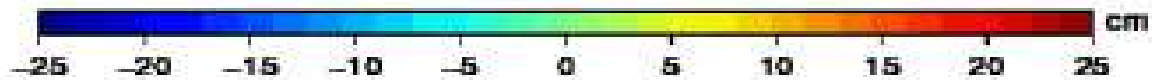
Multi-Mission Sea Level Trends (period : Oct-1992 to Jan-2008)



El Nino vu par le satellite altimétrique Jason-2



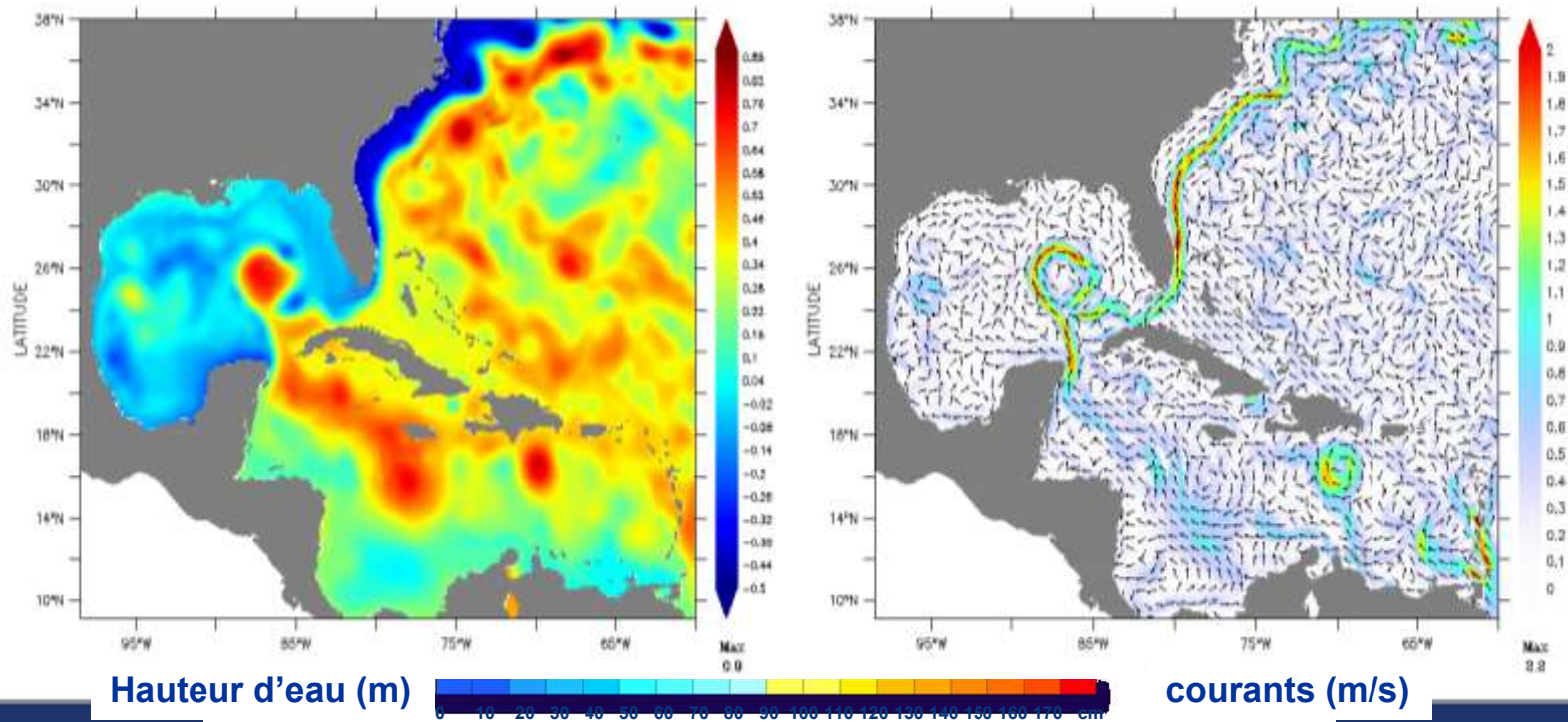
Hauteur de la mer dans le Pacifique tropical en 2009 - 2010



La circulation océanique

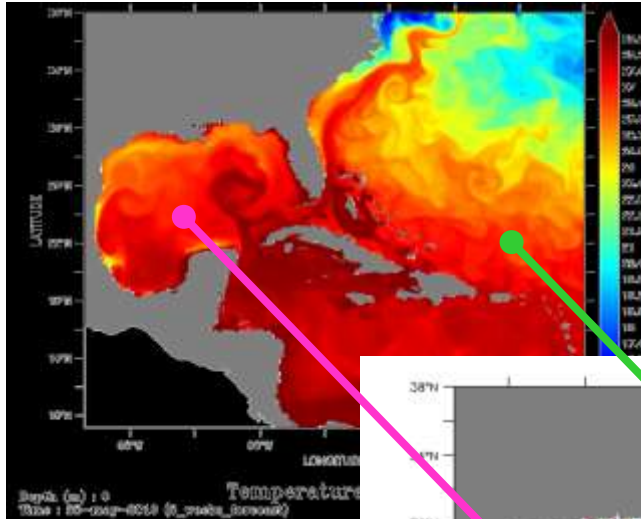
Circulation océanique = creux et bosses autour desquels s'enroulent les courants.

- ❖ Circulation permanente ~ quelques mètres
- ❖ Variabilité ~ quelques décimètres

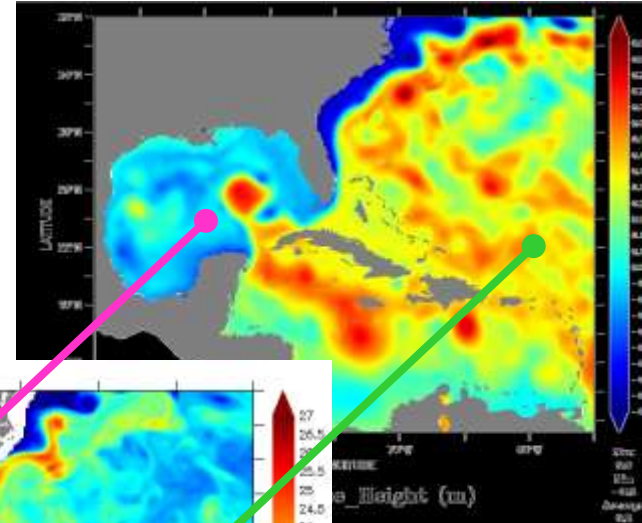


La topographie de surface pour une information en profondeur

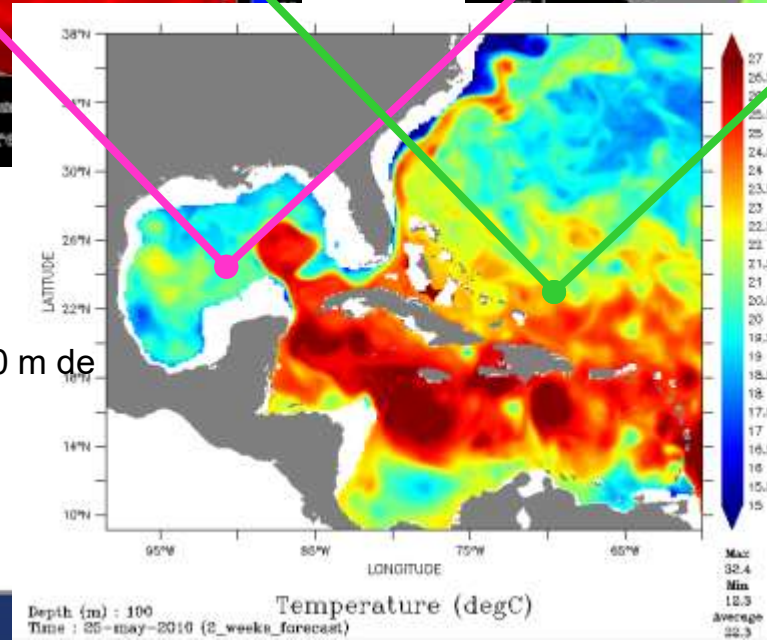
Température de surface



Hauteur de mer

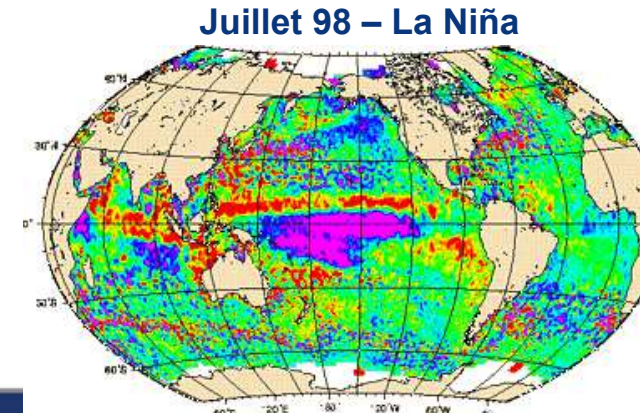
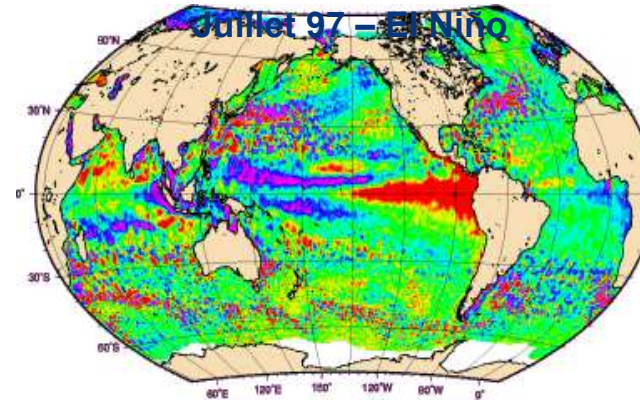


Température à 100 m de profondeur



Anomalie de hauteur de mer vue par les altimètres

- « El Niño » est un phénomène climatique se produisant certaines années dans le Pacifique tropical
- En temps normal, les alizées (d'Est en Ouest) maintiennent un réservoir d'eau chaude dans le Pacifique Ouest (Philippines, Australie)
- Lors des événements el Niño, des vents d'Ouest engendrent un déplacement massif des eaux chaudes du Pacifique Ouest vers l'Est
- Le phénomène La Niña correspond au phénomène inverse (réduction de la zone d'eaux chaudes du Pacifique Ouest)

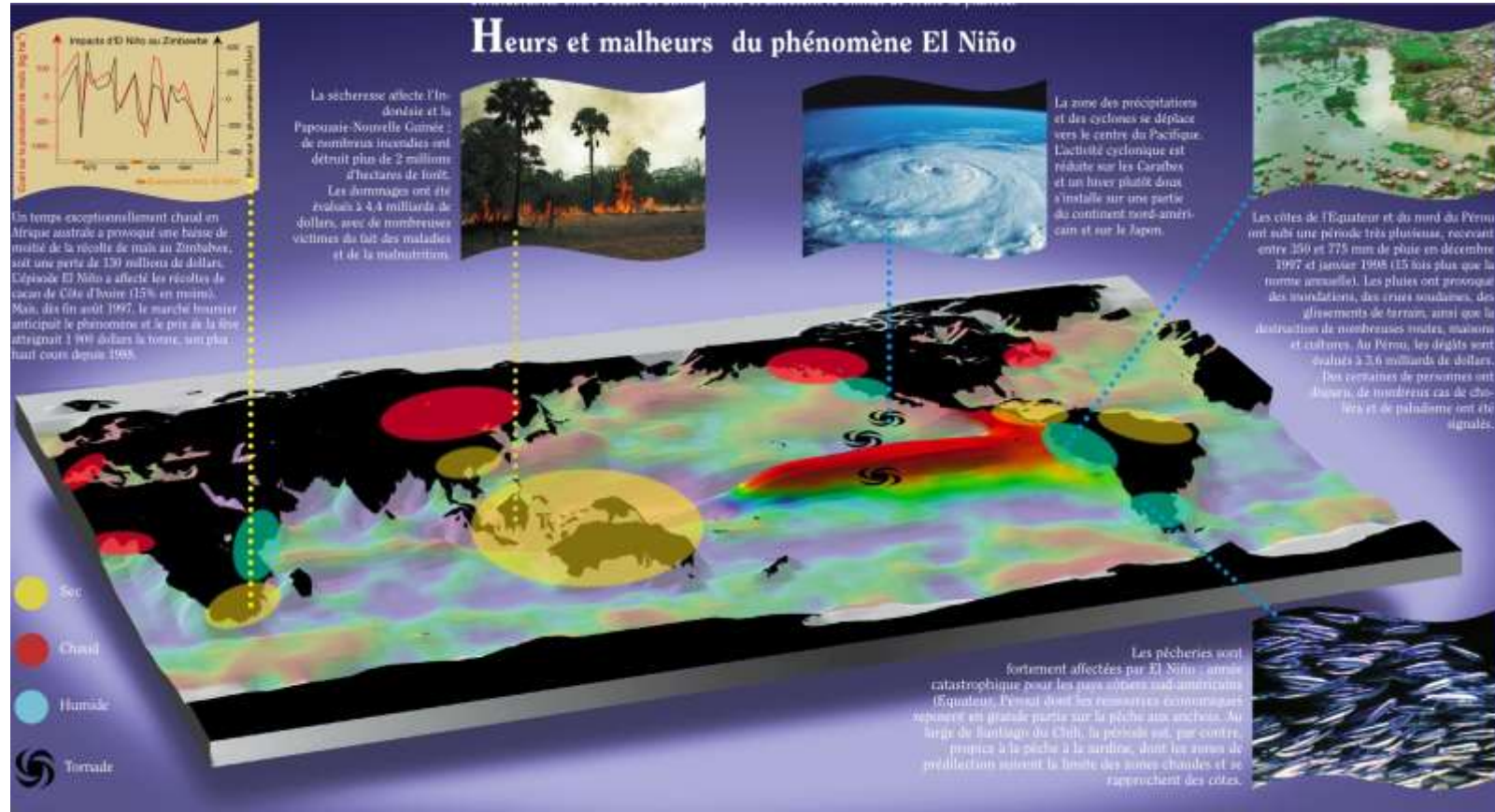


Conséquences d'El Nino

Sécheresse => Feux de forêts

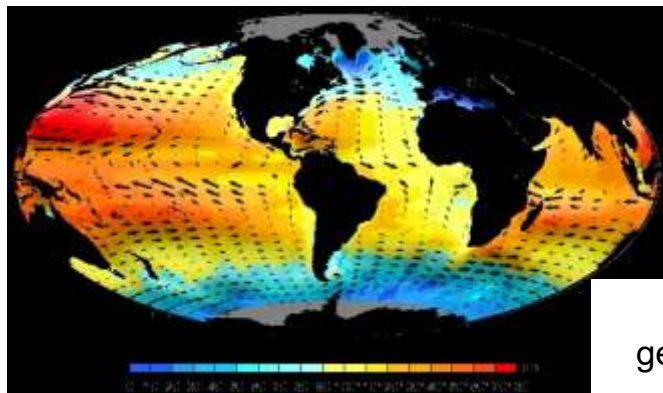
Climat

Inondations

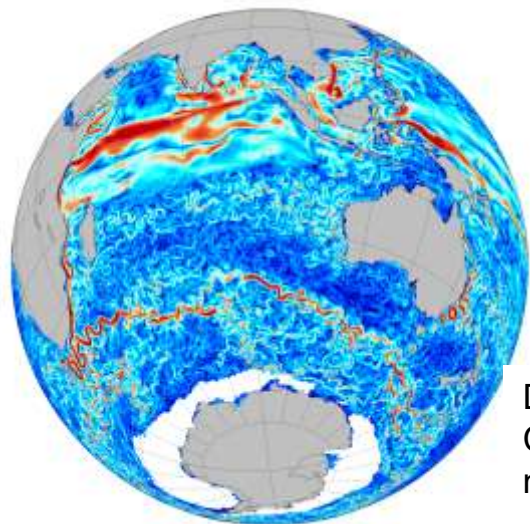


Pêche

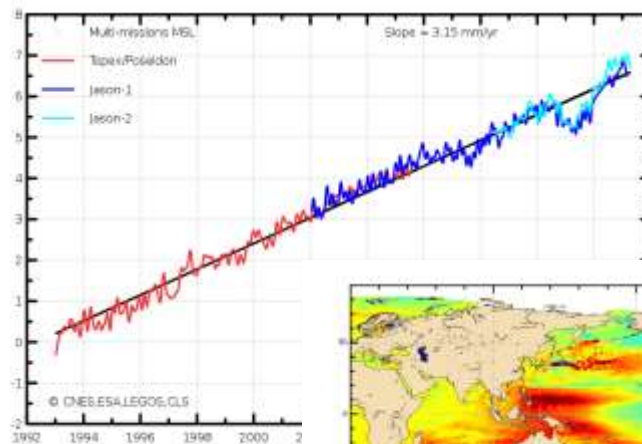
Ce que mesure l'altimétrie sur océan



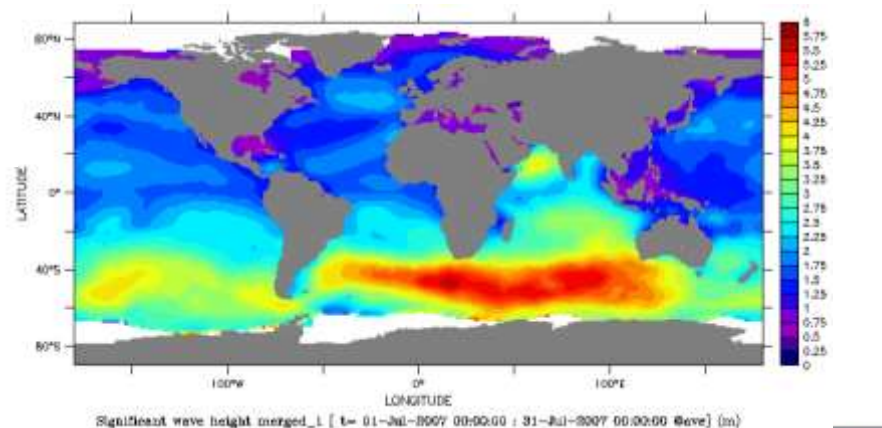
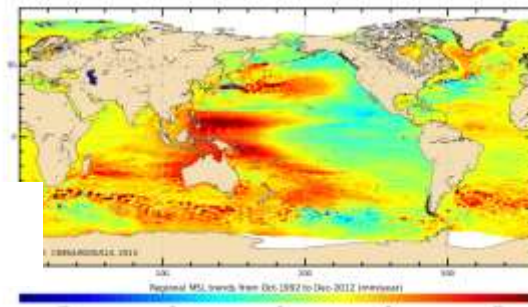
Surface moyenne:
géοide et circulation
grande échelle



Dynamique océanique:
Courants, tourbillons,
marées, 'el niño'

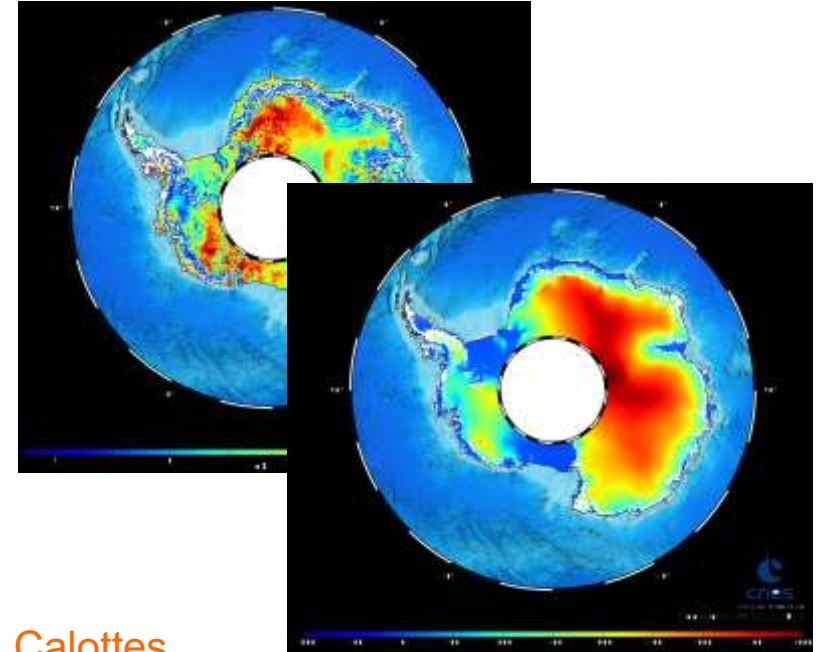
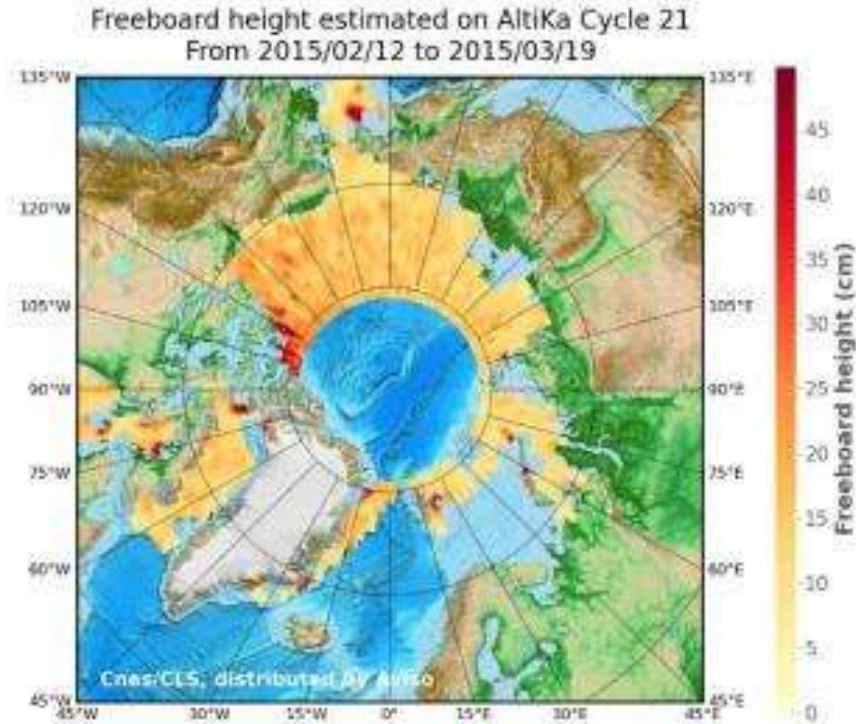


Variations du niveau
moyen



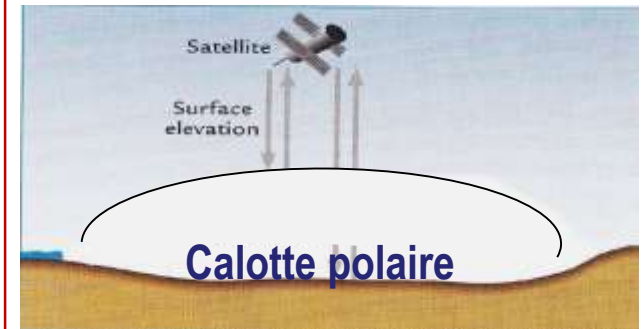
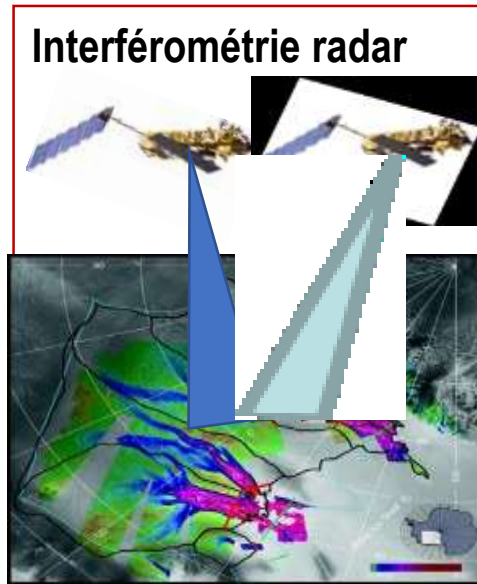
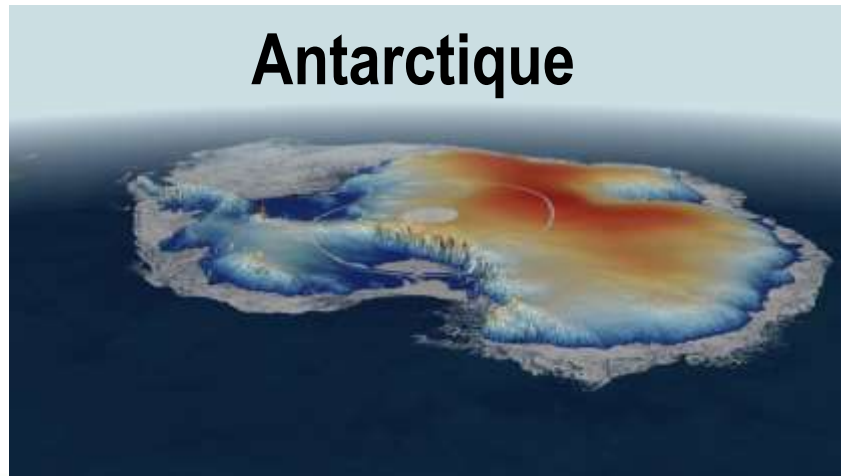
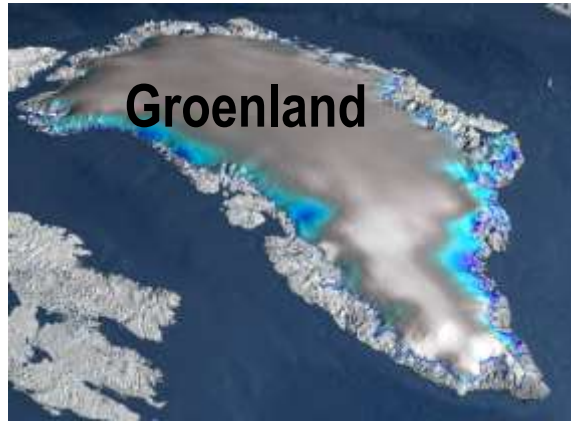
Mais aussi sur glaces:

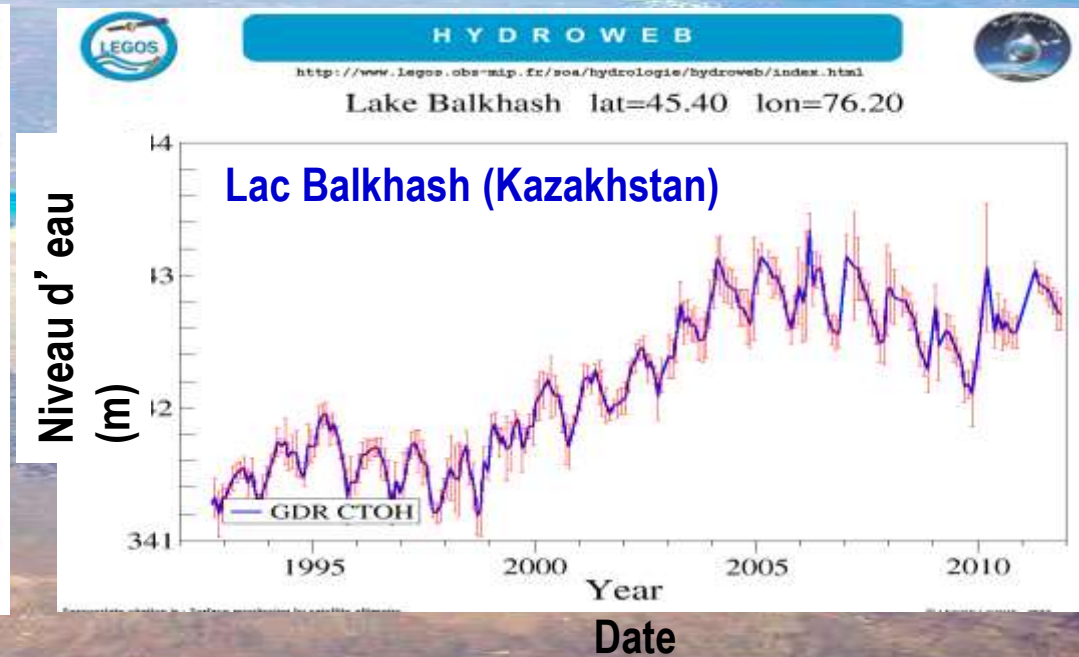
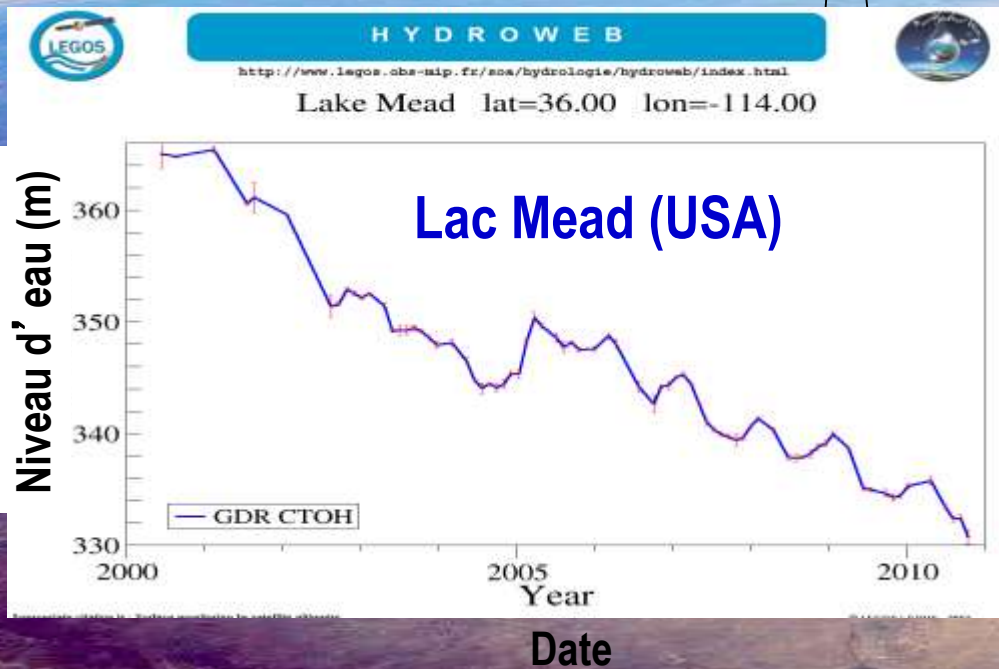
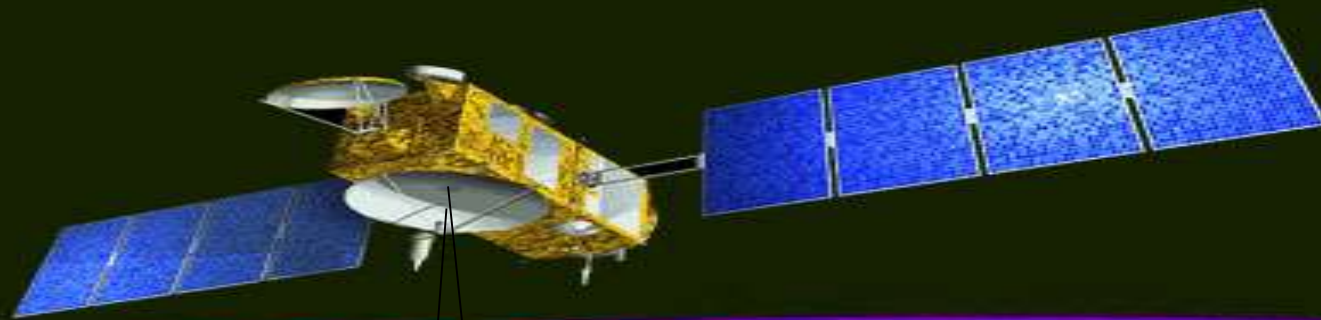
Franc-bord: épaisseur glace de mer

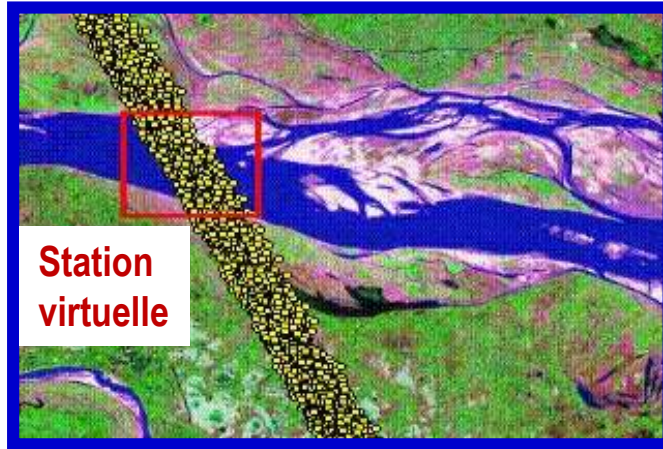




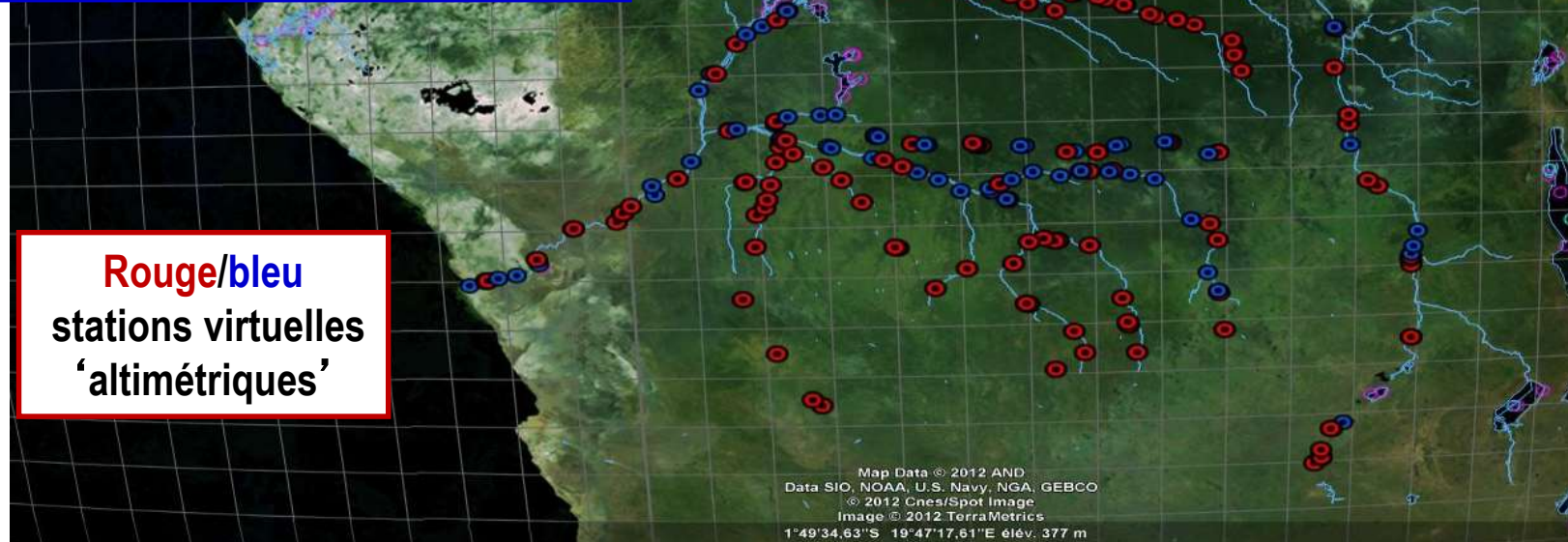
Variations de masse des calottes polaires mesurées par satellite depuis 20 ans

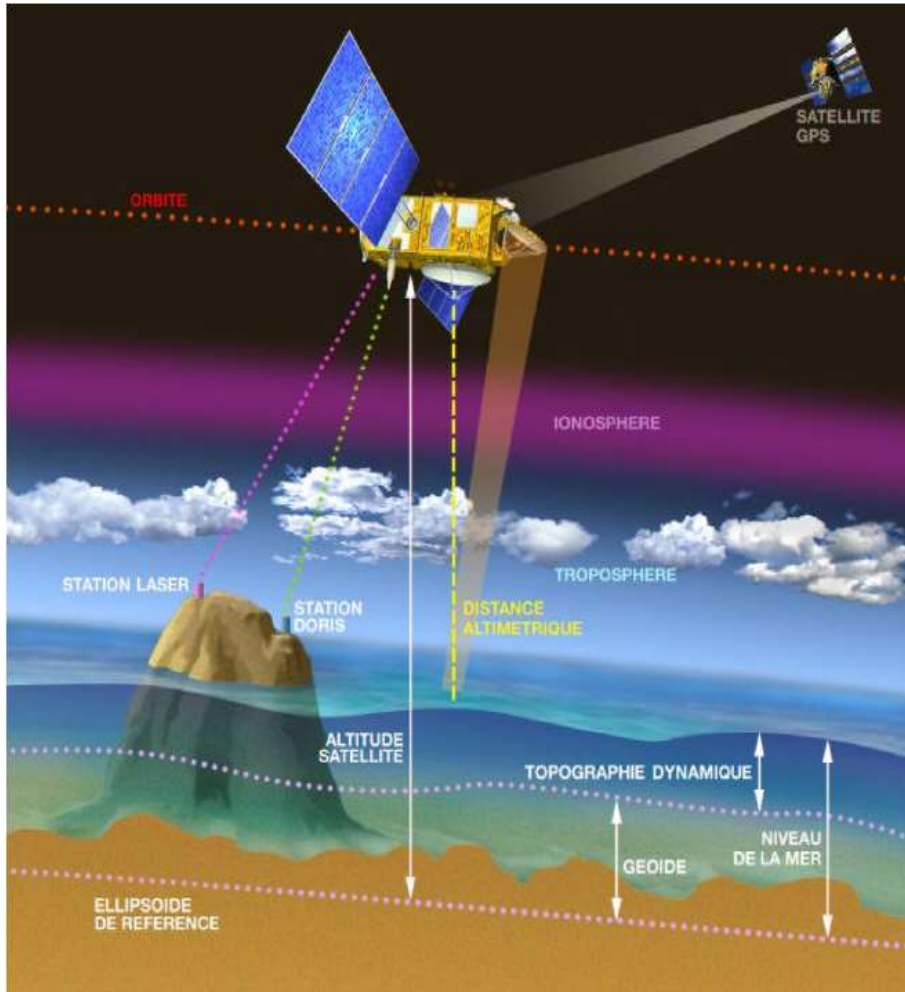






Bassin du Congo





Mesure de la topographie de la surface de l'océan

- ❖ Un radar altimètre mesure la distance du satellite à la surface de l'océan
- ❖ Un système d'orbitographie précise permet de localiser le satellite par rapport à la Terre
- ❖ Par différence, on obtient la topographie de la surface de l'océan

Précision finale de l'ordre de quelques **centimètres**:

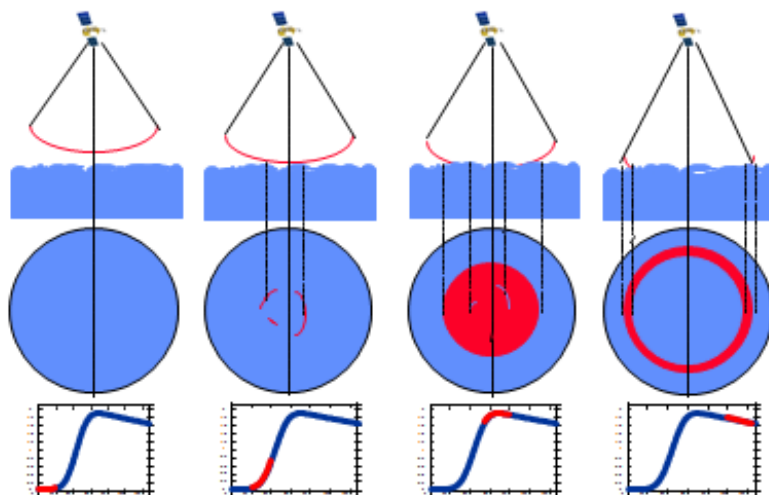
- ❖ Sous la simplicité du principe se cache le besoin de maîtriser parfaitement toutes les composantes du système
- ❖ Suivi constant des dérives (pour le niveau moyen des mers: précision < 1 mm/an)

Produits dérivés s'avérant très utiles pour la météo marine:

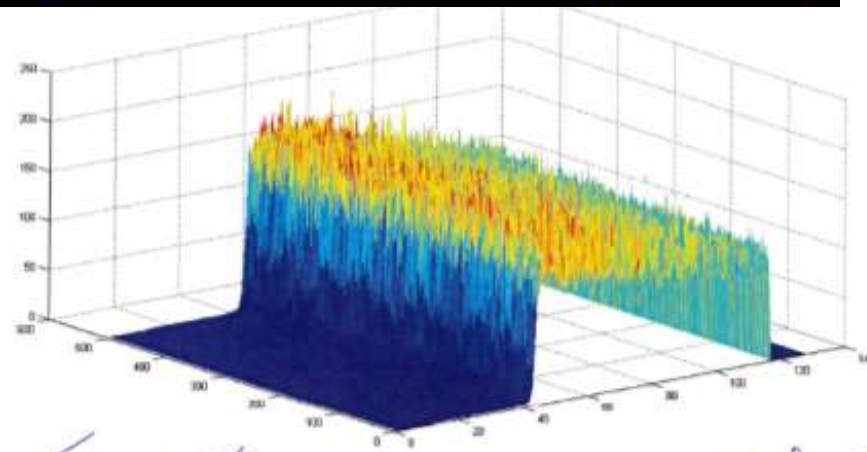
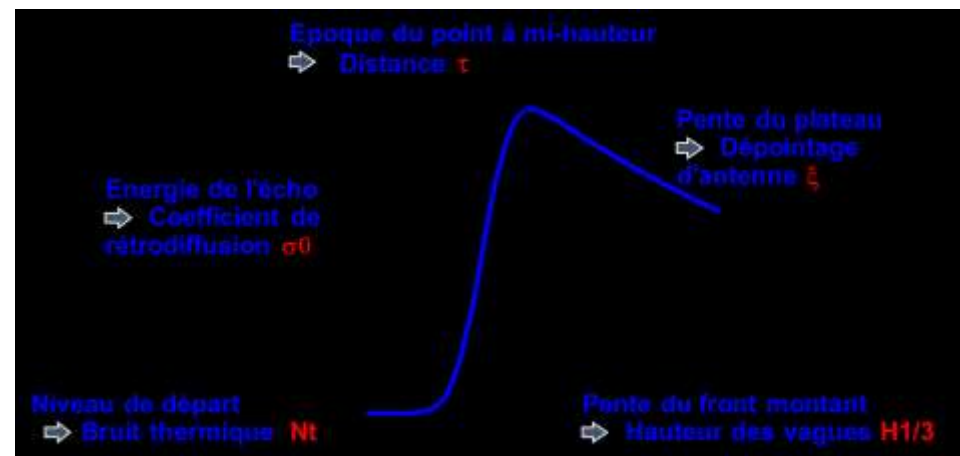
- ❖ La hauteur moyenne des vagues
- ❖ La vitesse du vent de surface

Mesure de la distance altimétrique avec le radar altimètre

LE RADAR ALTIMÈTRE: MODÈLE D'ÉCHO DE BROWN

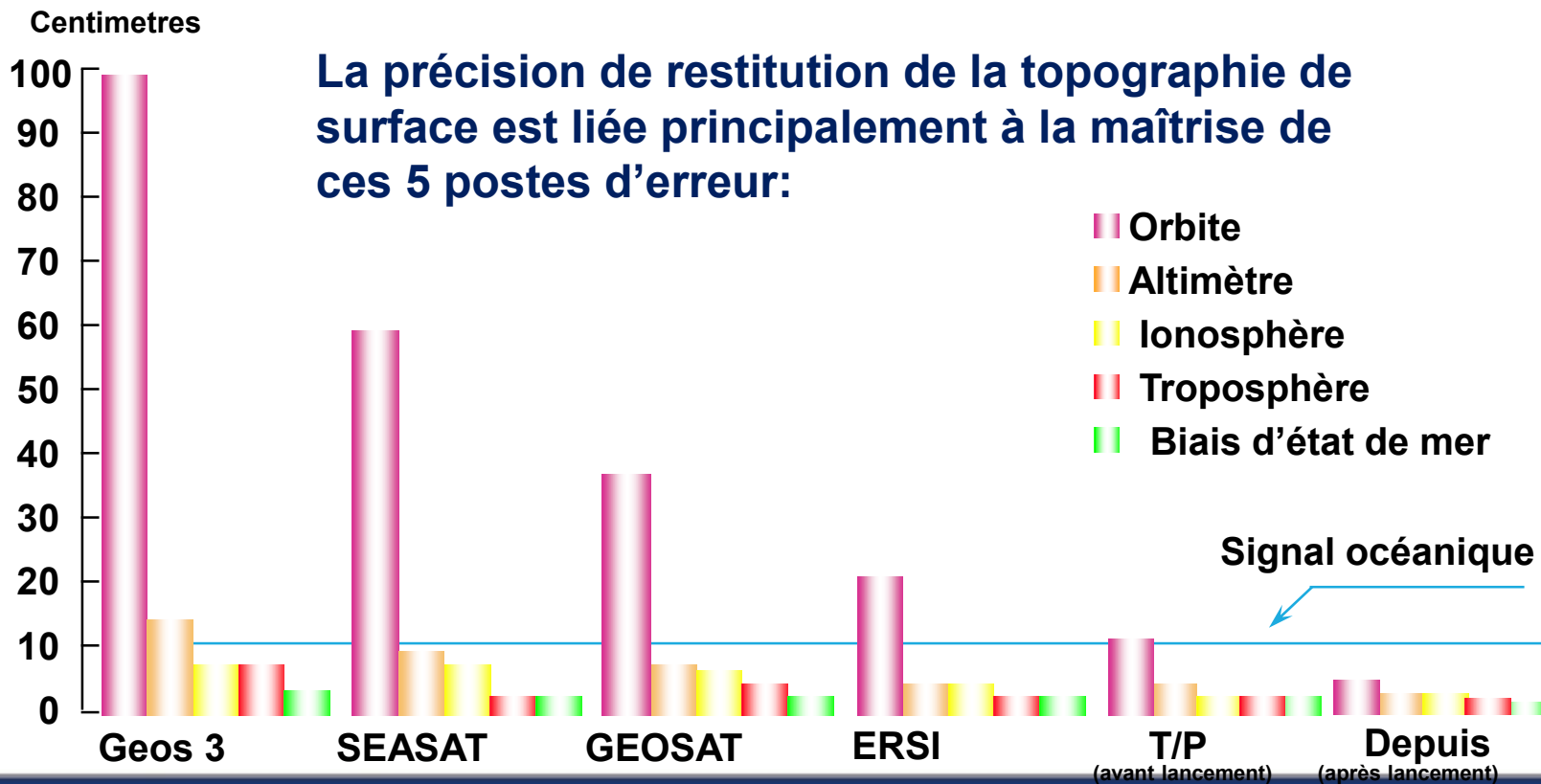


Formulation théorique à partir des caractéristiques du radar et de l'état de mer



Premières formes d'ondes Jason-3

$$\text{Sea Surface Height SSH} = h_{\text{sat}} - [h_s + h_i + h_{\text{iono}} + h_{\text{dry}} + h_{\text{wet}} + h_{\text{EM}} + h_{\text{otide}} + h_{\text{stide}} + h_{\text{ol}} + h_{\text{ptide}} + h_{\text{baro}}] + \varepsilon$$



Phase « vol en formation »: IMPACT RESTROSPECTIF

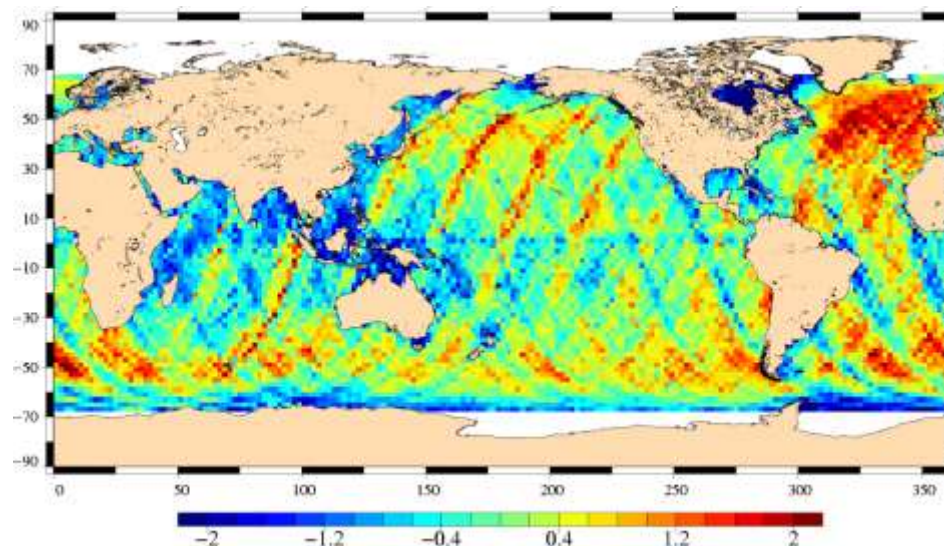
- 6 mois de vol en formation TOPEX/JASON pour comparer point par point les mesures

◆ Différence Jason-1 – TOPEX en hauteur de mer – échelle -2 cm - +2 cm

Nouvelles orbites
(GRACE)

Nouveaux
algorithmes

Nouveau biais
état de mer



TOPEX-Jason-1 SSH (cm) [Cycles JA1 1-21]

(sans correction de biais état de mer)

A mettre au crédit de l'OSTST, de l'effort Cal/val soutenu, et de la structuration en exploitation (SALP côté CNES)
Extrêmement riche en résultats scientifiques au passage !

SALP/AVISO: Altimétrie multi-mission (volet « sol »)

Fonctions:

- Étalonnage et validation
- Inter-étalonnage – homogénéisation
- Produits multi-missions
- Distribution, support aux utilisateurs



<http://www.aviso.altimetry.fr/fr/home.html>

SALP/AVISO: traitement aval et inter-étalonnage(1)

Missions non-étalonnées



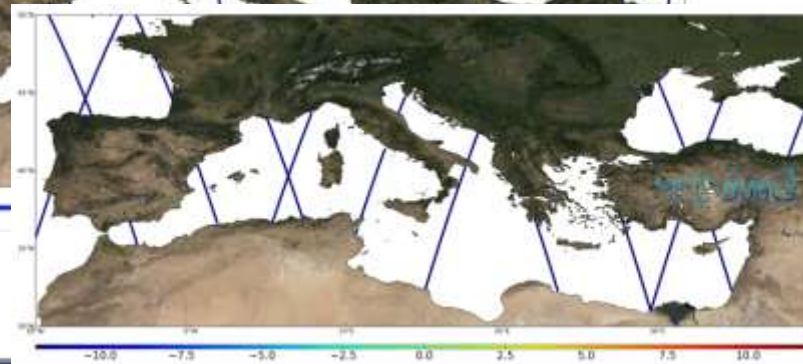
OSTM/Jason-2



SARAL/ AltiKa



Cryosat-2



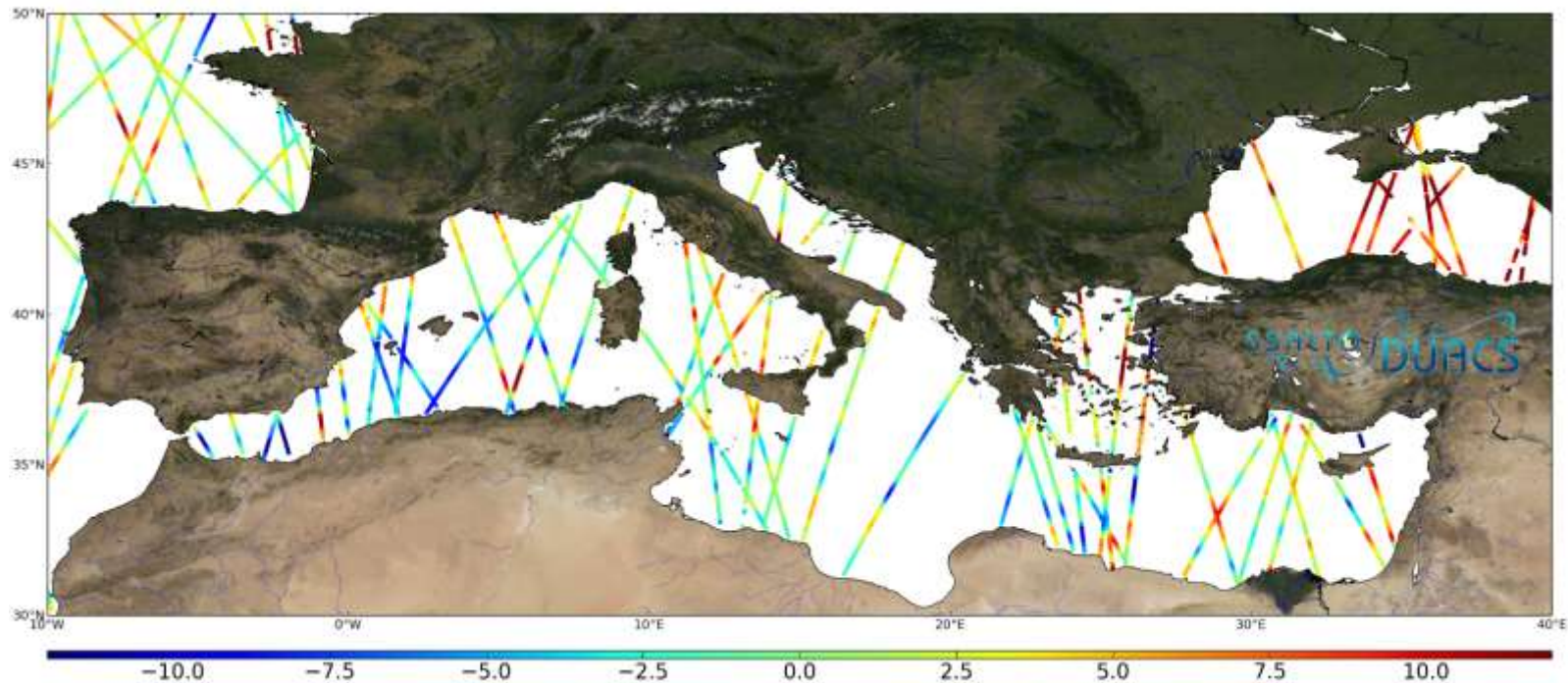
Hy-2A



SALP/AVISO: traitement aval et inter-étalonnage(2)

Après inter-étalonnage

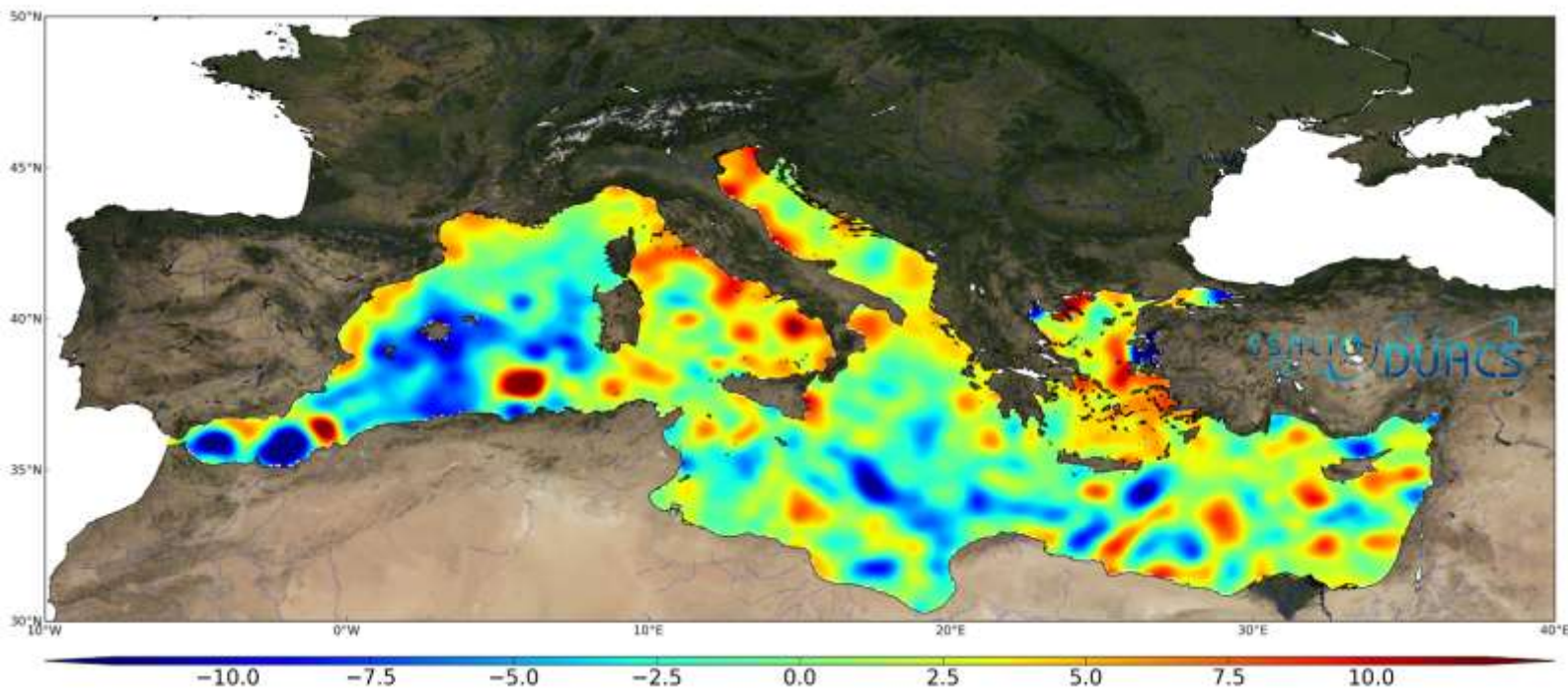
Produit niveau 3 – Anomalie de hauteur de mer (cm)

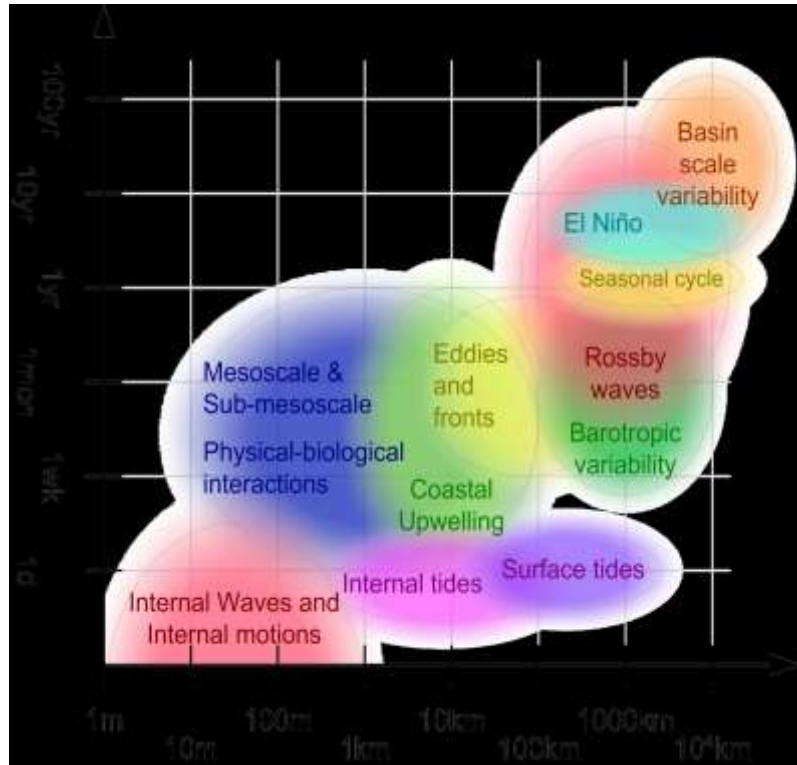


SALP/AVISO: traitement aval et inter-étalonnage(3)

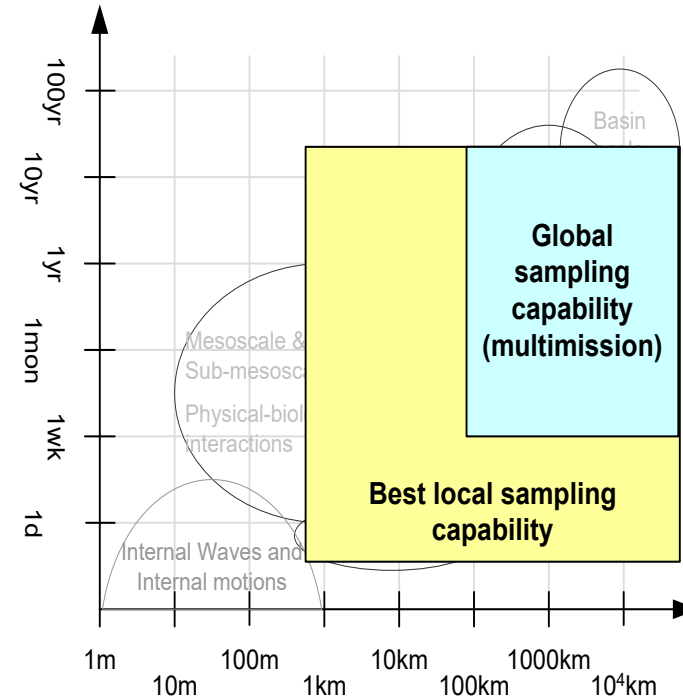
1D-2D mapping

Produit niveau 4: Anomalie de hauteur de mer (cm)



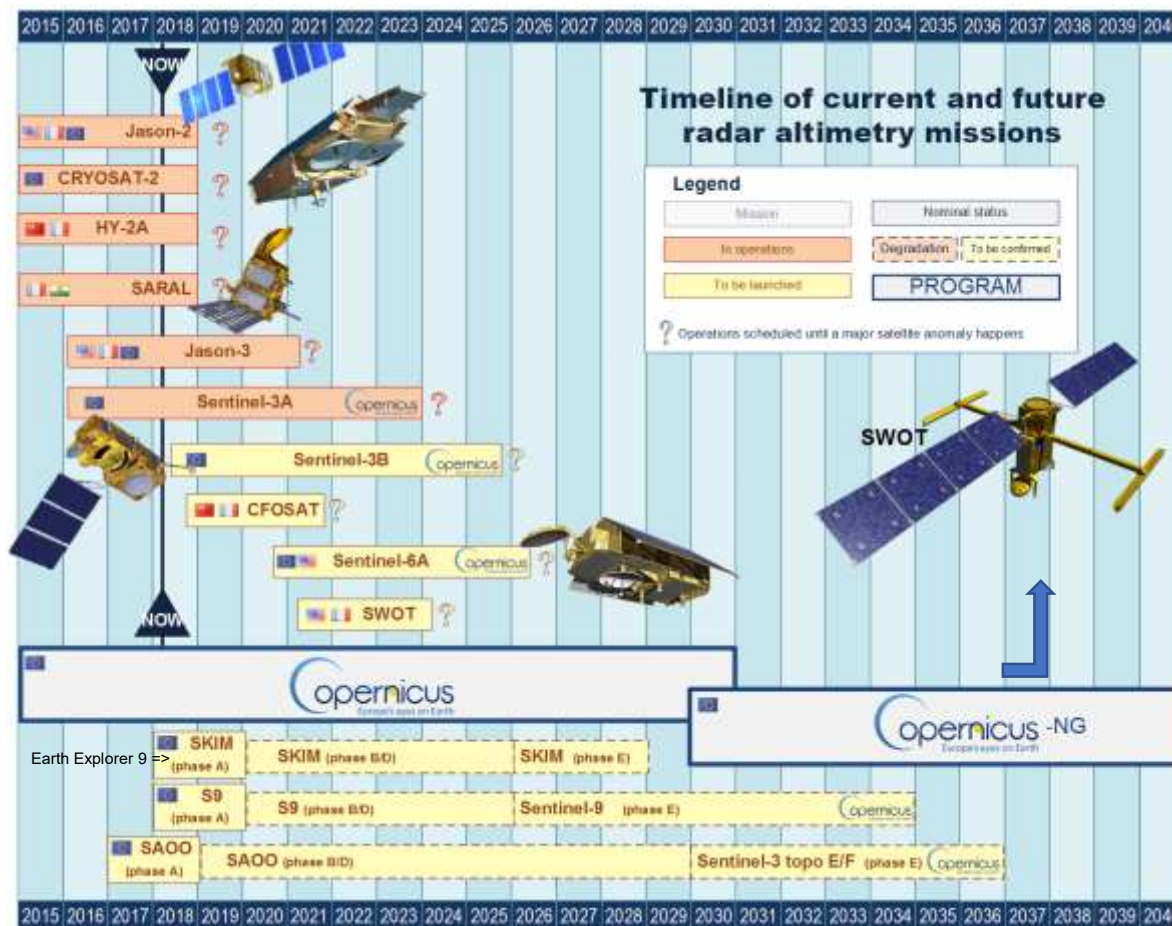


Ordre de grandeur des principaux processus océaniques. (Dérivé de Dickey et al, et Chelton et al 2001)



- **Ordre de grandeur de la capacité d'échantillonnage altimétrique pour une constellation à 2 – 4 altimètres (globale et meilleures conditions locales)**

Contexte prograMmatique



Les évolutions technologiques

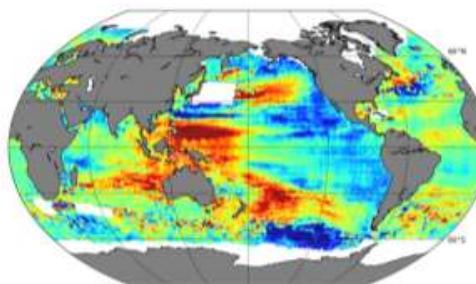
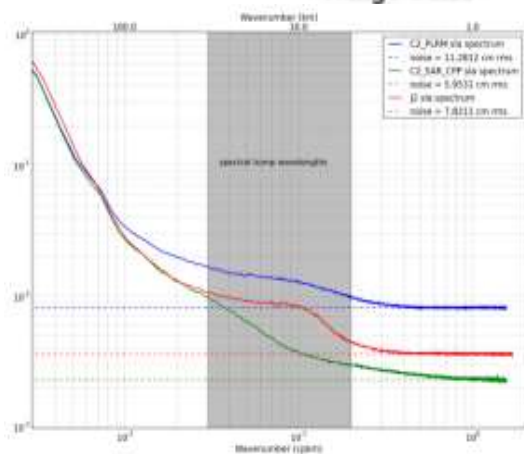
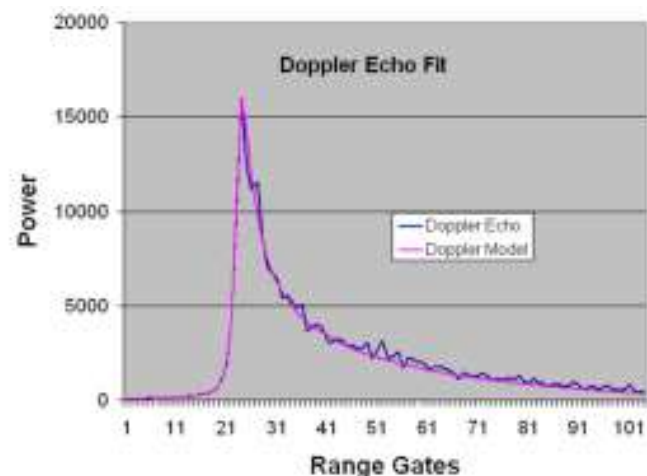
Bande Ka: résolution + élevée (SARAL, SWOT)

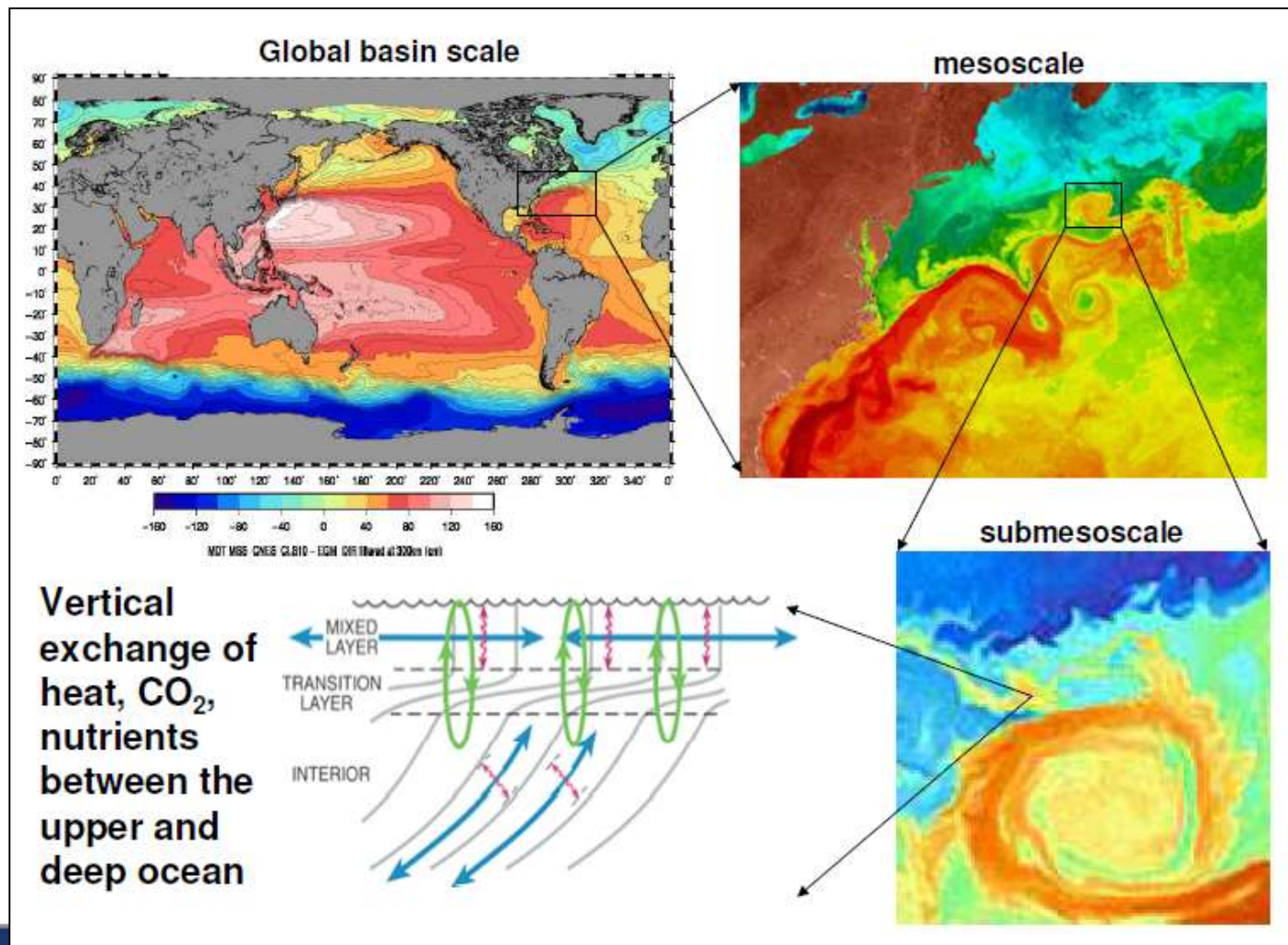
Mode SAR (Synthetic Aperture Radar) => Cryosat, Sentinel-3

Altimétrie à fauchée => SWOT, Suite Copernicus

Mesure directe des courants => de CFOSAT à SKIM

Cryosat et le mode SAR/Doppler





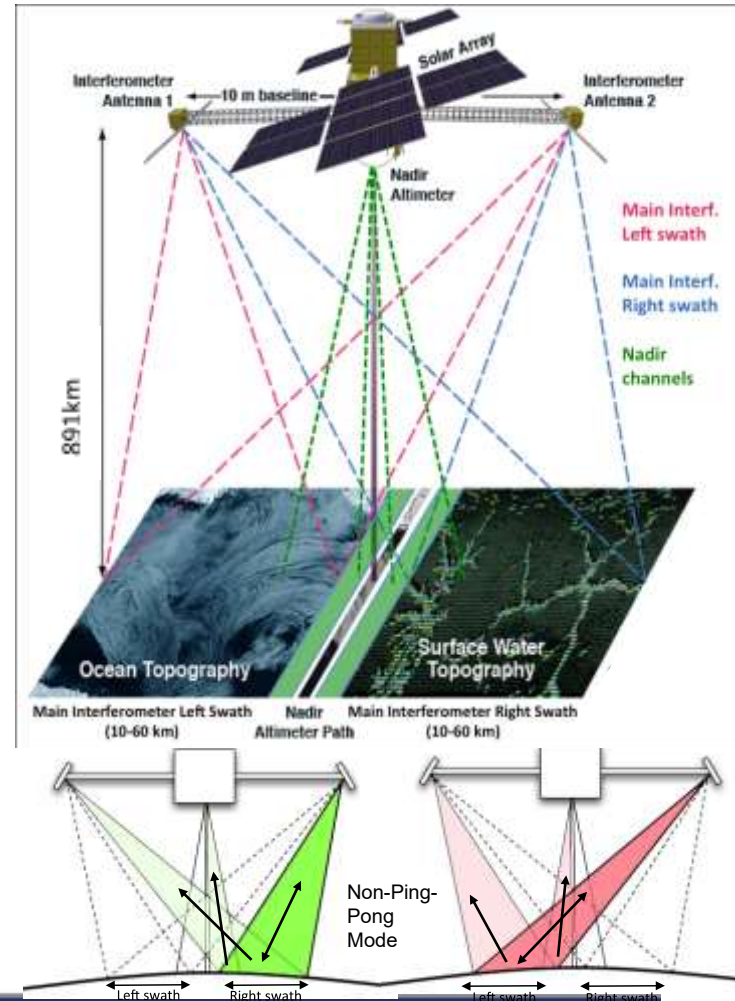
LA MISSION SWOT

Mission:

- Altimétrie à fauchée:
 - Pour l'océanographie (sub-mésoséchelle, 1cm @ 10km)
 - Pour l'hydrologie (rivières > 100m, lacs > 250x250m)
- Coopération CNES-NASA (+UKSA et CSA)
- Science mission duration of 3 years
- 3ans, orbite 891 km / 78° / 22j
- satellite: ~2000Kg, ~1900W
- Lancement ~2020

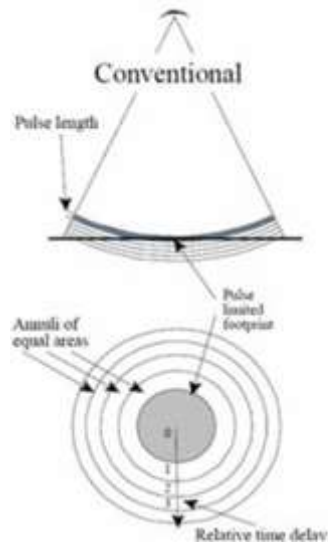
Charge utile

- Ka-band Radar Interferometer (KaRIn) , 2 fauchées de 50km.
 - Mesure du champ 2D de topographie de surface
 - résolution 50m eaux continentales
 - résolution 1 km océans (traitement à bord)
- Charge utile d'altimétrie conventionnelle:
 - Altimètre nadir classe Jason
 - Radiomètre micro-onde pour délai tropo
 - DORIS/GPS/Laser pour orbitographie précise



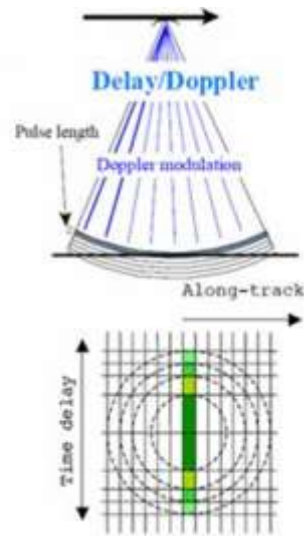
Résolutions: qu'est qui change?

Conventional : Jason - Saral



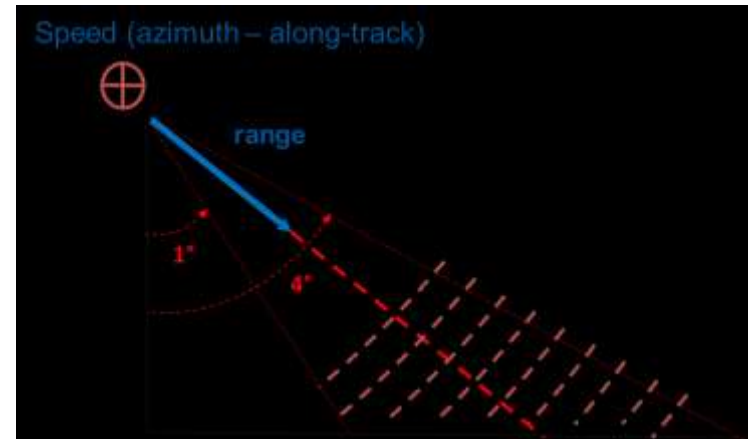
Res: ~10 km diam.
Posting: ~300 m

SAR alongtrack – CR2, Sentinel-3



Res:
300 m along-track
~10 km cross-track
Posting: 300 m

SAR interferometry – SWOT



LR ocean data :

Res: 500 m along-track x 500 m cross-track
Posting: 250 m along-track x 250 m cross-track
2D SSH measurements

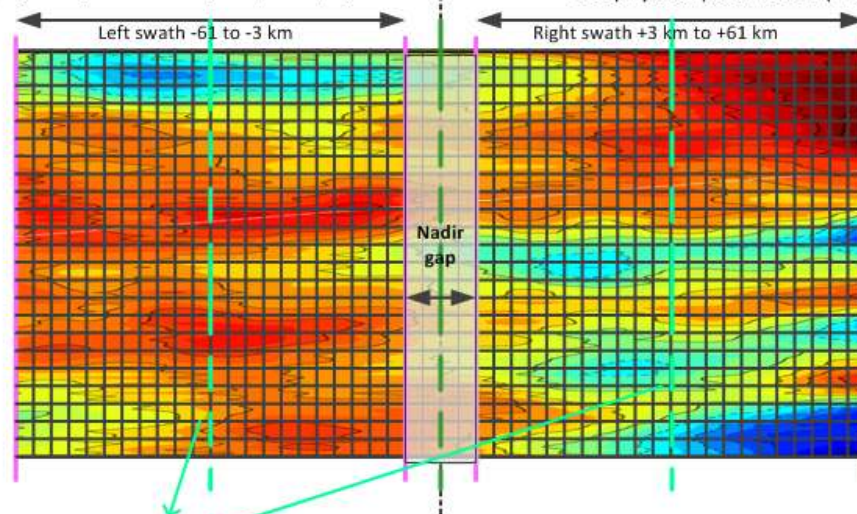
Des mesures en 2D

2D data provided in swath

Latitude, Longitude
Surface type
SSH, σ_0 , SWH
Associated uncertainties, quality indicators
Ice and rain flags
Corrections (geophysical and calibration)
Geophysical parameters (MSS, tides, ...)

2D data provided in swath

Latitude, Longitude
Surface type
SSH, σ_0 , SWH
Associated uncertainties, quality indicators
Ice and rain flags
Corrections (geophysical and calibration)
Geophysical parameters (MSS, tides, ...)



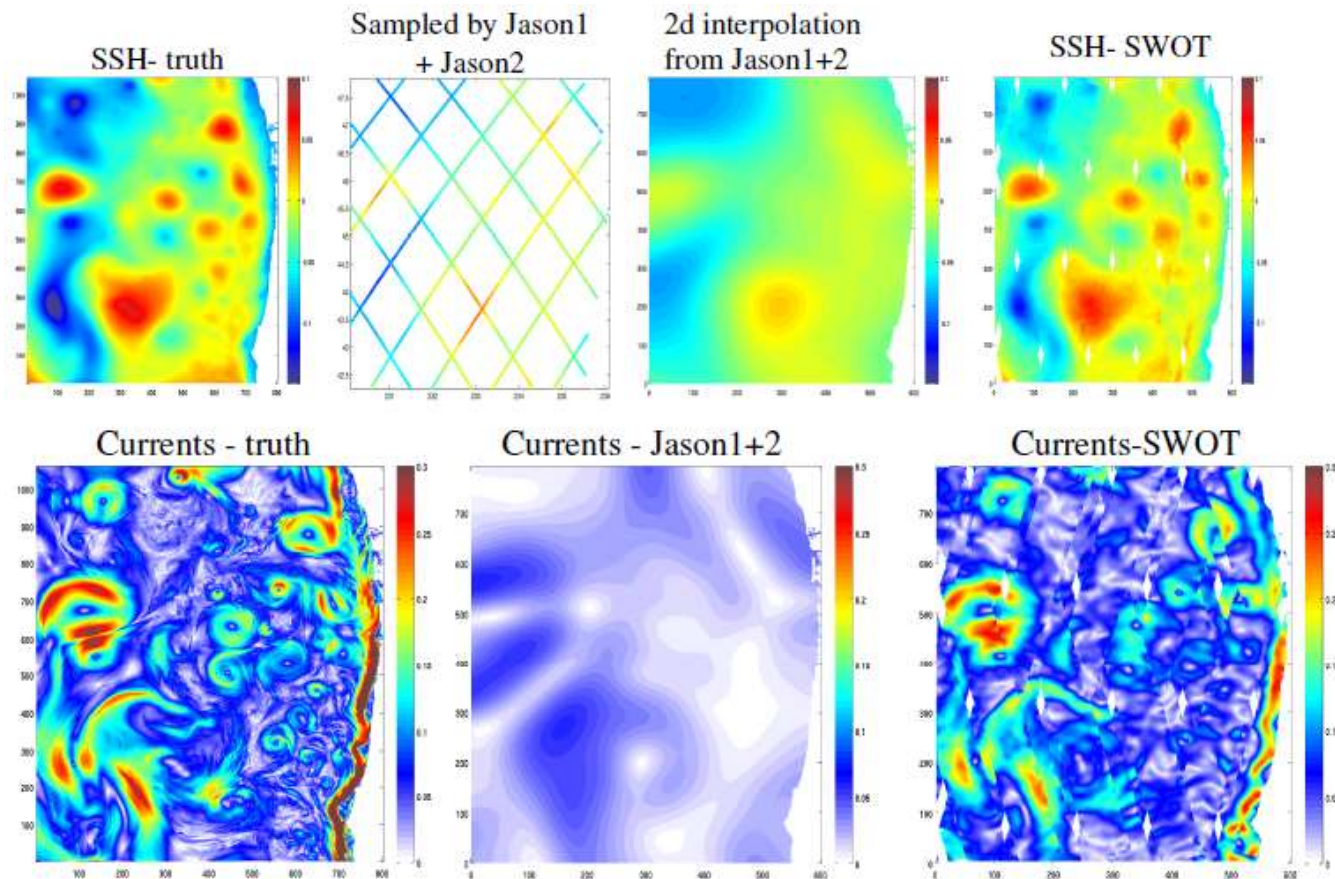
1 value per swath

Radiometer BT measurement
in their geometry (at $+2.27^\circ$ / -2.43° TBC in the swath)
Other radiometer parameters

1 value at nadir along track

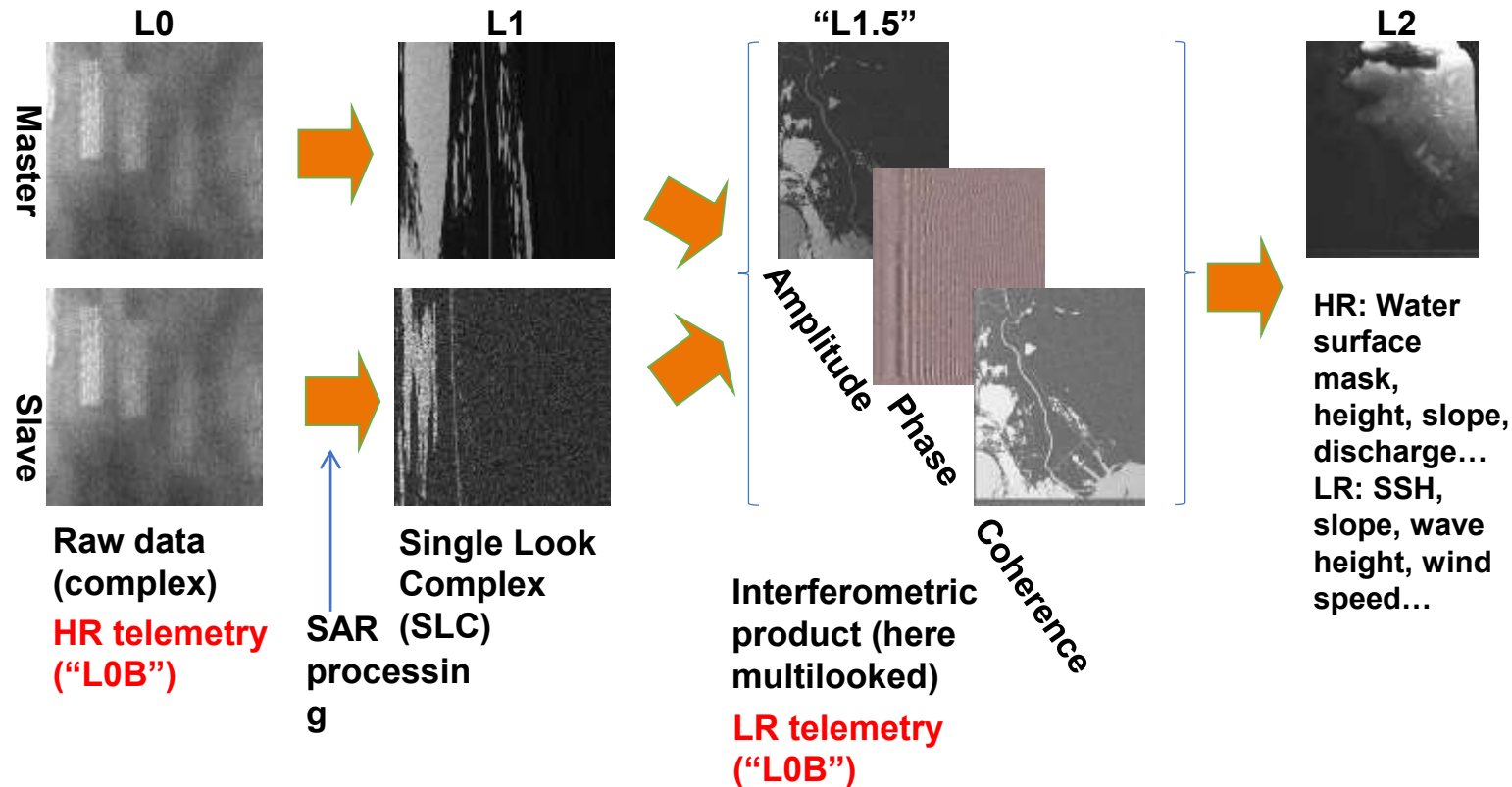
Time tag
Orbit data
Nadir altimeter measurement (Jason like product in a separate file)

SWOT => restitution des courants fines échelles

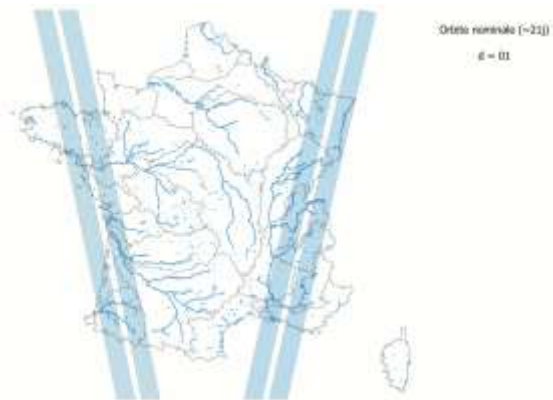


KaRIn/SWOT product levels

From raw data to geophysical products...



SWOT: quel produit hydrologie?



LE PRODUIT RIVIÈRE: CAS DE PLUSIEURS BRAS

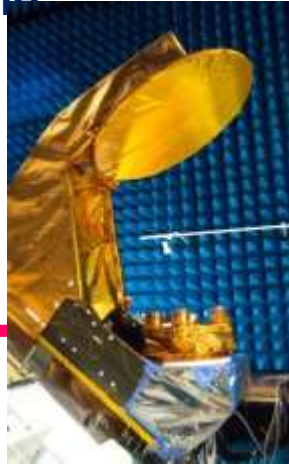


Coopération France - chine

➤ **Lancement fin 2018**

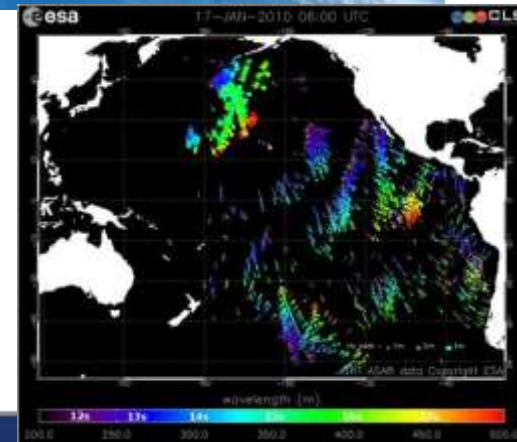
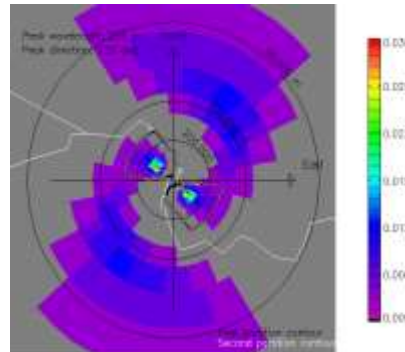
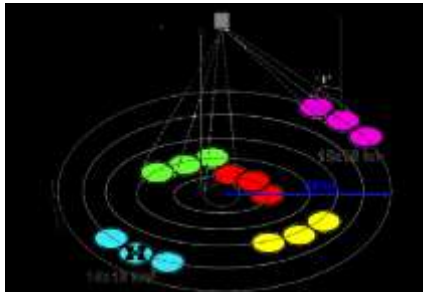
SWIM, vagues

SCAT, vent



Mesure conjointe vent et vagues => état de mer

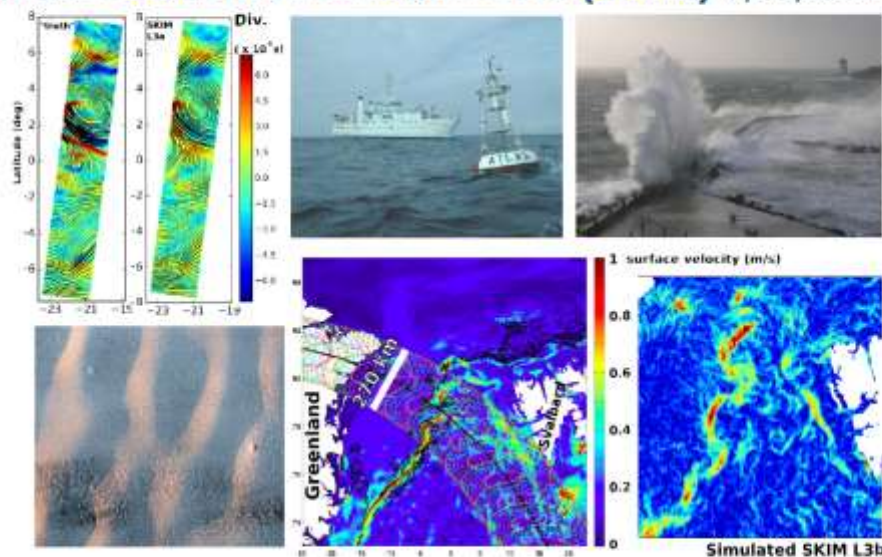
PI: Danièle Hauser (CNRS/LATMOS)



Après CFOSAT: les courants de surface... ?



The **Surface Kinematics Multiscale (SKIM)** : proposal for ESA EE9



Fabrice Ardhuin (LOPS / IUEM & Ifremer)
and the SKIM team

<https://www.facebook.com/SKIM4EE9>

<http://tinyurl.com/SKIMonRG>

<http://www.umn-lops.fr/Projets/Projets-actifs/SKIM>

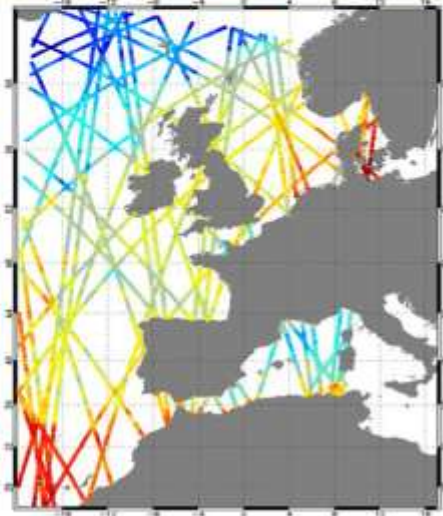


Vers de l'altimétrie à fauchée en opérationnel dans Copernicus?

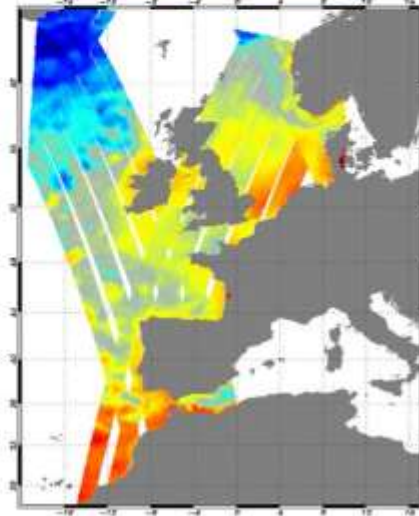
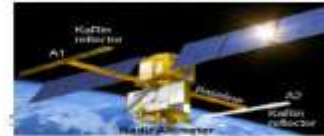
Observing System Simulation Experiments (OSSEs)

Spatial coverage of different constellation of satellite altimeters in the Iberian-Biscay-Ireland (IBI) region, during 5 days (assimilation cycle → 10-day half cycle of wide swath data).

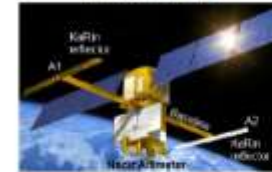
Jason-2, Cryosat-2, Sentinel 3a



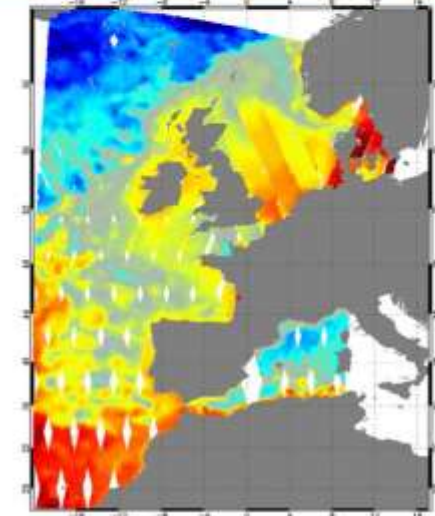
Swath-1



Swath-1



Swath-2



Conclusion

Une technique essentielle pour l'observation des océans... et le reste

Un historique extrêmement riche, et une communauté française de premier plan

- ❖ Sur la technique instrumentale
- ❖ Sur les traitements (sans oublier orbitographie et géodésie)
- ❖ Sur la science dans tous les domaines
- ❖ Sur les applications opérationnelles

- ❖ Et ce n'est pas fini!