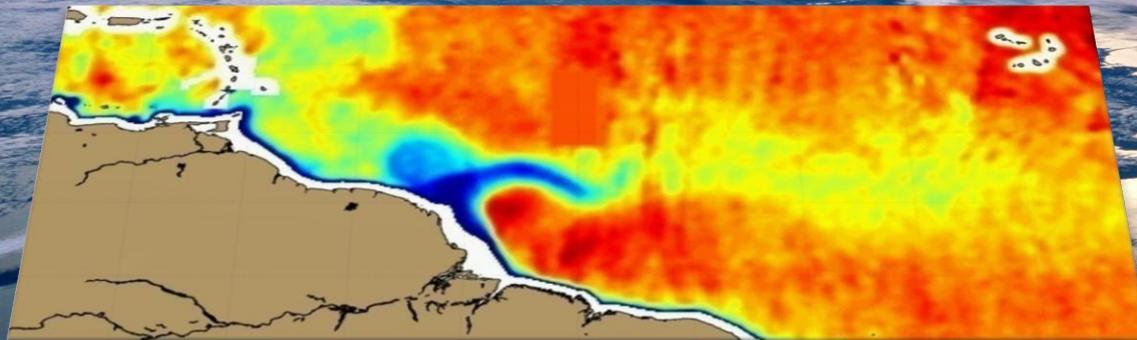


Le centre d'Expertise du CATDS sur la Mesure de la salinité à la surface des océans depuis l'Espace

Nicolas Reul

Responsable scientifique CATDS à l'IFREMER





Qui sont les acteurs principaux de ce centre?

Comité de Pilotage Scientifique:

N. REUL (IFREMER), J. BOUTIN (LOCEAN) & T. DELCROIX (IRD/LEGOS)



- Physique et traitements de la Mesure SMOS
- Activités de Calibration/Validation de SMOS:
 - ✓ Déploiement, traitement & analyse des mesures en mer
 - ✓ Campagnes aéroportées
- Océanographie

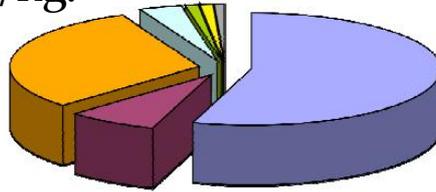
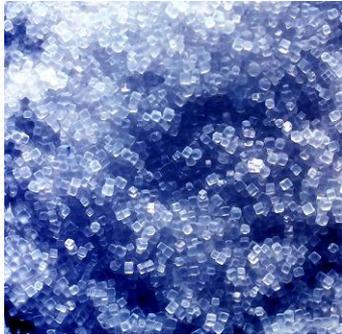


Qu'est-ce que la salinité ?

Salinité des océans \equiv concentration en sels ioniques dans l'eau de mer
A la surface des océans, on l'appelle "SSS"

Unité = PSU (Practical Salinity Unit)

1 PSU \approx 1 g/kg.



Chloride (Cl ⁻):	19 g
Sodium (Na ⁺):	11 g
Sulphate (SO ₄ ⁻⁻):	3 g
Magnesium (Mg ⁺⁺):	1.5 g
Calcium (Ca ⁺⁺):	0,35 g
Potassium (K ⁺):	0,35 g
Others :	0,00.. g

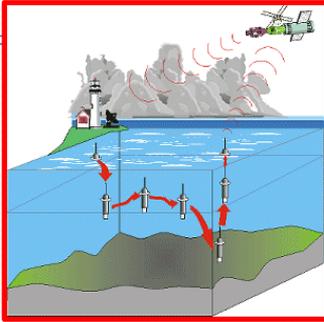
Total \approx 35 g/kg



(Mean chemical composition)

99% des eaux océaniques ont une salinité entre 33.1 et 37.2:
=>une variation globale de 3.31% à 3.72% de la concentration en sels !

Sa mesure en mer



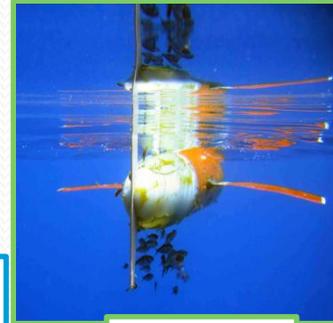
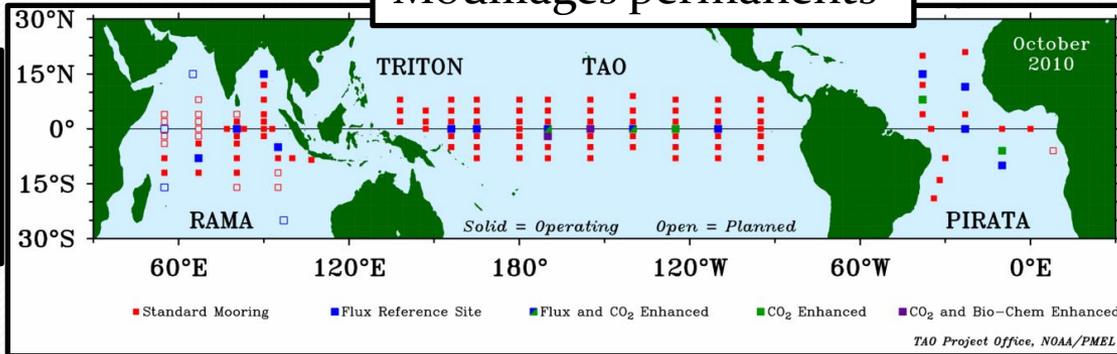
Profileurs du Réseau Argo



Thermo-salinographes
Embarqués sur Navires
De recherches et d'Opportunité



Mouillages permanents



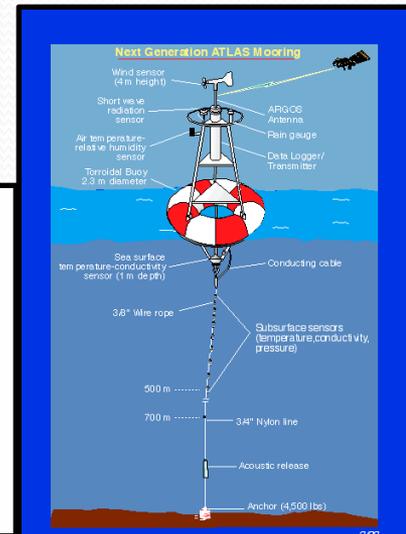
Gliders



'Drifters' de surface

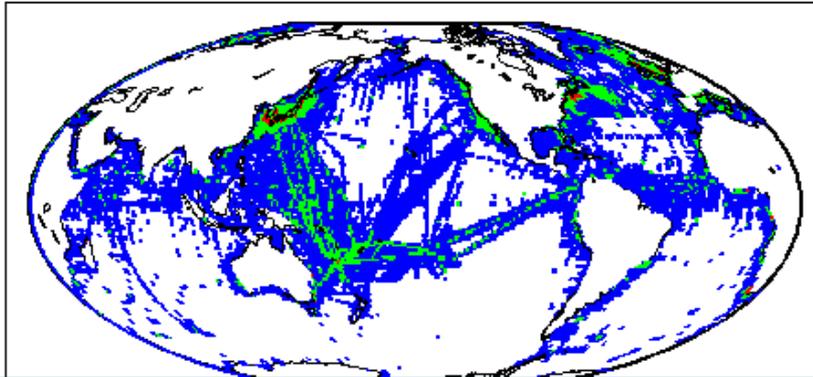


Mammifères équipés



Densité des observations à la surface entre 1874 et 2002

Number of Observations by 1° Square



Blanc - $N < 10$
Bleu - $10 < N < 100$
Vert - $100 < N < 1000$
Rouge - $1000 < N$

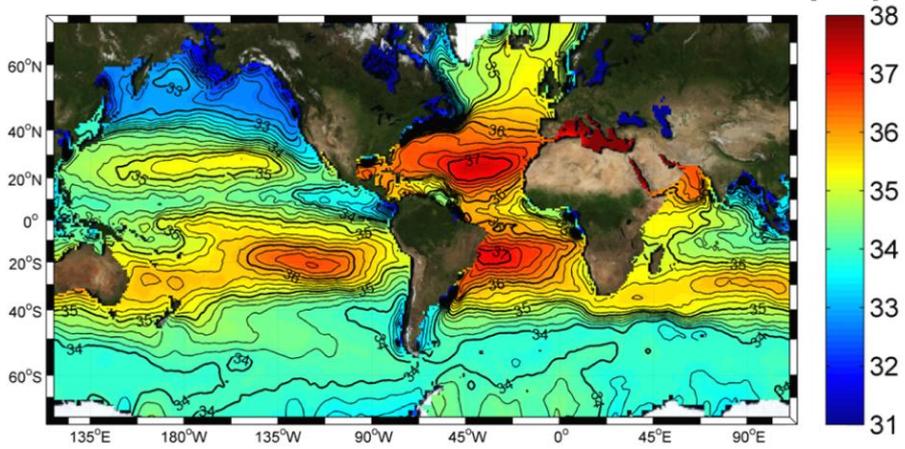
F. Bingham et al, 2002

1.3 million d'observations de la SSS distribuées sur les océans du globe depuis 125 ans:

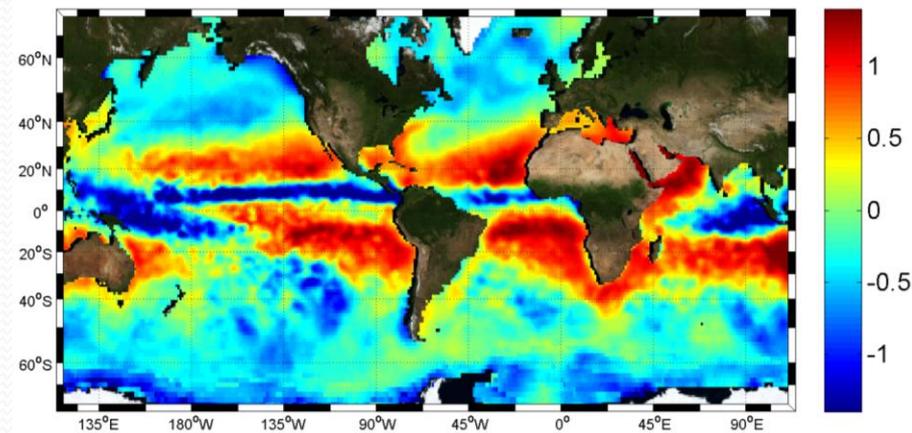
- ✓ Aucunes mesures dans 27% des surfaces océaniques élémentaires de $1^\circ \times 1^\circ$, sans compter les zones océaniques arctiques.
- ✓ 70% de ces surfaces présentent au plus 10 observations historiques de la SSS
- ✓ 28% de toutes les observations de SSS ont été réalisées dans les zones côtières
- ✓ Jusqu'à environ 1960, il n'y a pas eu plus de 10,000 observations/an, soit 1 observation par cellule de $4^\circ \times 4^\circ$
- ✓ Depuis 2002, très nette montée en puissance de la densité des mesures

Comprendre les Interactions entre la Circulation Océanique, le cycle Global de l'Eau et le Climat en mesurant la salinité à la surface des océans

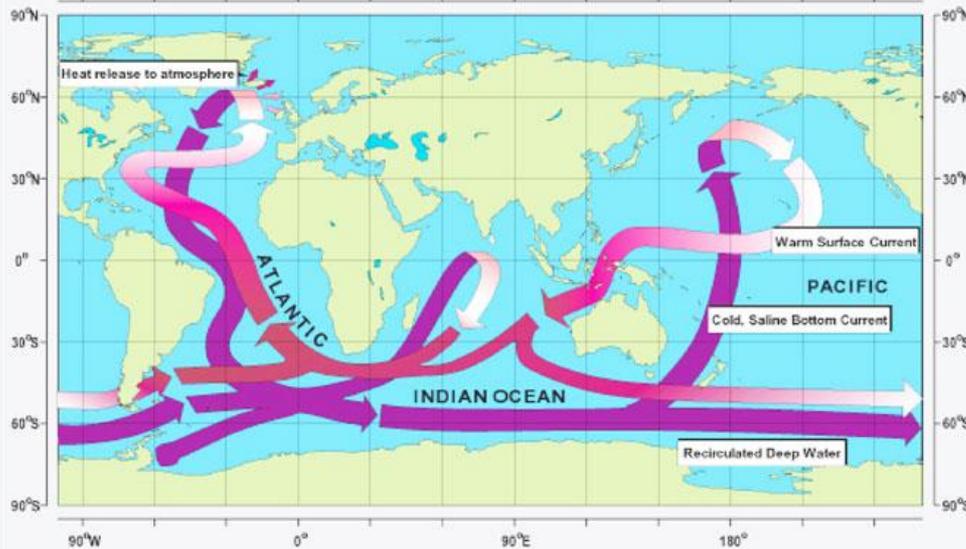
Climatologie de la distribution de SSS [PSU]



Flux Net Evaporation-Précipitations [mm/an]



$$\rho_{sw}(S,T) = \rho_{fw}(T) + b(T)S + c(T)S^{3/2} + dS^2$$



Les variations de salinité sont déterminées par celles des précipitations, de l'évaporation, des débouchés de rivières et de la fonte & prise des glaces de mer

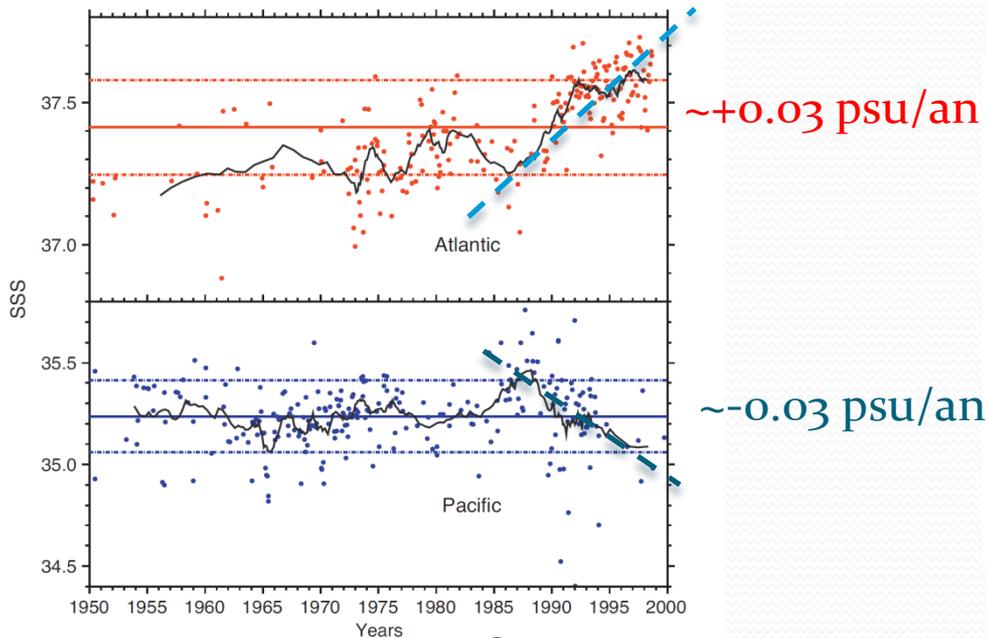
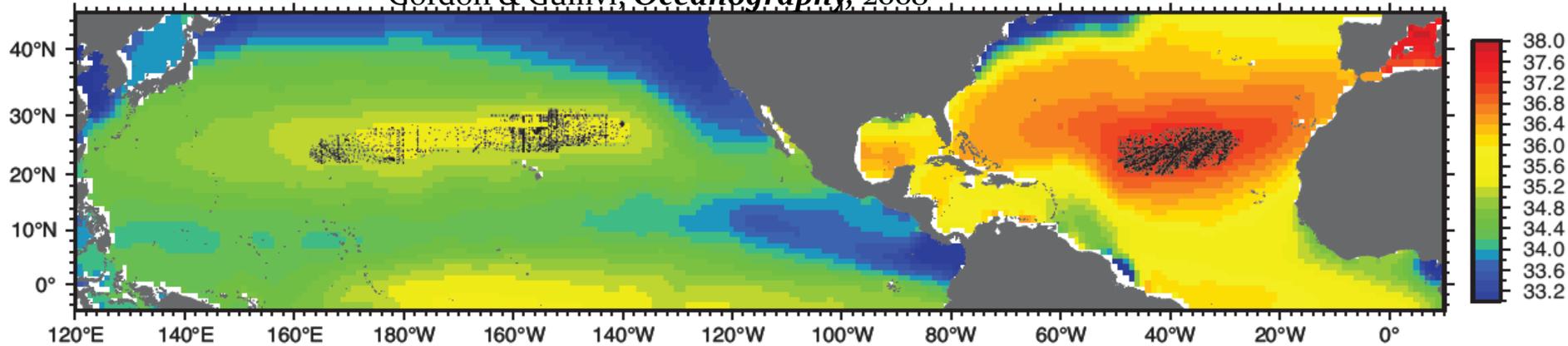
La Salinité affecte la densité de l'eau de mer, qui gouverne la circulation océanique 'thermo-haline' et le climat:

Sa mesure permettra de mieux contraindre les estimations des courants par l'Altimétrie

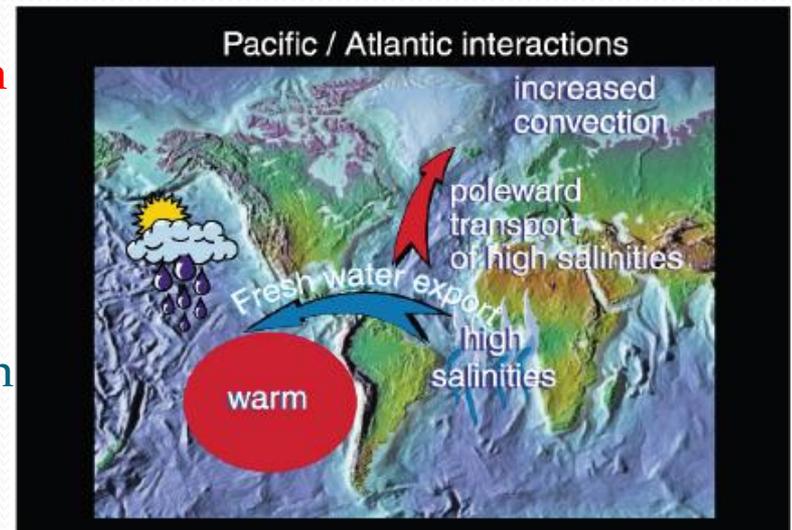
La salinité de surface: un indicateur climatique

Tendances de La salinité à la surface des Océans Pacifique & Atlantique

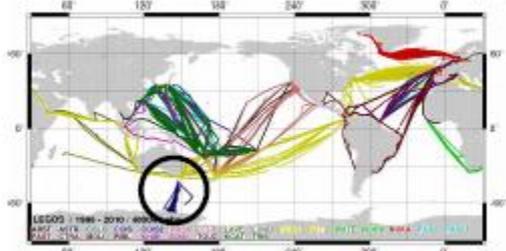
Gordon & Guilivi, *Oceanography*, 2008



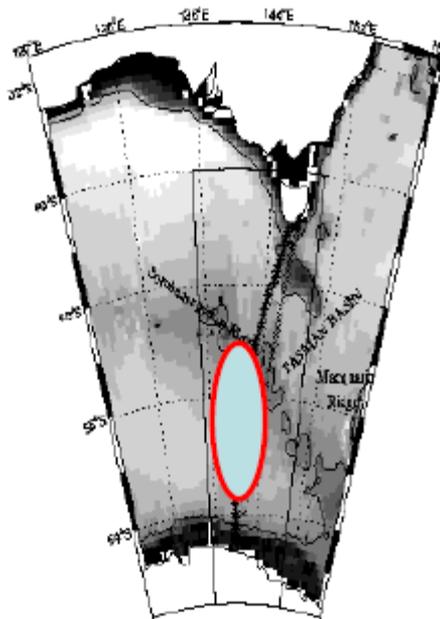
1950 1987 2000



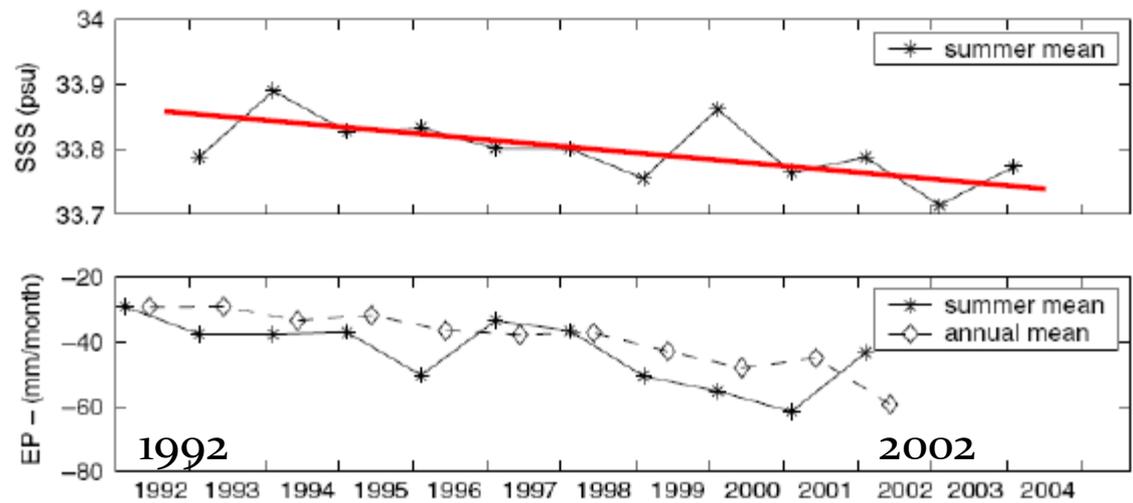
Tendances de La salinité à la surface de l'Océan Antarctique



10 sections /an
depuis 1993



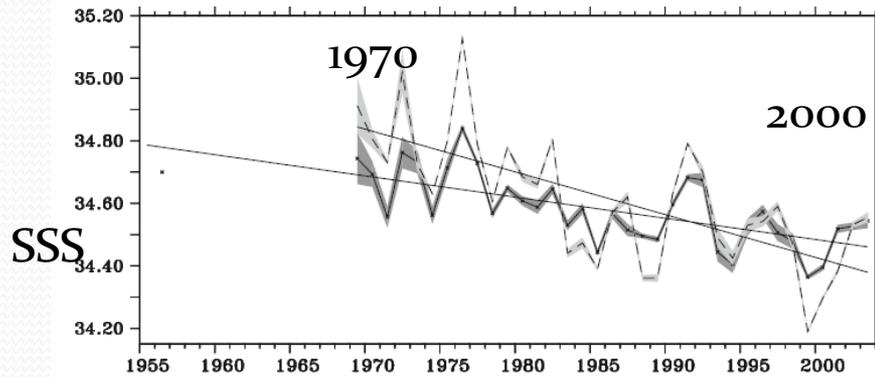
Decadal decrease in SSS related to increase in P



(Morrow et al., 2008)

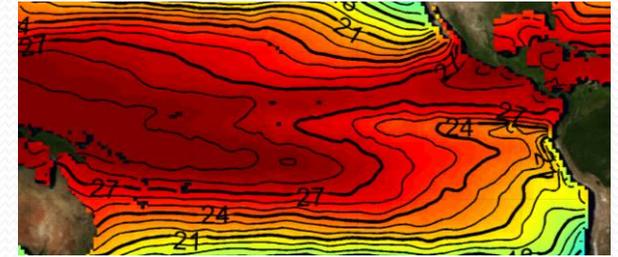
Tendances de La salinité de surface dans le réservoir d'eau chaude ('Warm Pool') du Pacifique Tropical Ouest

L'extension du réservoir d'eaux chaudes de la Warm Pool (surface de l'Europe, eaux $>28^{\circ}\text{C}$) s'accompagne d'une désallure

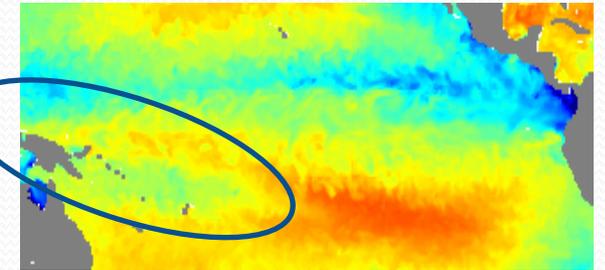


Cravatte et al., 2009

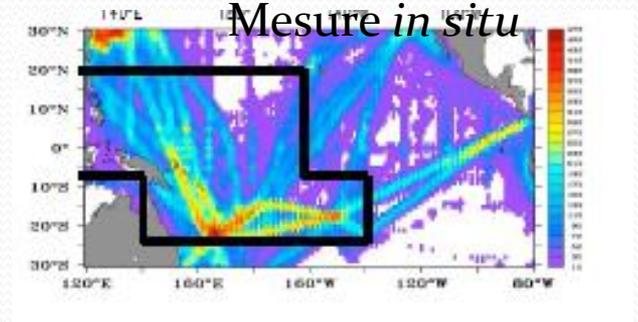
Température



Salinité

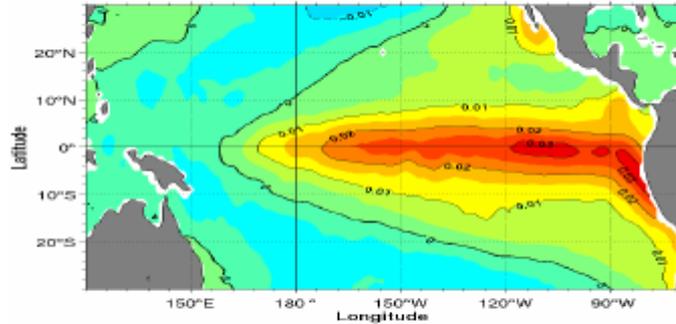


Mesure *in situ*



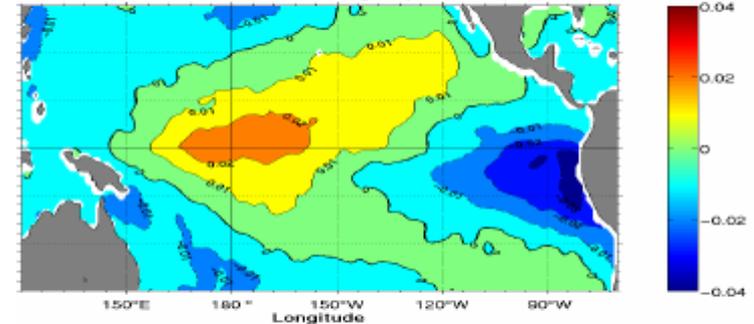
La pincée de sels qui change El Niño

Eastern Pacific El Niño



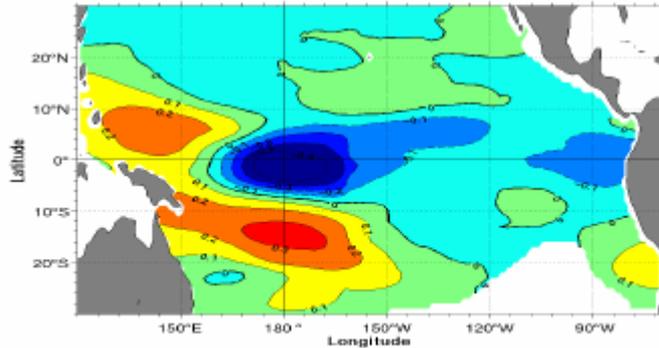
SST

Central Pacific El Niño

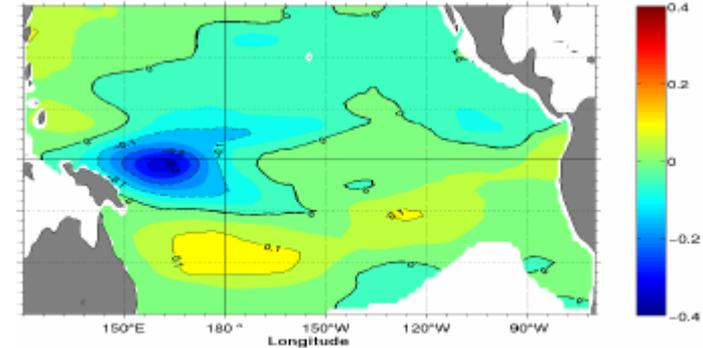


SST

SSS Cluster 3 (44/379 maps)



SSS Cluster 4 (132/379 maps)

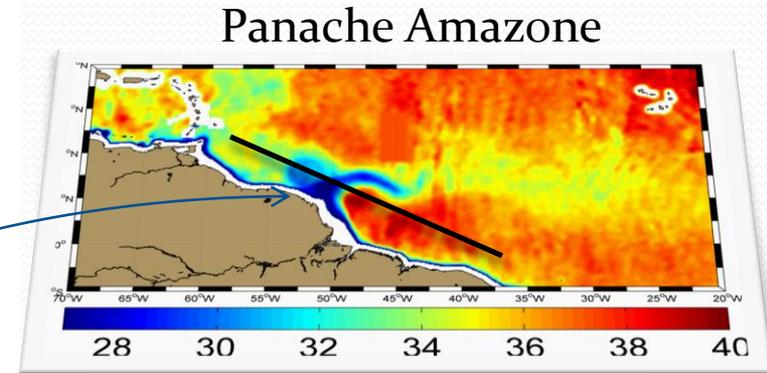
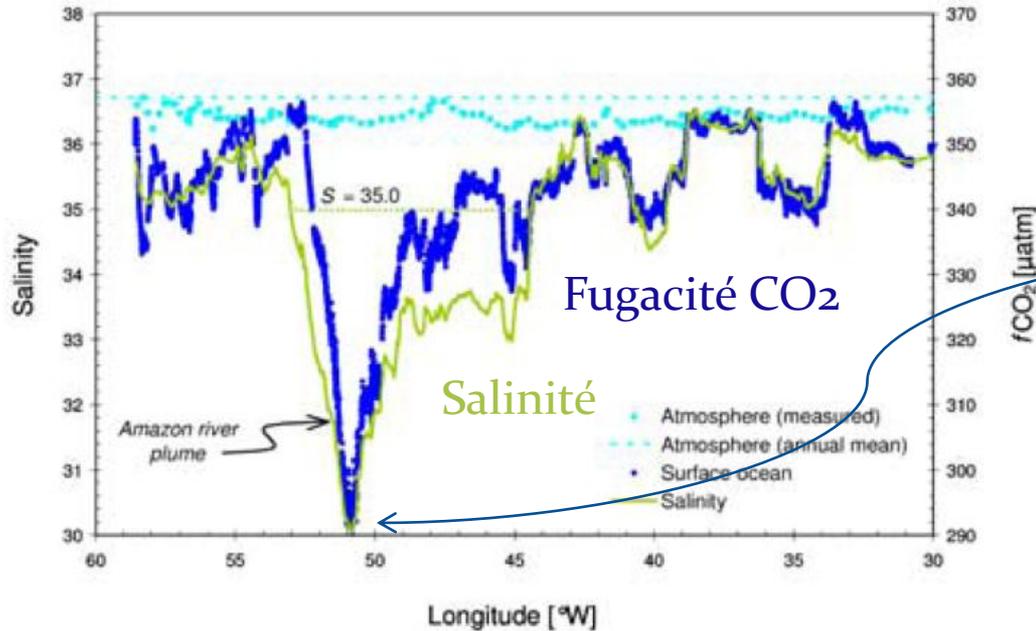


Christophe Maes, 2002
Singh et al., 2010

la salinité de l'océan joue un rôle important dans la mise en place du phénomène. L'étude de ce paramètre permettrait d'affiner les modèles de prédiction d'El Niño.

SSS & CO₂

L'océan est le principal puits de carbone planétaire, mais il est saturé et semble commencer à s'acidifier

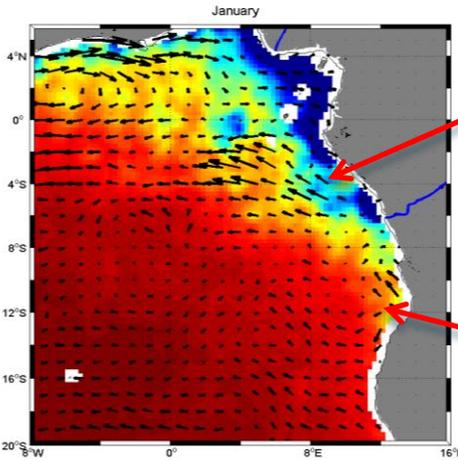


Kortzinger, 2000

Via ses liens avec l'Alcalinité (capacité de résister à une attaque acide), la salinité des eaux de surface est un paramètre clef **des flux en CO₂ à la surface océanique**

Salinité de surface et Gestion des Pêches

La salinité est un des déterminants principaux de l'environnement où vivent les poissons et toute autre faune et flore marine.



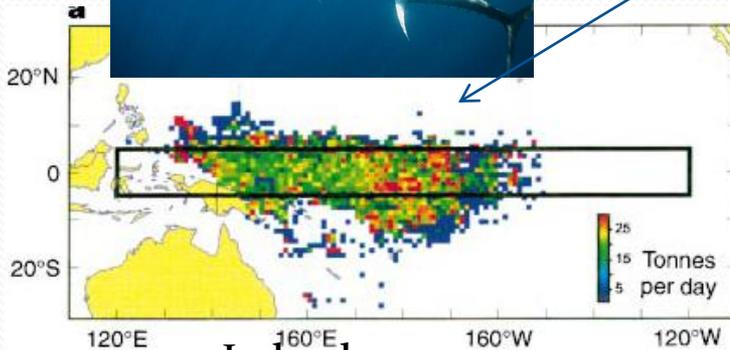
S. Maderensis vit dans les eaux chaudes et peu salées (effets des pluies, du Niger, du Congo,..)



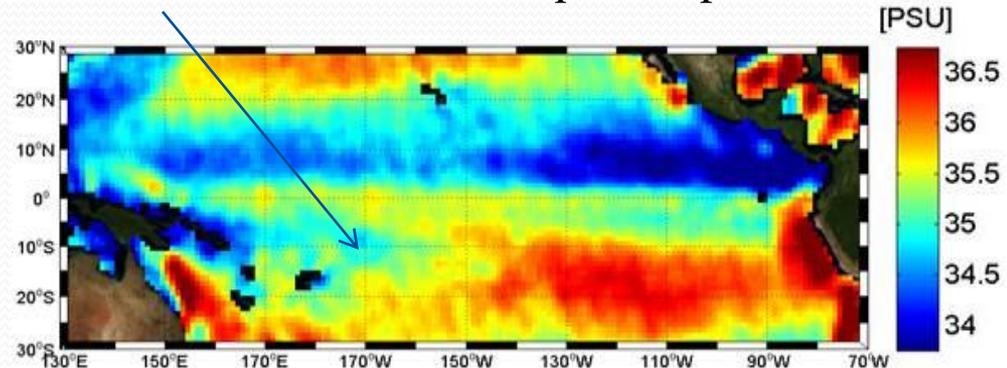
S. Aurita est inféodée aux eaux froides des upwellings du Bengela



Prises de Thon & Front salins du Pacifique Tropical Ouest



Lehodey, 1997



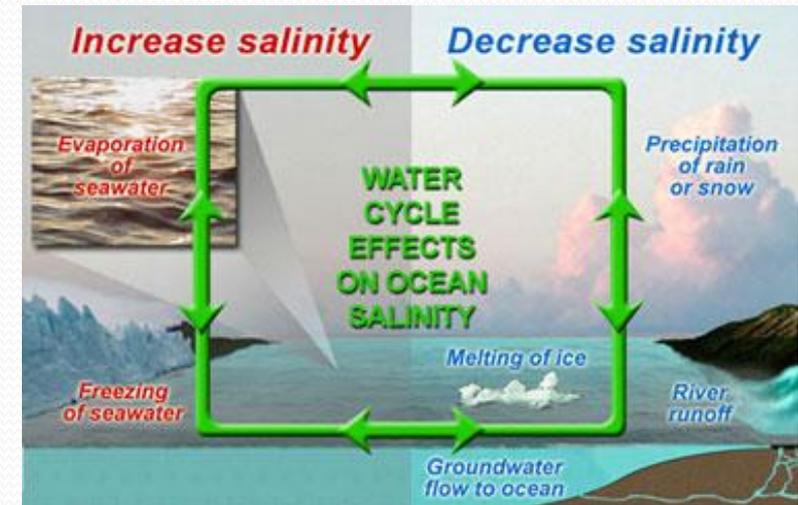
Pourquoi mesurer la SSS depuis l'Espace ?

•Rôle clef de la salinité pour la dynamique océanique, la biologie et le climat

- ✓ Cycle planétaire de l'eau (flux d'eau douce E-P-R en surface)
- ✓ Circulation thermo-haline
- ✓ Système climatique couplé océan-atmosphère (e.g., El Niño, taux d'absorption océanique en CO₂)
- ✓ gestion des pêches

•Manque de données globales de la salinité de surface

- ✓ Faiblesse des climatologies et limites des mesures opérationnelles in situ



GOOS (Global Ocean Observing System) scientific plan :

« Il y a un besoin clair et urgent d'obtenir des cartes globales de SSS à partir de données satellites » avec une précision de l'ordre de **~0.1-0.2 psu tous les mois sur des surfaces de 100-200 km²**

Deux missions Spatiales internationales dédiées



SMOS

AQUARIUS/SAC-D



Lancée Nov 2009



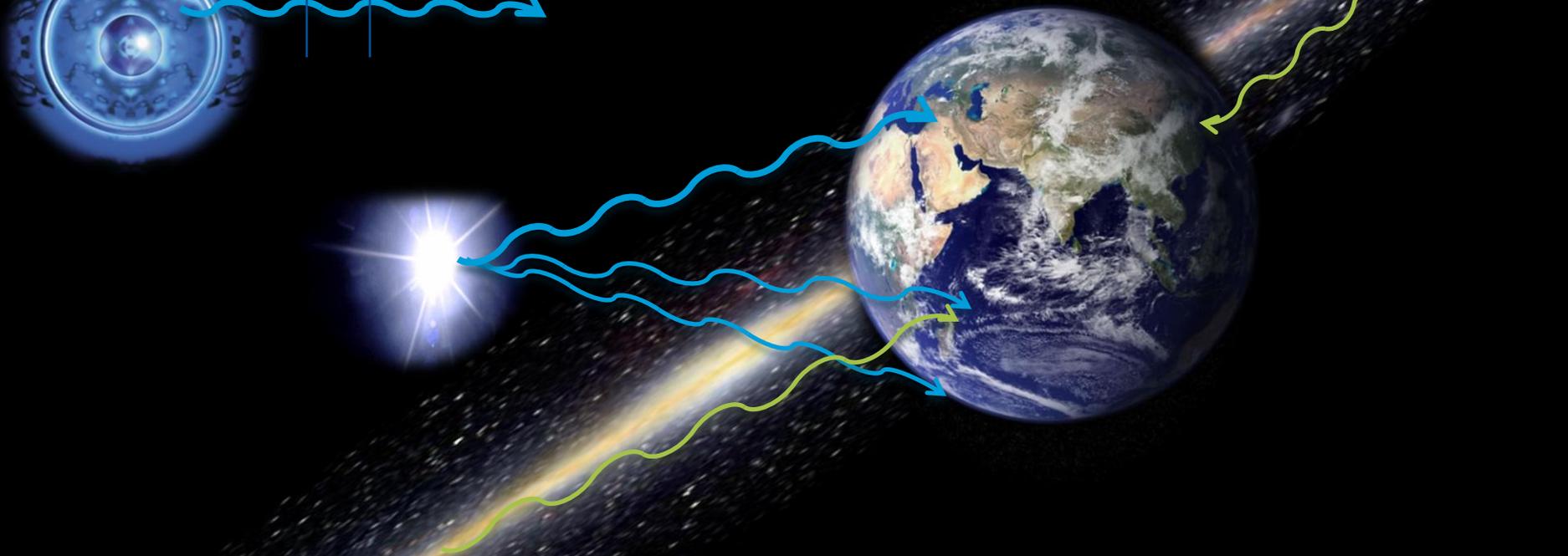
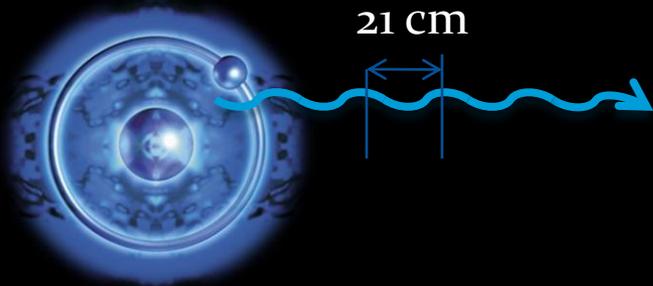
Lancement prévu Avril 2011

Physique de La Mesure

Mais comment diable fait-on pour mesurer des variations en taux en sels de 0.1 g/kg d'eau de mer dans les 1^{er} cm sous la surface océanique depuis 750 Km d'altitude ?



Un changement d'état d'énergie de l'atome d'Hydrogène produit des radiations électromagnétiques micro-ondes pulsant à la fréquence de 1420 MHz (bande L) \equiv longueur 21 cm



L'hydrogène étant le principal constituant du Soleil et de la plupart des étoiles, la terre est constamment « éclairée » par des radiations en bande L

Voie Lactée



Soleil

IONOSPHERE

TEMPÉRATURE APPARENTE

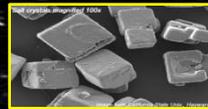
IONOSPHERÈ

ATMOSPHERE

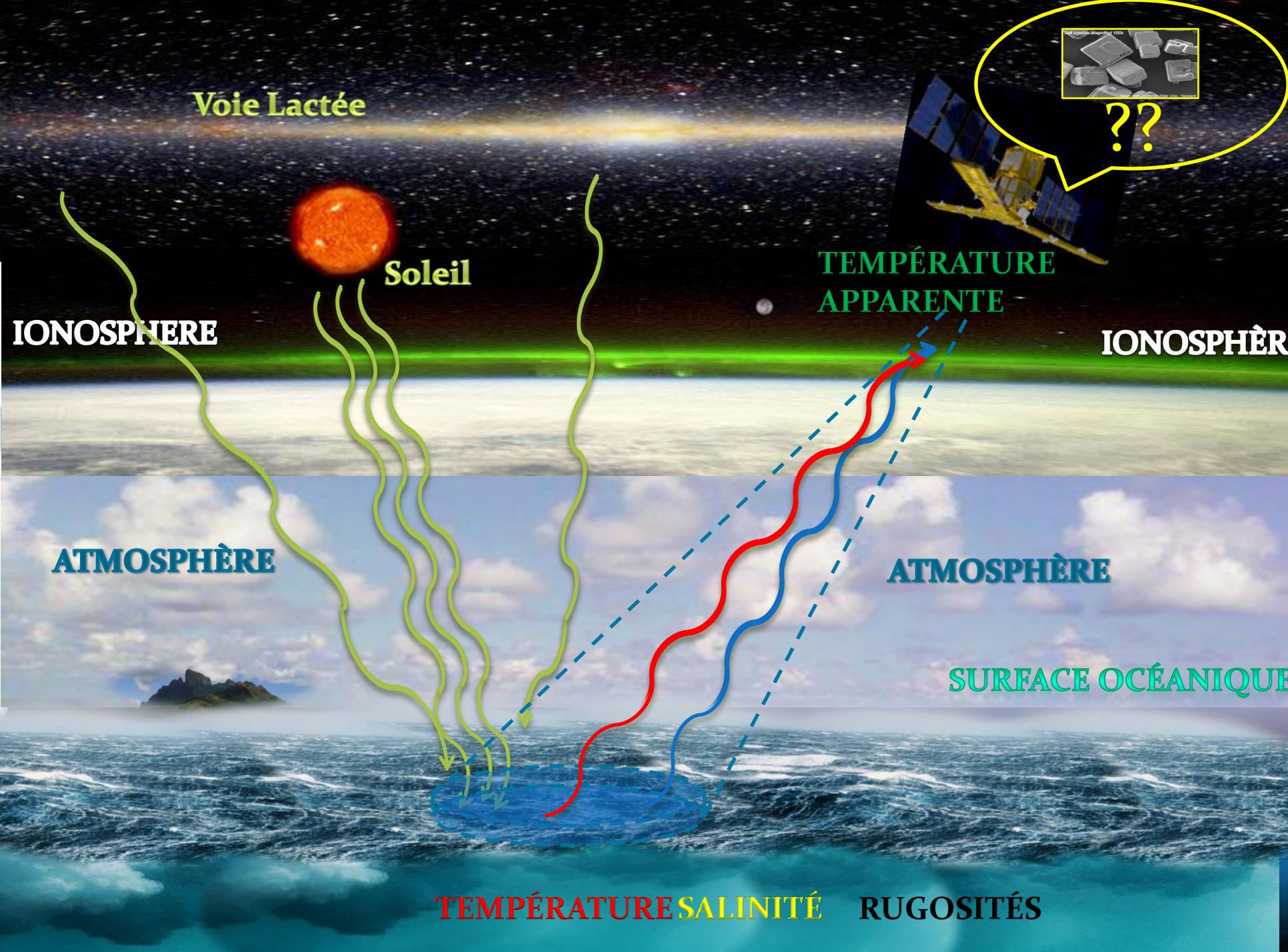
ATMOSPHERE

SURFACE OCÉANIQUE

TEMPÉRATURE SALINITÉ RUGOSITÉS



??

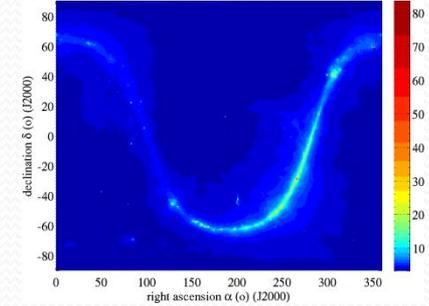


Mesurer la SSS depuis l'Espace: un défi !

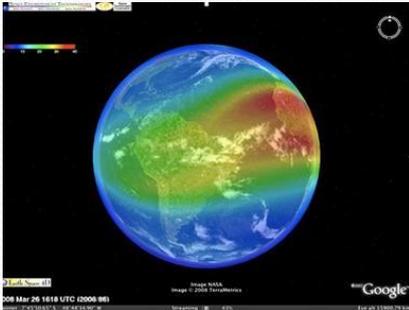
Mesures SMOS



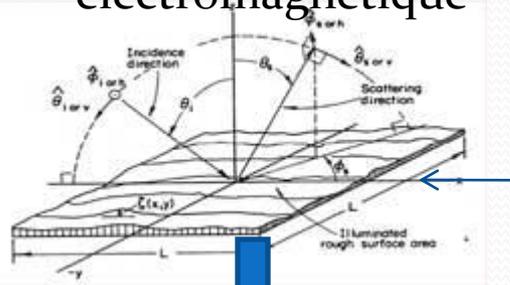
Brillance céleste



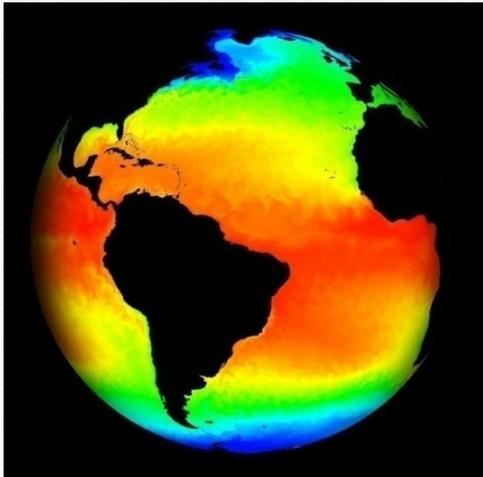
Ionosphère



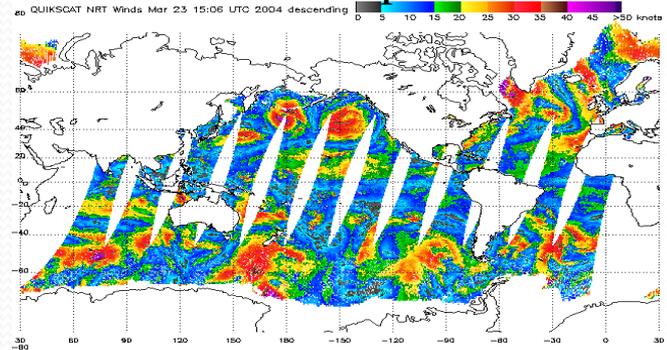
Modélisation électromagnétique



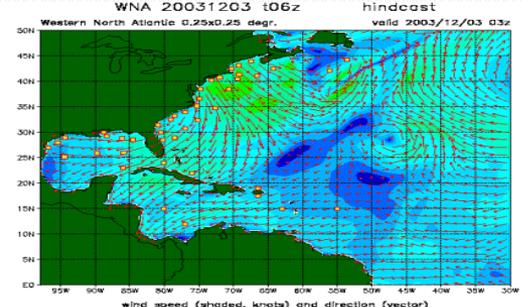
Température de la surface



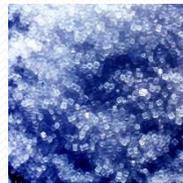
Atmosphère



Etats de mer



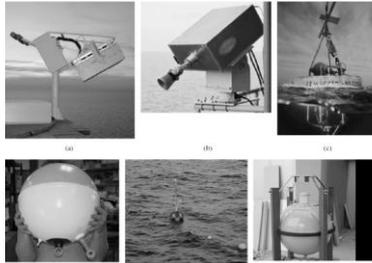
Sels



Campagnes de mesures Préparatoires



The WISE 2000 and 2001 Field Experiments



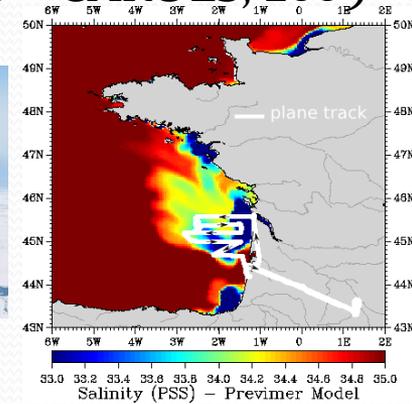
FROG, 2004



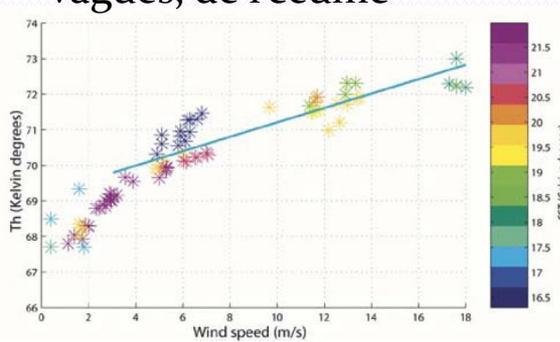
CoSMOS, 2006



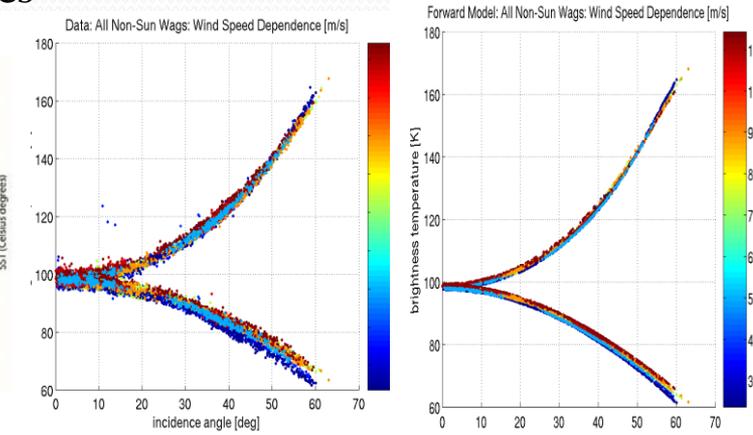
CAROLS, 2009



Mesurer l'Impact du vent, des vagues, de l'écume



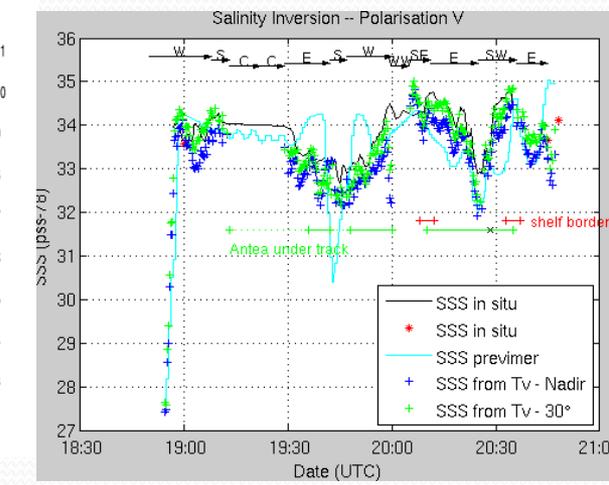
Valider les modèles électromagnétiques



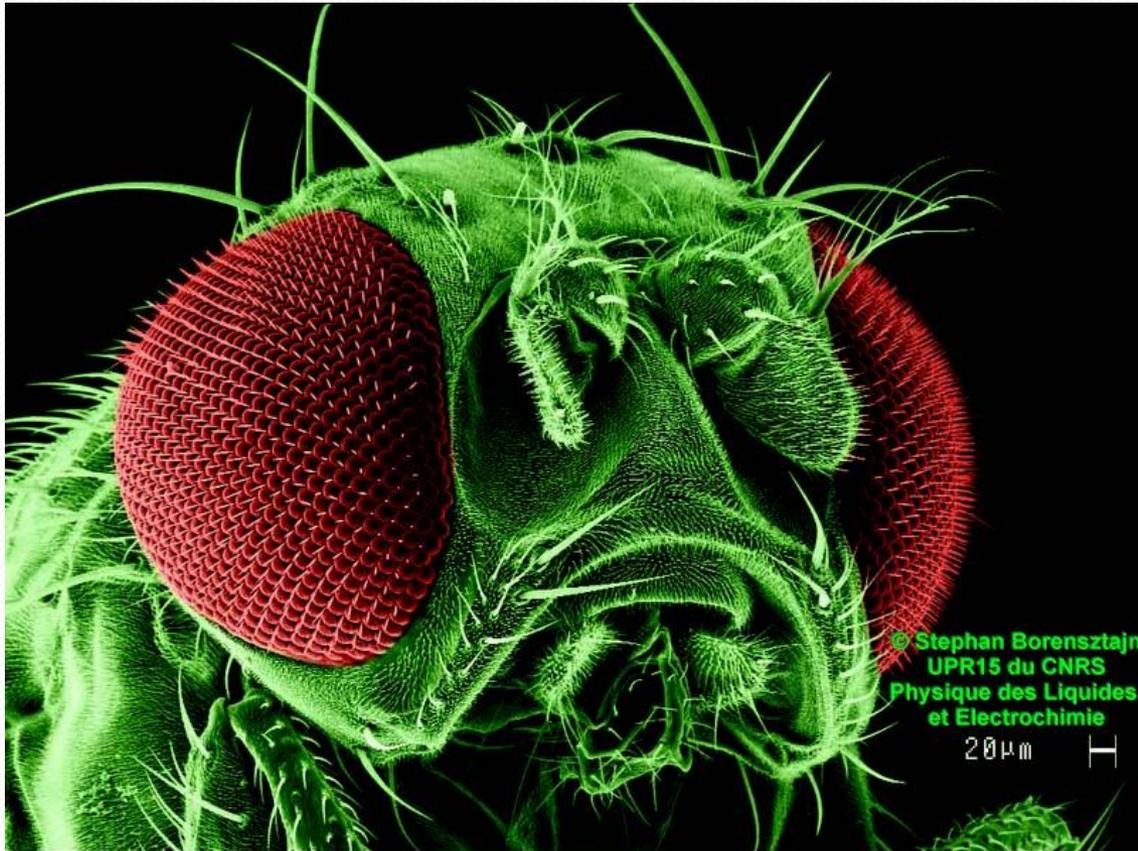
Mesures

Modèles

Tester l'inversion en SSS

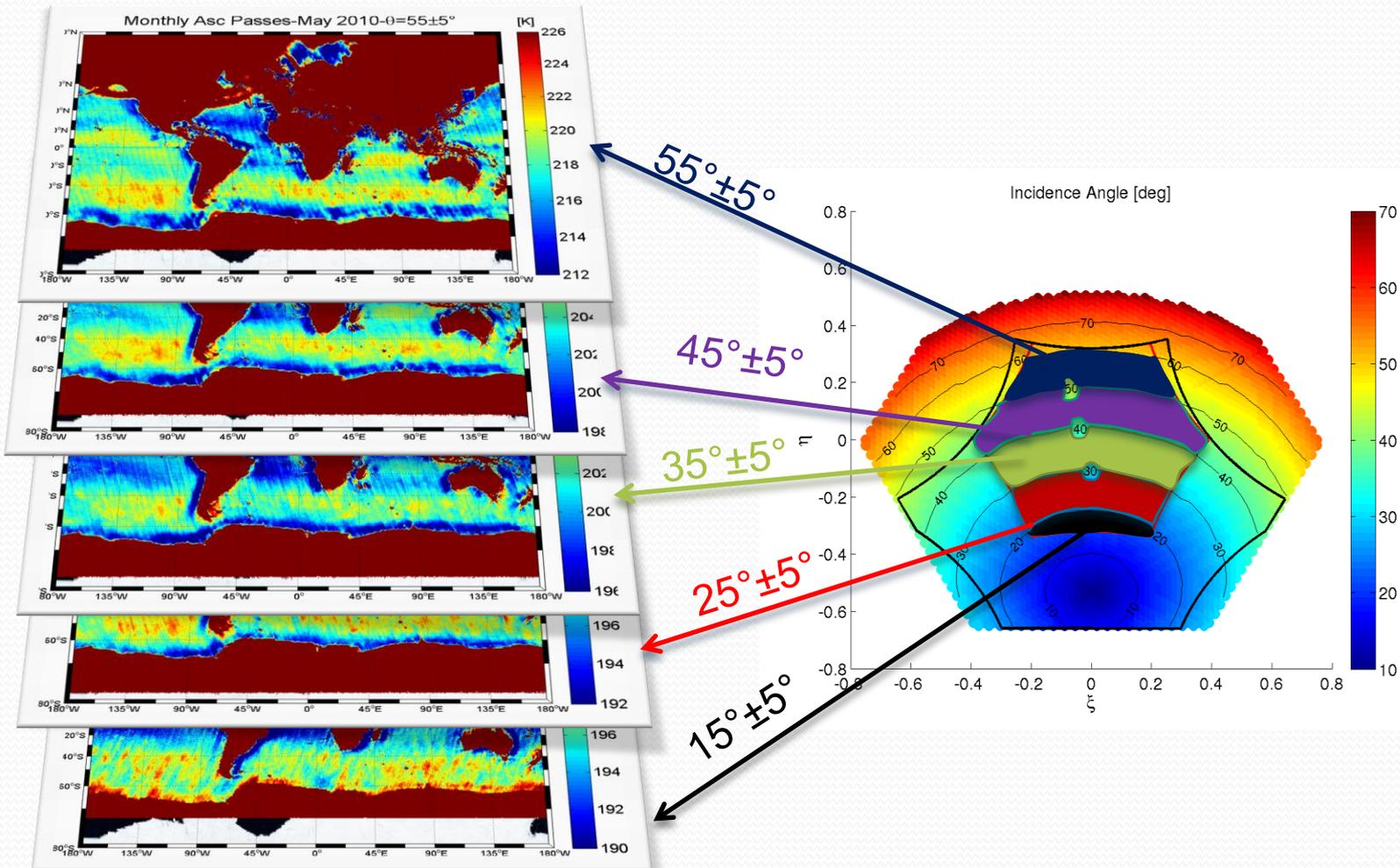


Et que voit SMOS en survolant les mers ?

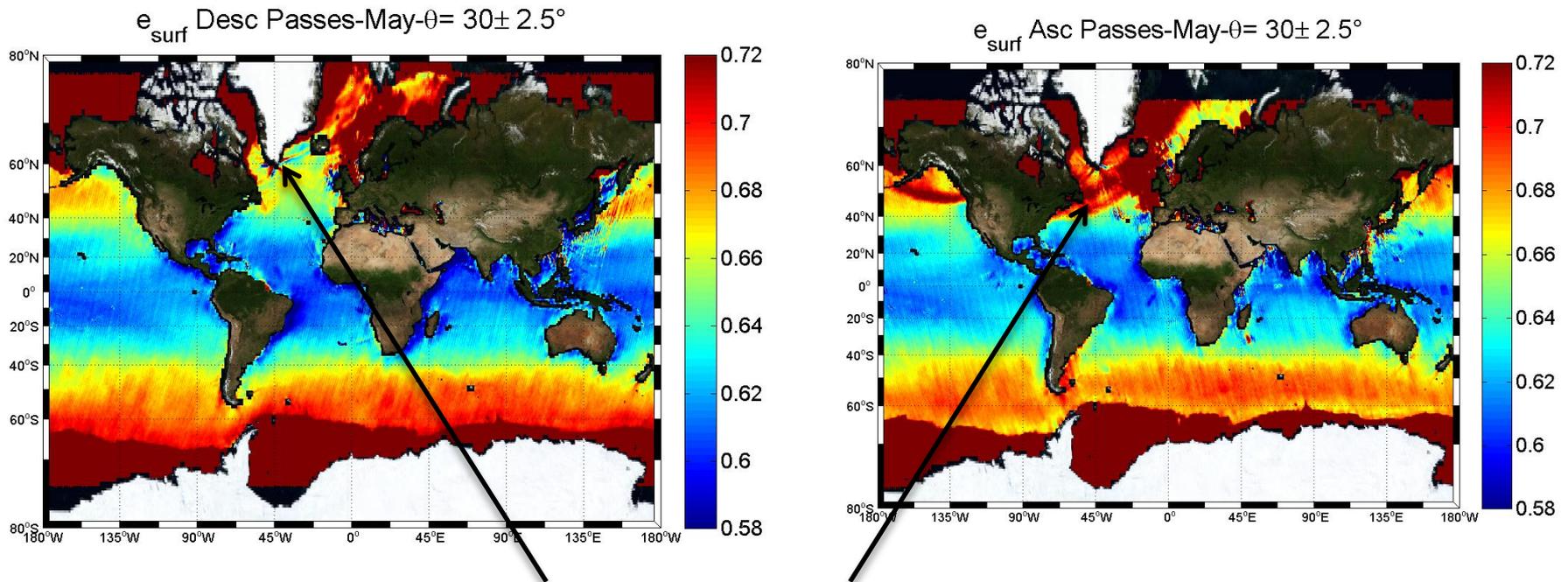


La Vue Multi-dimensionnelle de SMOS

L'instrument image la brillance apparente de la surface terrestre en bande L dans de multiples directions d'observation



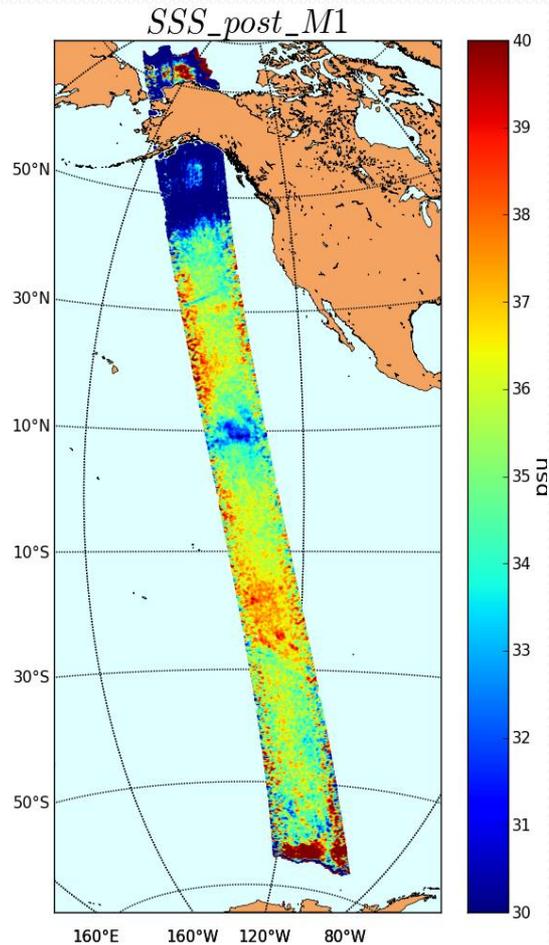
Brillance de la surface océanique en bande L vue dans une direction particulière de SMOS-Mois de Mai 2010



zones d'interférences dues aux transmissions radar, TV et radio

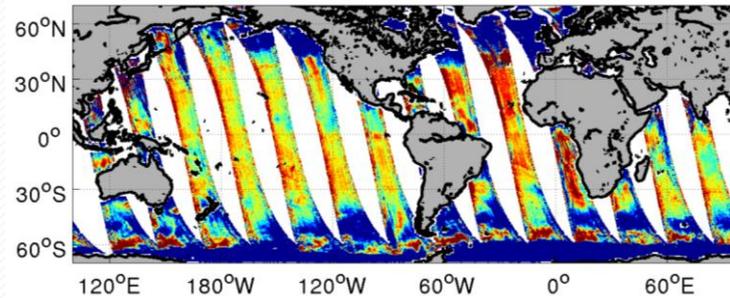
Les produits de SSS « niveau 2 » SMOS

1/2 orbite

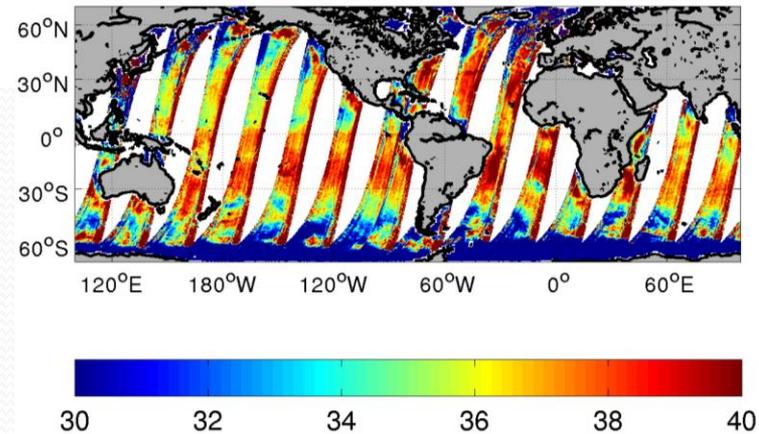


1 journée

Passes ascendantes

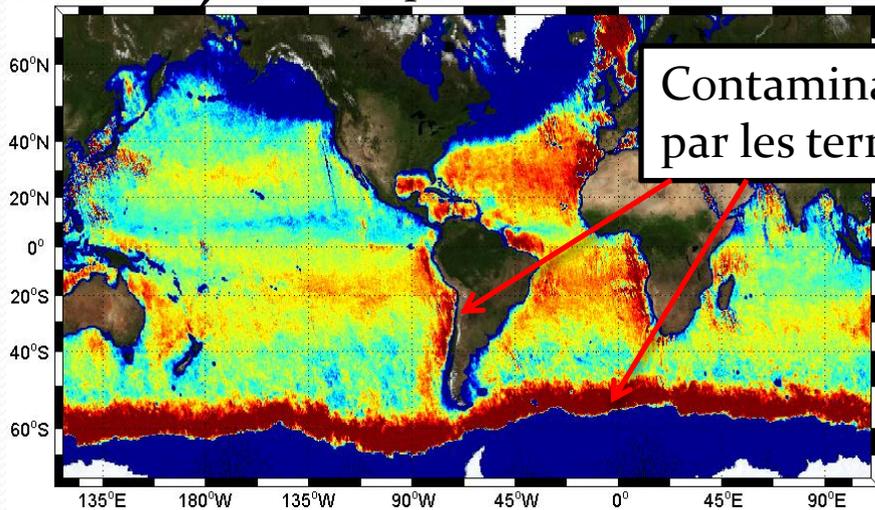


Passes descendantes

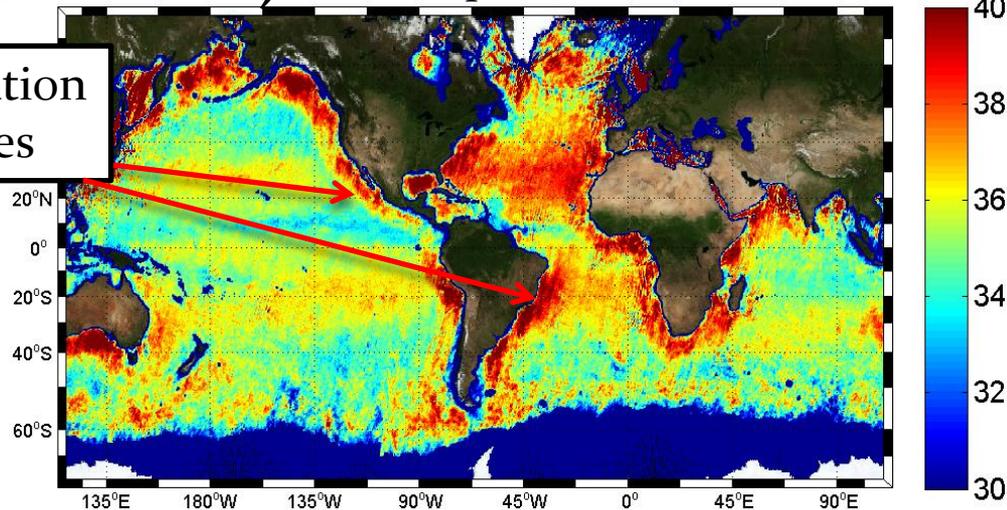


Produits simples de SSS « niveau 3 » SMOS

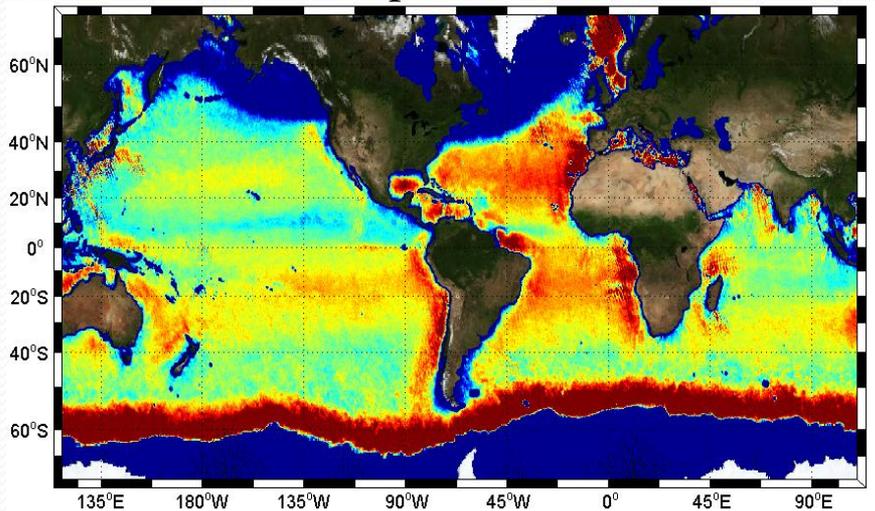
10 JOURS – passes ascendantes



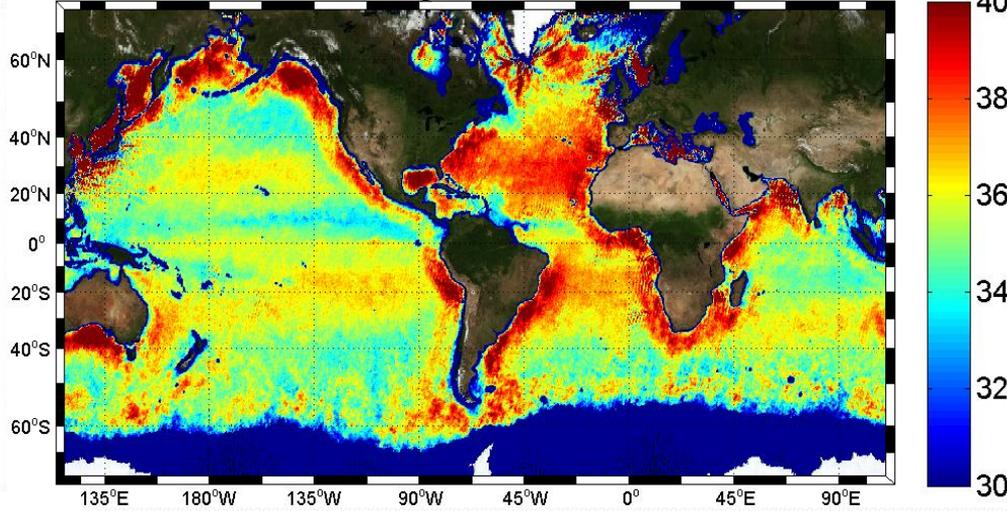
10 JOURS – passes descendantes [PSU]



1 mois – passes ascendantes

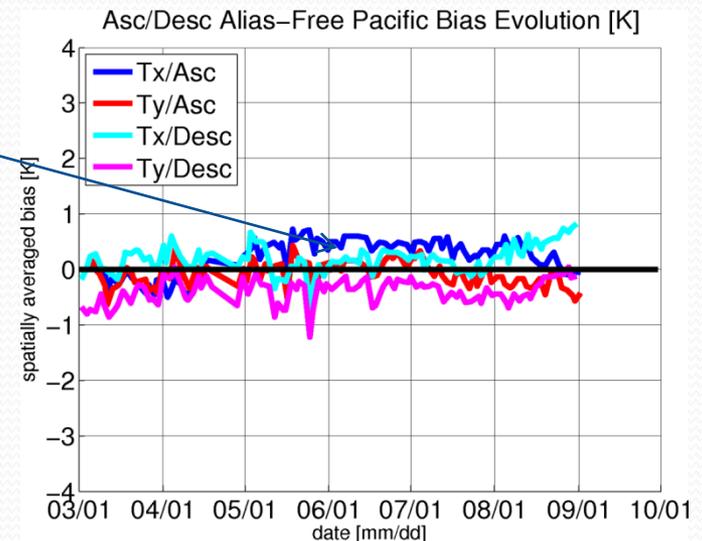


1 mois – passes descendantes



Produits évolués de SSS « niveau 3 » SMOS

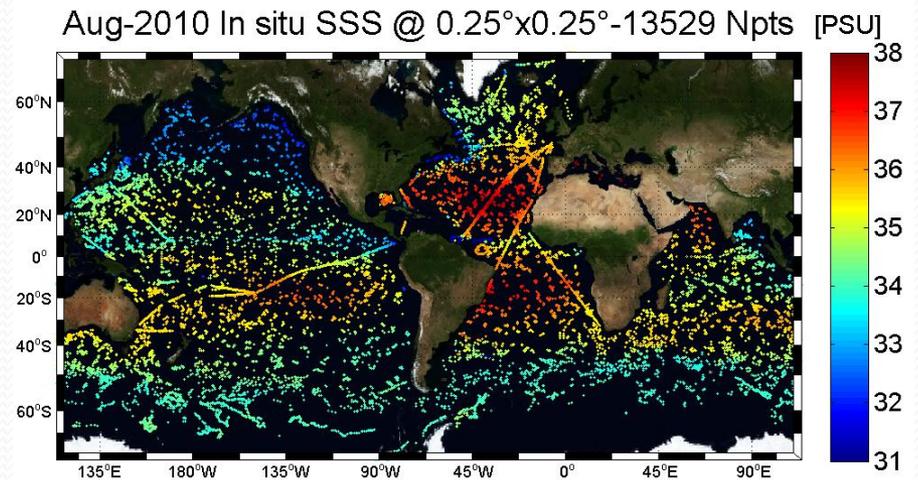
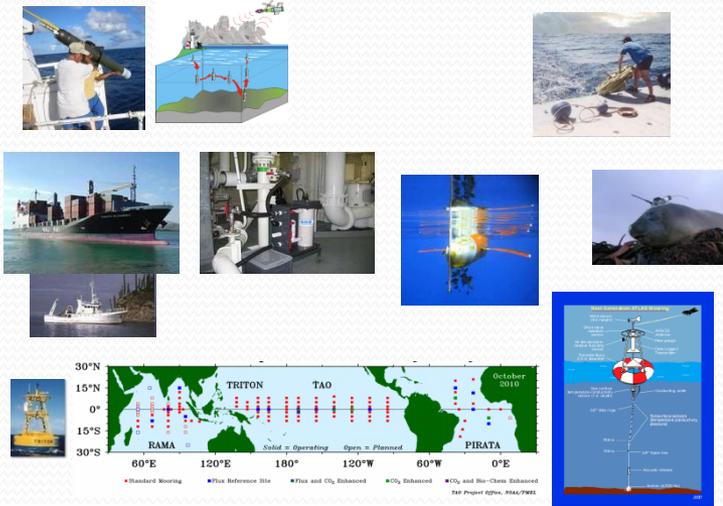
- ❑ **Filtrage des contaminations RFI** : exploitation de la multi-incidence & de la forte variabilité des signaux radar
- ❑ **Filtrage des contaminations de la terre**: combinaison adaptée & locale des passes
- ❑ **Meilleure correction des effets de la rugosité**
- ❑ **Corrections des dérives sur les brillances**
- ❑ **Filtrage spatial**



Activités de Validation

Déploiement, Collecte & Traitement des Données In situ de surface pour la Validation de SMOS

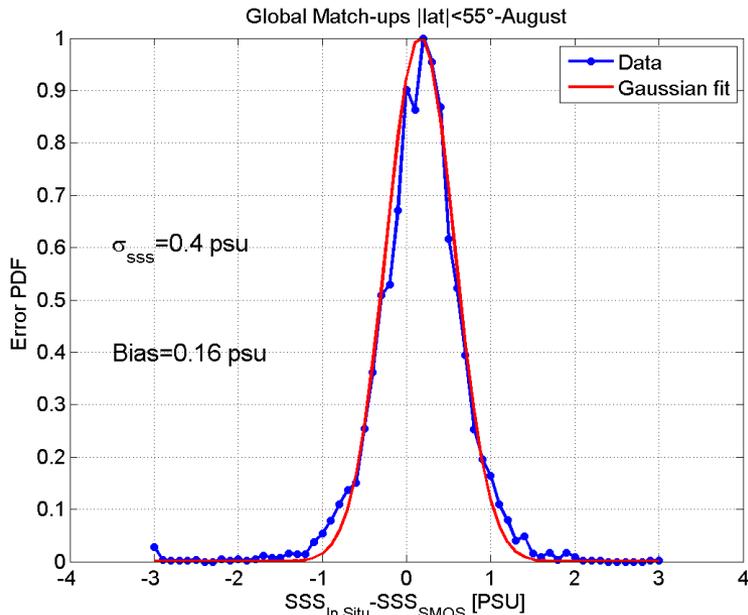
Projet GLOSCAL



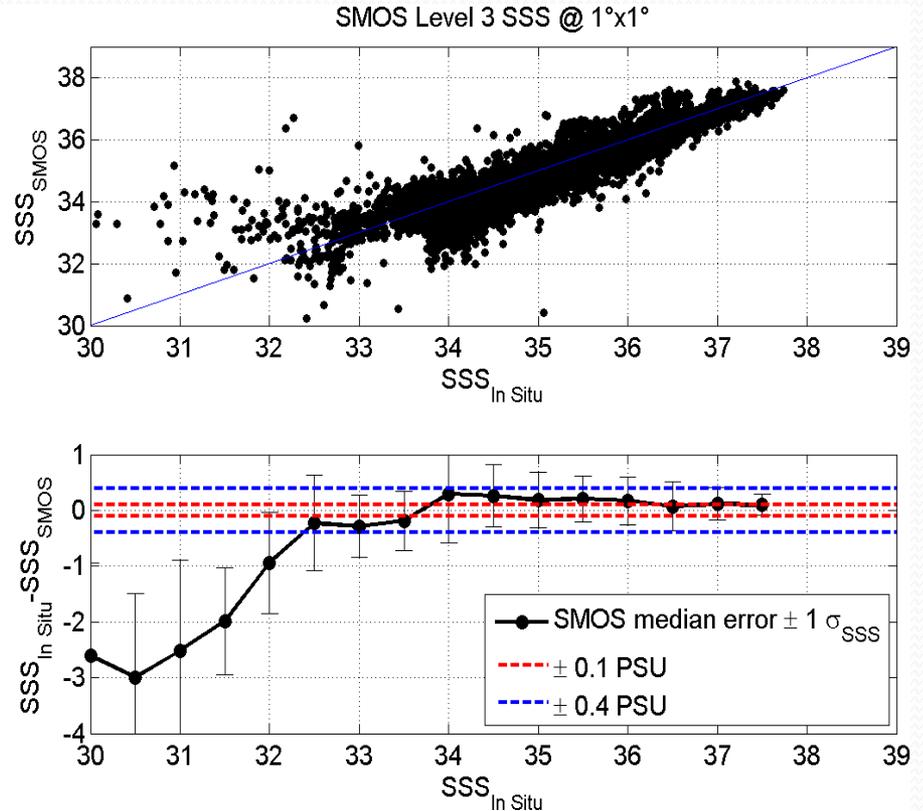
Statistiques des différences 'quasi'-globales ($|\text{latitudes}| \leq 55^\circ$) entre les SSS *in Situ* et les SSS SMOS L₃

Cas des Moyennes mensuelles à 1° de résolution spatiale

Erreur SMOS globale: 0.4 psu !



Histogramme des différences entre les SSS *in Situ* et les SSS SMOS L₃



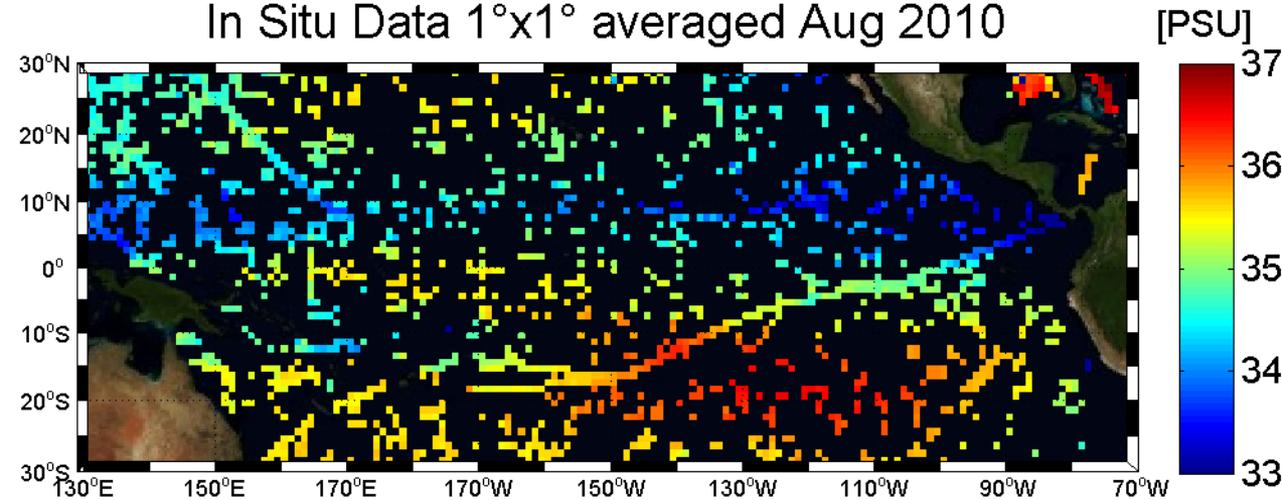
En haut: Comparaisons entre les SSS *in Situ* et SMOS L₃
En bas: médianes des différences de SSS par bins de ± 0.5 psu

**10 mois après lancement, on est déjà très proche de nos objectifs
Mais un effort certain est encore nécessaire pour atteindre 0.2 psu!**

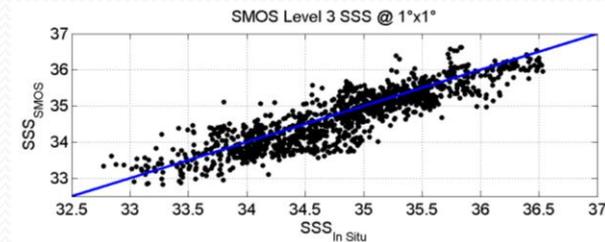
Zoom sur le Pacifique Tropical

Moyennes mensuelles à 1° de résolution spatiale

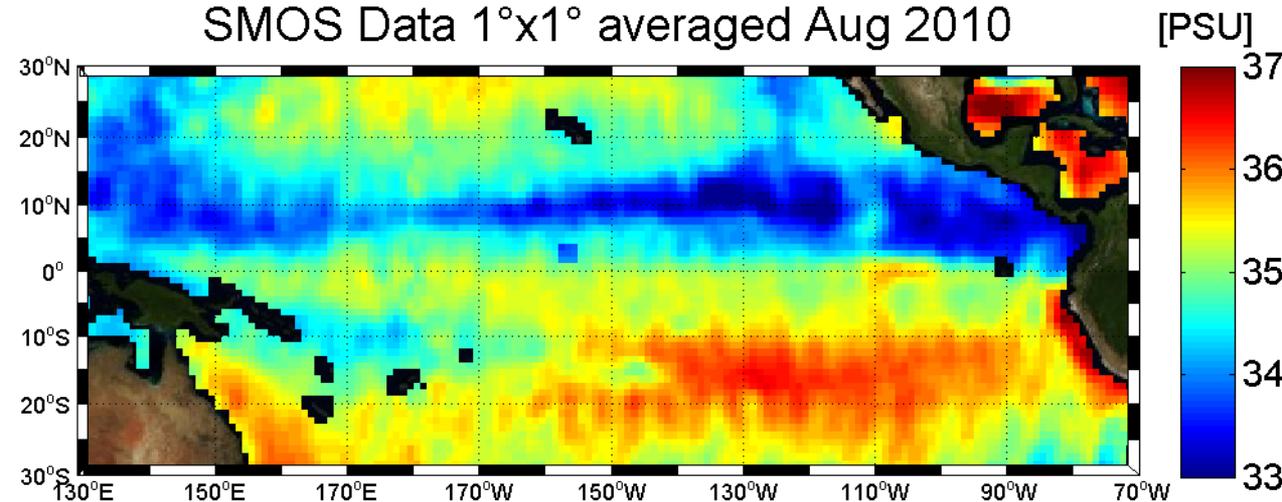
In Situ Data 1°x1° averaged Aug 2010



Erreur SMOS: 0.3 psu

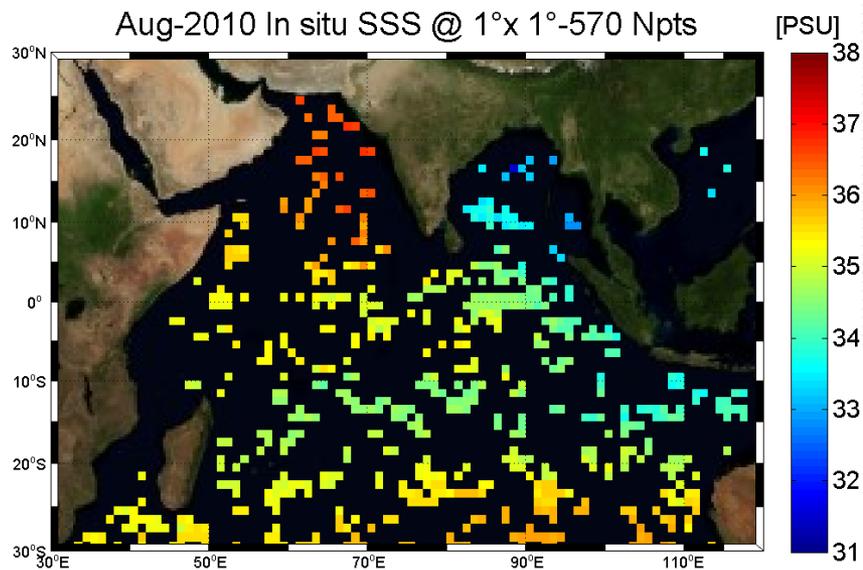


SMOS Data 1°x1° averaged Aug 2010

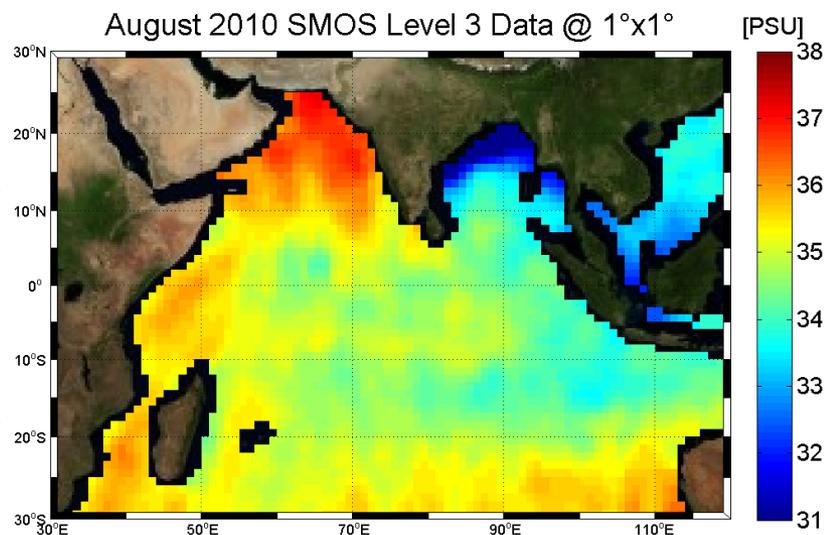
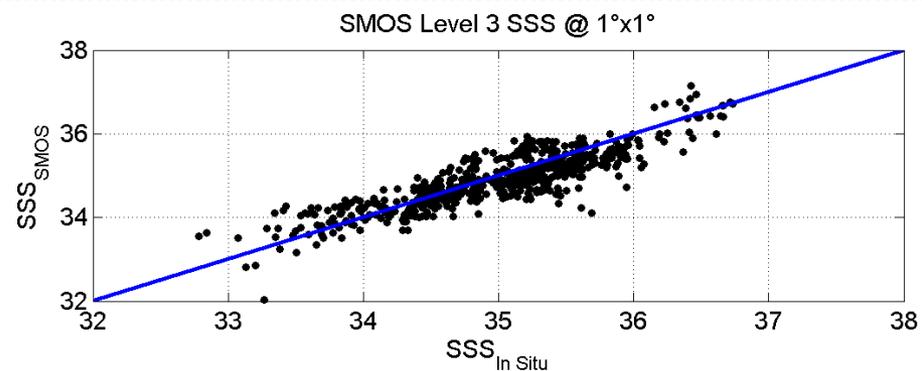


Zoom sur l'océan Indien Tropical

Moyennes mensuelles à 1° de résolution spatiale



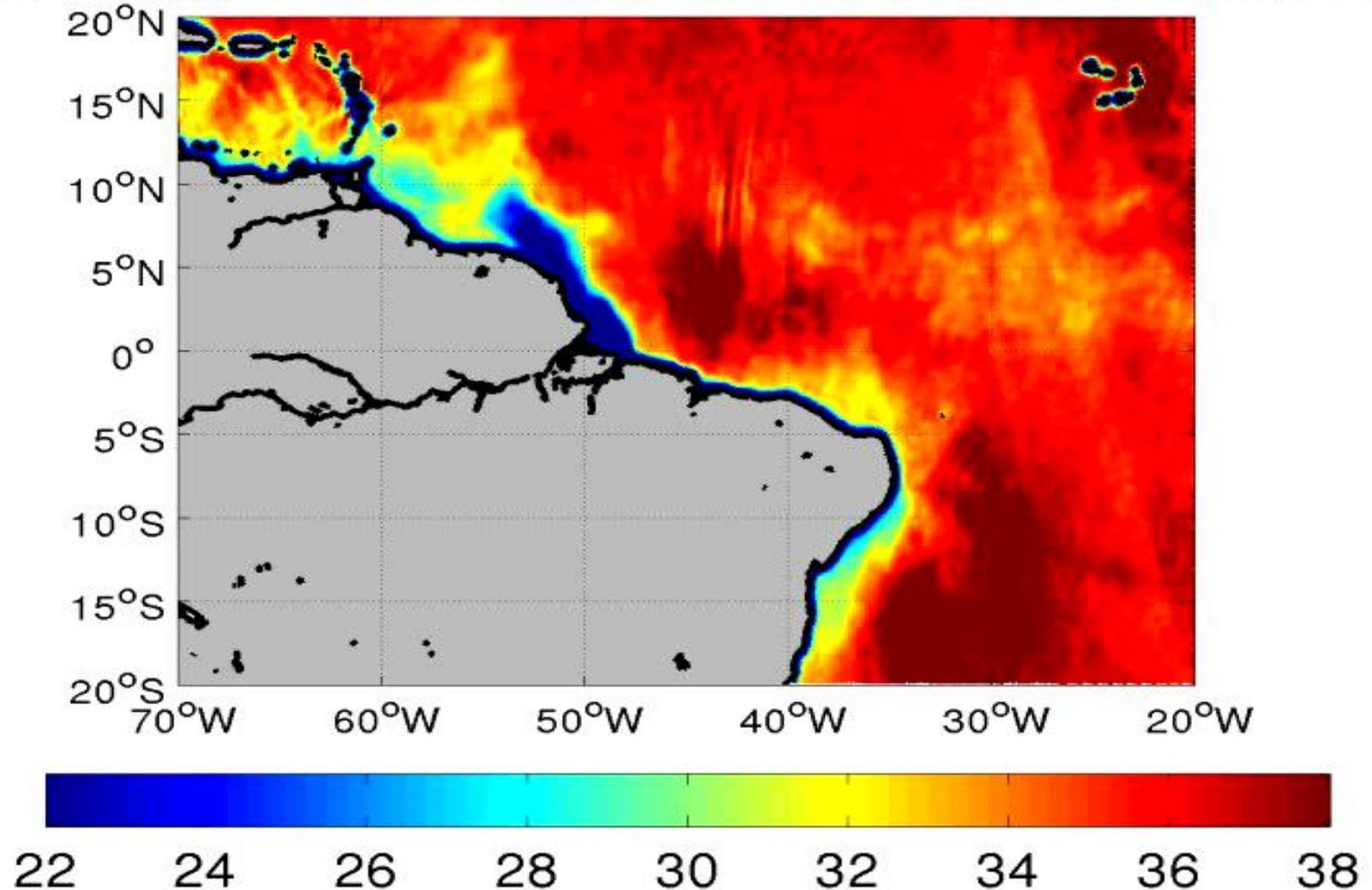
Erreur SMOS: 0.36 psu



Un des Apports majeur de SMOS:

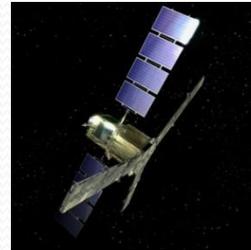
Sa capacité à détecter les fronts salins et leurs évolutions temporelle

SSS Averaged from Jun 09 through Jun 15 [psu] (AF,Asc/Desc)



Vers des Niveaux 4: Mélanges des données SMOS & d'autres capteurs

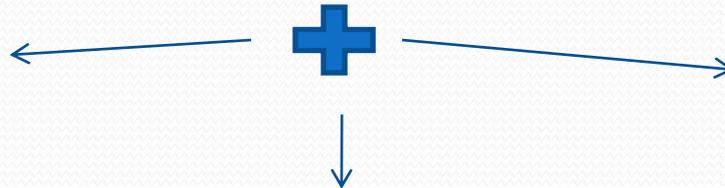
SMOS



AMSR-E: C & X band



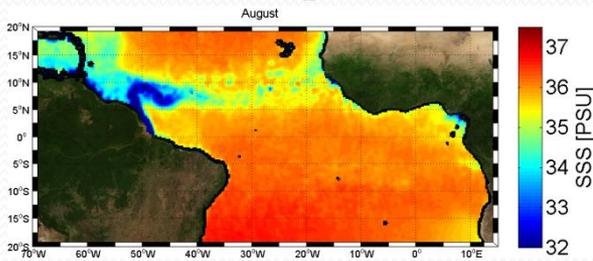
Modis/Meris
Couleur de l'océan



Aquarius/SAC-D

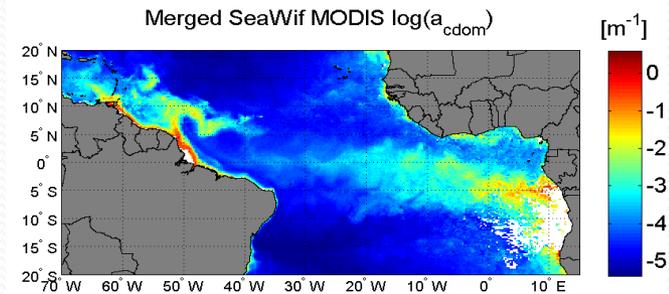


Mers Tropicales



Précision ~1 psu

Reul et al. , 2009

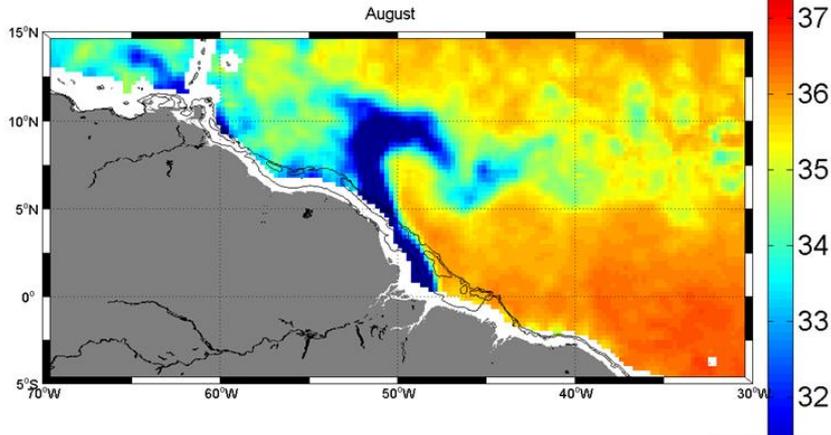


SSS en côtier dans certaines zones

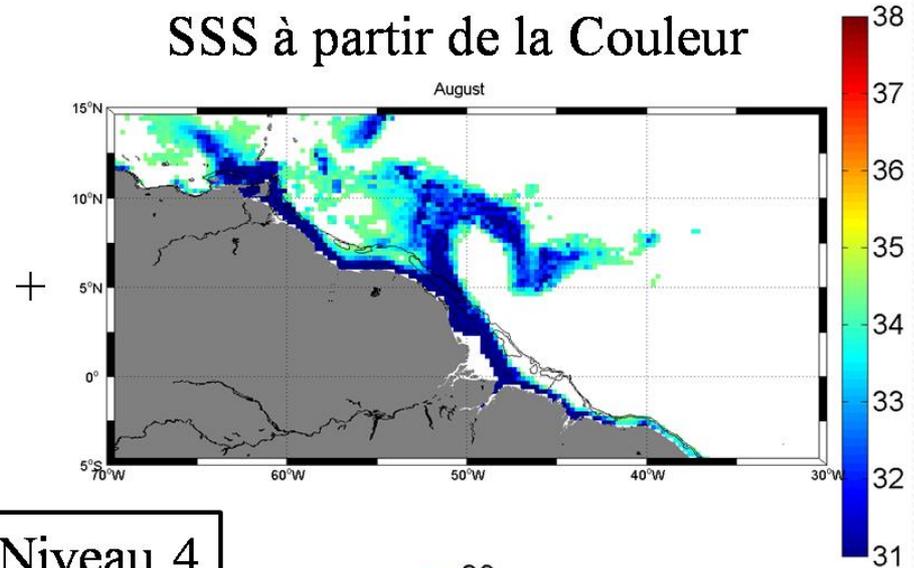
Global, précision ~0.1 psu

Exemple de Niveaux 4: Du large (micro-ondes) à la côte (couleur de l'océan)

SSS SMOS Niveau 3

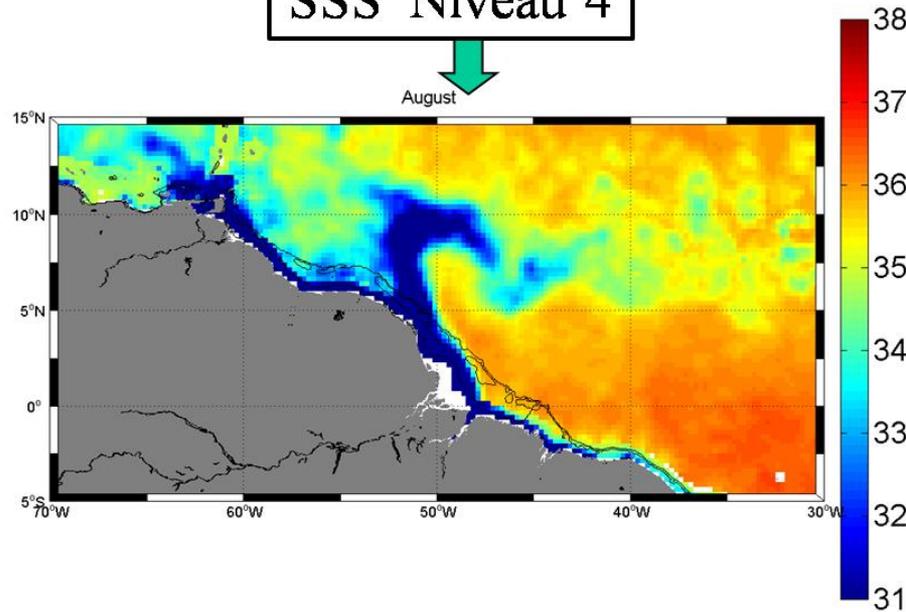


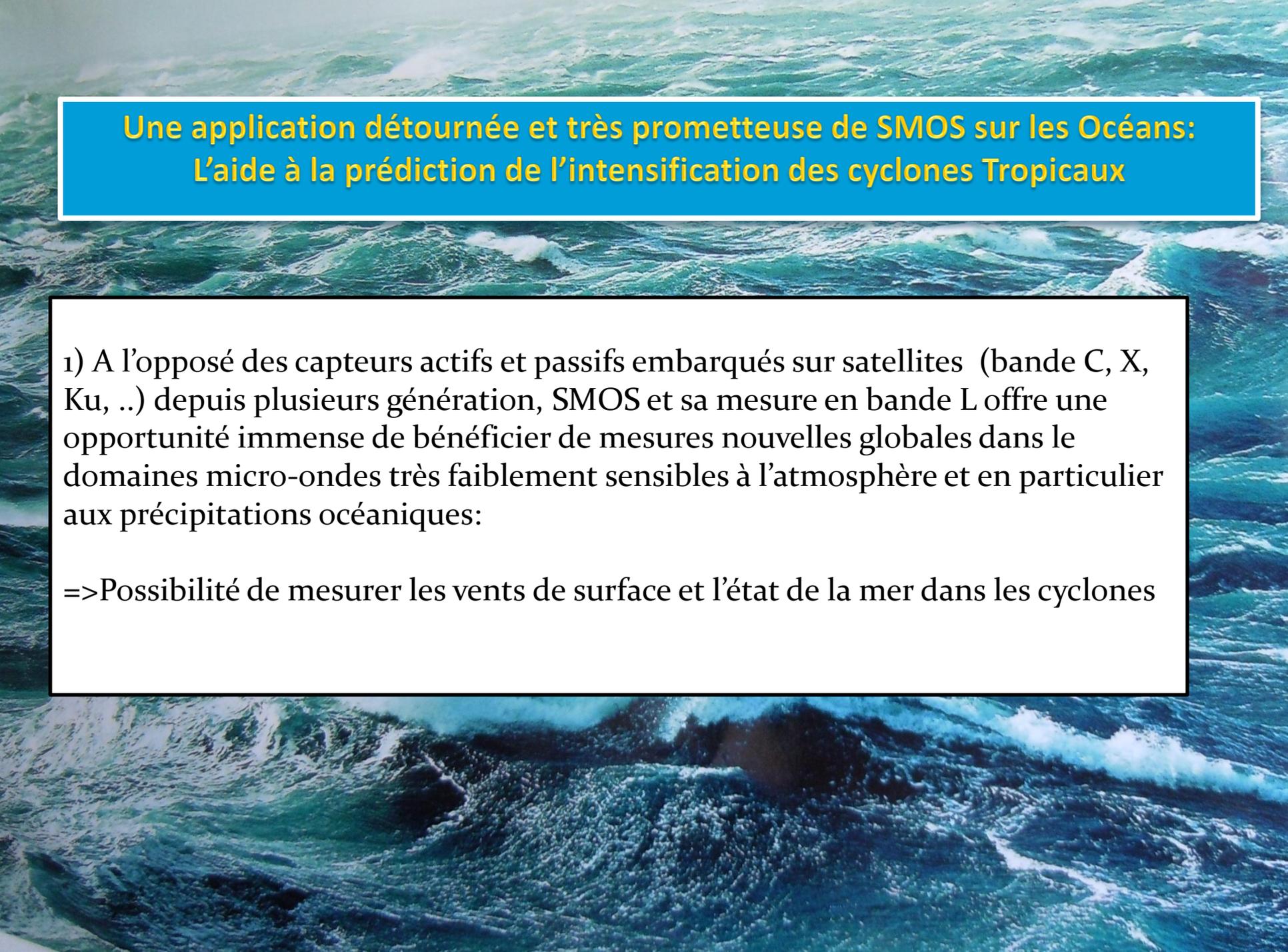
SSS à partir de la Couleur



SSS Niveau 4

August



An aerial photograph of a tropical cyclone, showing a dense, swirling cloud structure over a dark blue ocean. The clouds are white and grey, with a clear eye visible in the center. The surrounding ocean is a deep blue, with white foam from the storm's outer rings.

Une application détournée et très prometteuse de SMOS sur les Océans: L'aide à la prédiction de l'intensification des cyclones Tropicaux

1) A l'opposé des capteurs actifs et passifs embarqués sur satellites (bande C, X, Ku, ..) depuis plusieurs générations, SMOS et sa mesure en bande L offre une opportunité immense de bénéficier de mesures nouvelles globales dans le domaine des micro-ondes très faiblement sensibles à l'atmosphère et en particulier aux précipitations océaniques:

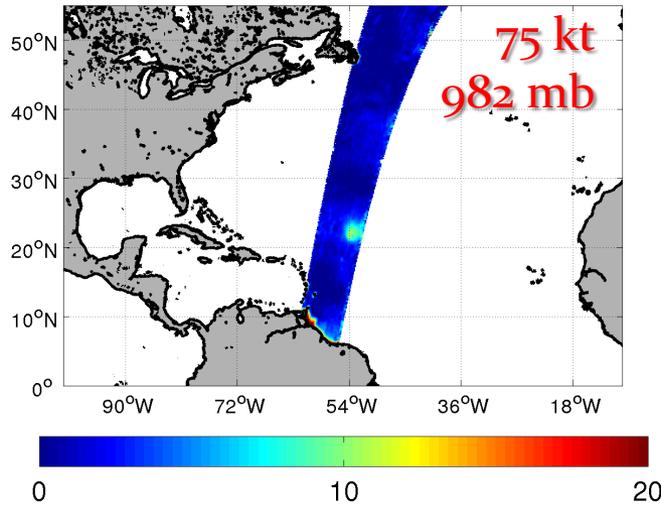
=> Possibilité de mesurer les vents de surface et l'état de la mer dans les cyclones

Signature des cyclones tropicaux dans les Température de Brillance SMOS

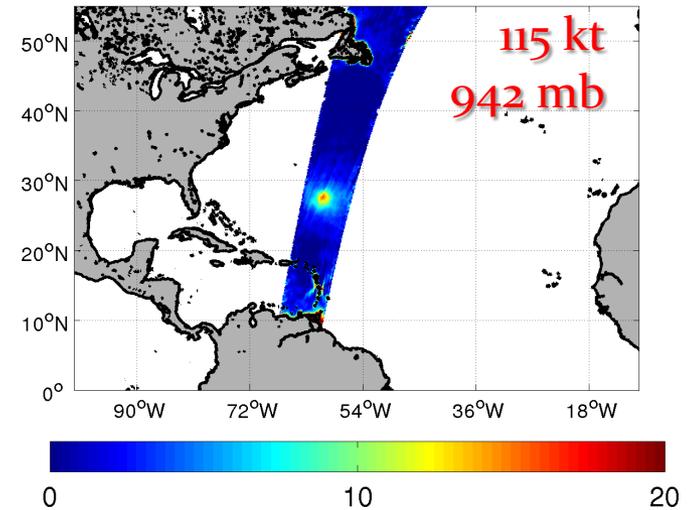
Ouragan
DANIELLE

25-27 Août

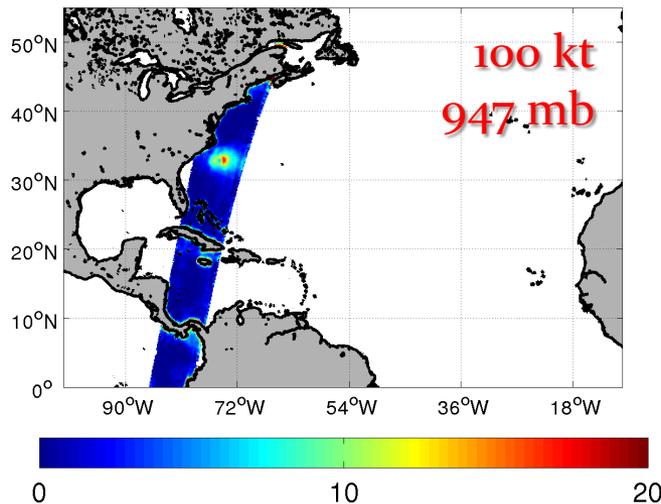
SMOS Residual $(T_x+T_y)/2$ for Aug 25 21:33 [K] (AF)



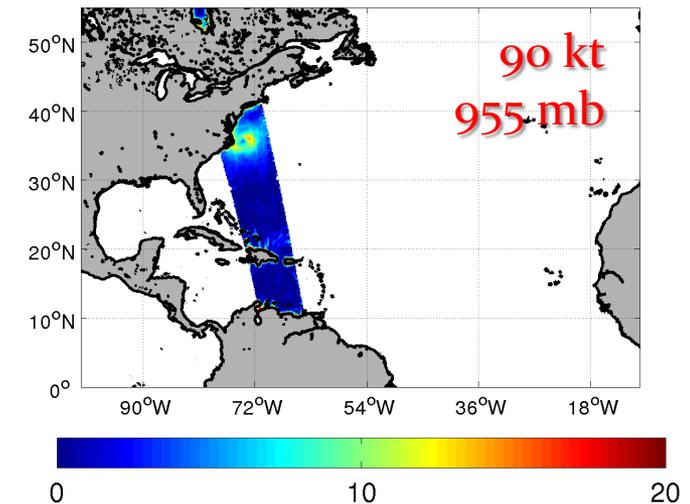
SMOS Residual $(T_x+T_y)/2$ for Aug 27 21:55 [K] (AF)



SMOS Residual $(T_x+T_y)/2$ for Sep 02 23:01 [K] (AF)



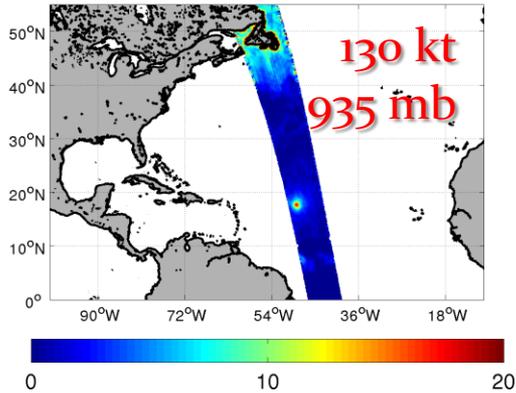
SMOS Residual $(T_x+T_y)/2$ for Sep 03 09:52 [K] (AF)



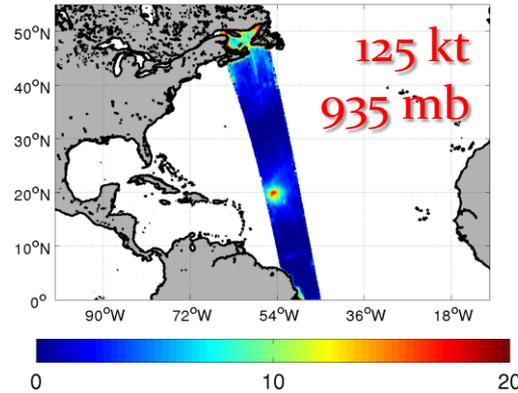
Ouragan
EARL
2-3 Septembre

Signature des cyclones tropicaux dans les Température de Brillance SMOS

SMOS Residual (Tx+Ty)/2 for Sep 13 08:22 [K] (AF)

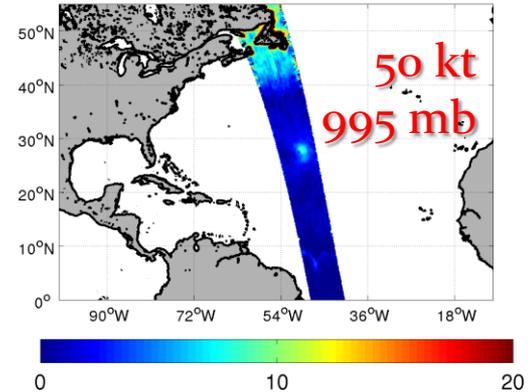


SMOS Residual (Tx+Ty)/2 for Sep 15 08:45 [K] (AF)



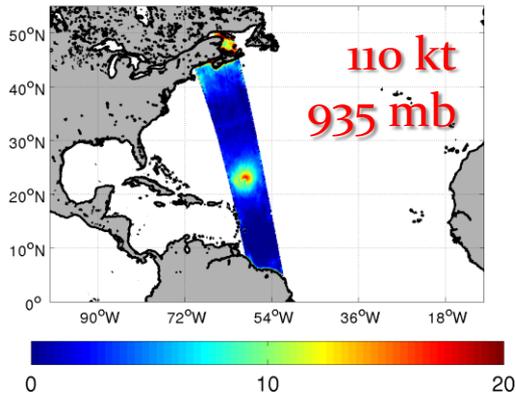
Tempête Tropicale JULIA

SMOS Residual (Tx+Ty)/2 for Sep 18 08:28 [K] (AF)

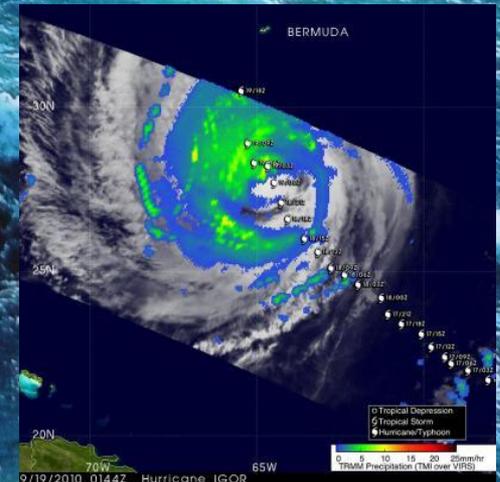
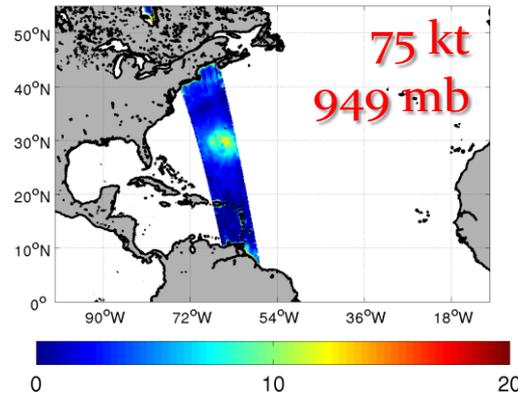


Ouragan IGOR 13-19 septembre

SMOS Residual (Tx+Ty)/2 for Sep 17 09:07 [K] (AF)



SMOS Residual (Tx+Ty)/2 for Sep 19 09:29 [K] (AF)



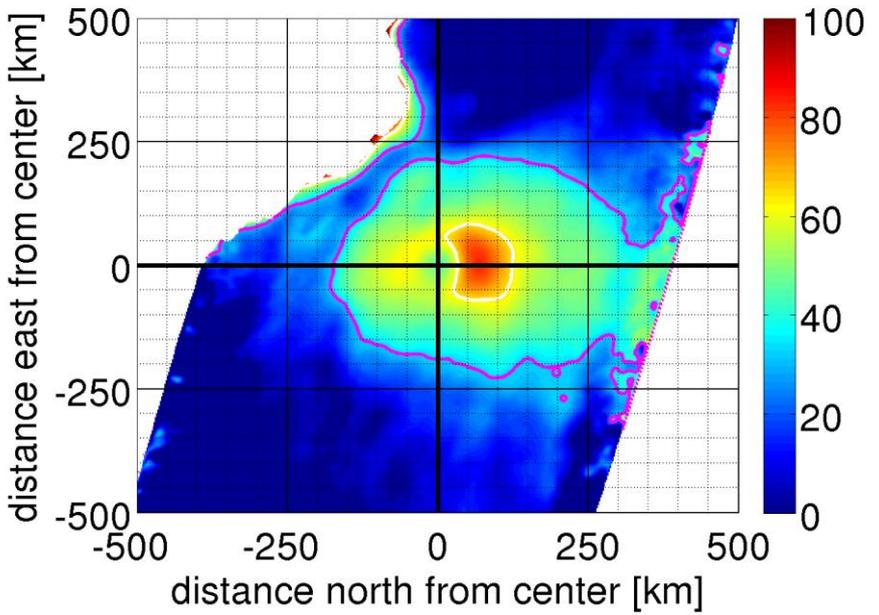
L'Ouragan Earl a été vu deux fois par SMOS alors qu'il faiblissait de catégorie 3 à catégorie 1 Sep 2-3...



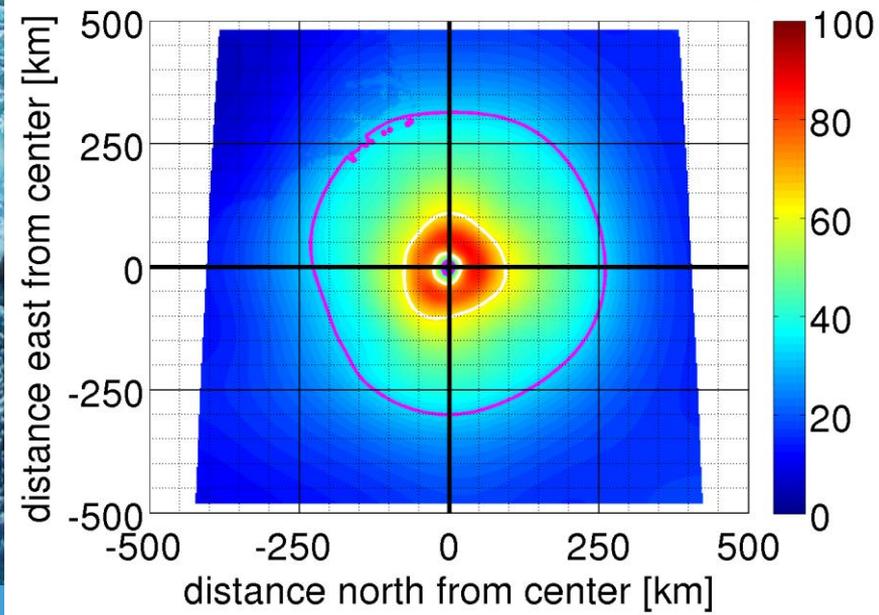
Inversion des mesures SMOS en vent à 10 m de la surface

Estimation des vents par le « Hurricane Research Division »

SMOS 10-m WS for Sep 02 23:01 [kts] (AF)



HWIND 10-m WS for Sep 02 22:30 [kts] (AF)



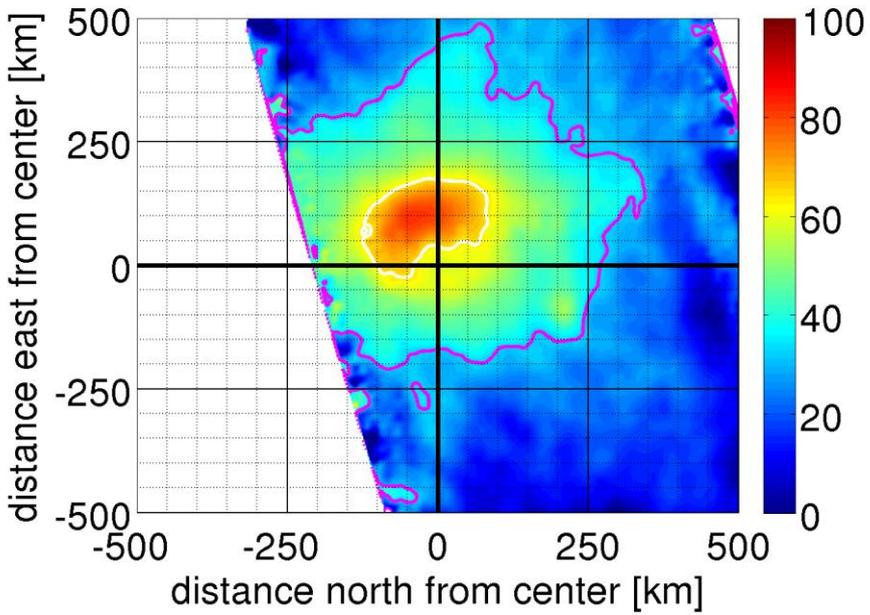
L'Ouragan Igor a été vu par SMOS alors qu'il était classé « catégorie 4 » (15 Sep), catégorie 3 (17 Sep) et catégorie 1 (19 Sep)



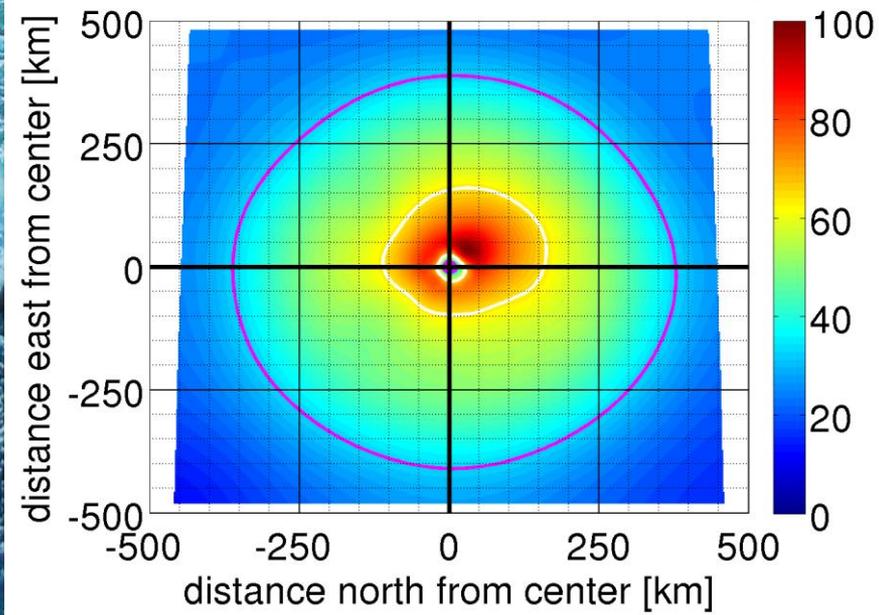
Estimation des vents par le « Hurricane Research Division »

Inversion des mesures SMOS en vent à 10 m de la surface

SMOS 10-m WS for Sep 15 08:45 [kts] (AF)



HWIND 10-m WS for Sep 16 19:30 [kts] (AF)



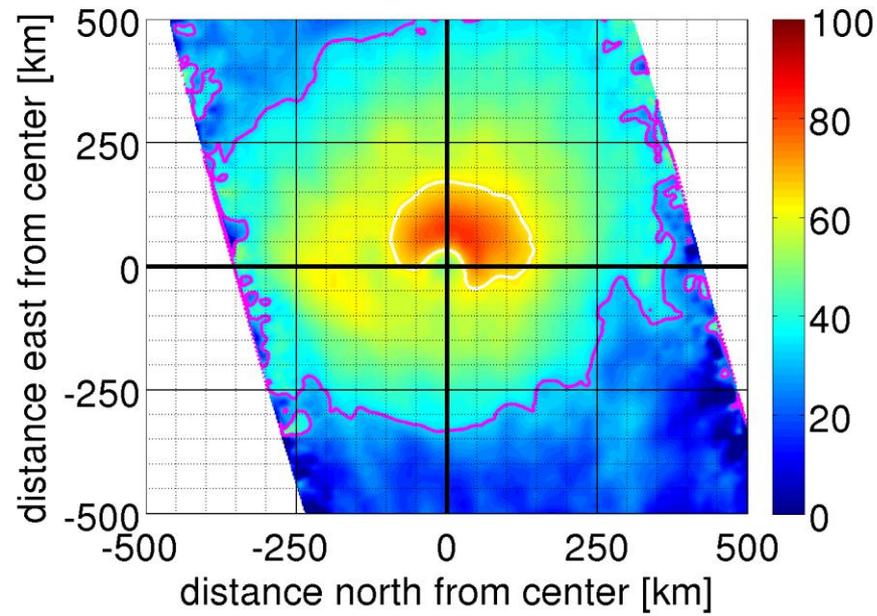
L'Ouragan Igor a été vu par SMOS alors qu'il était classé « catégorie 4 » (15 Sep), catégorie 3 (17 Sep) et catégorie 1 (19 Sep)



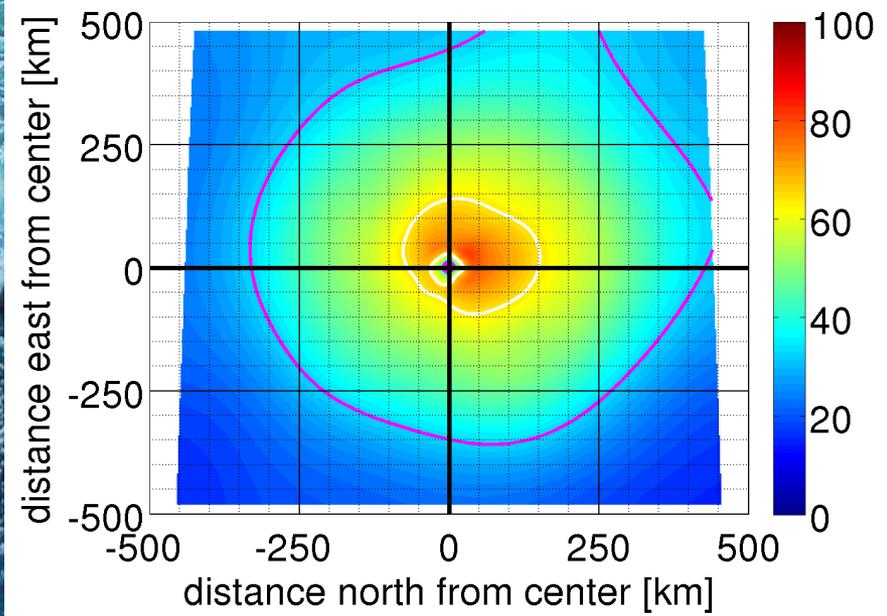
Inversion des mesures SMOS en vent à 10 m de la surface

Estimation des vents par le « Hurricane Research Division »

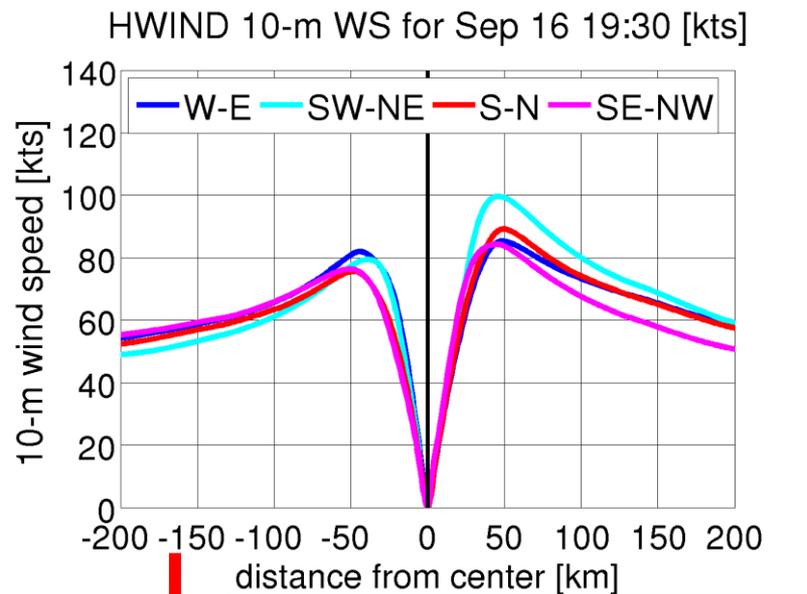
SMOS 10-m WS for Sep 17 09:07 [kts] (AF)



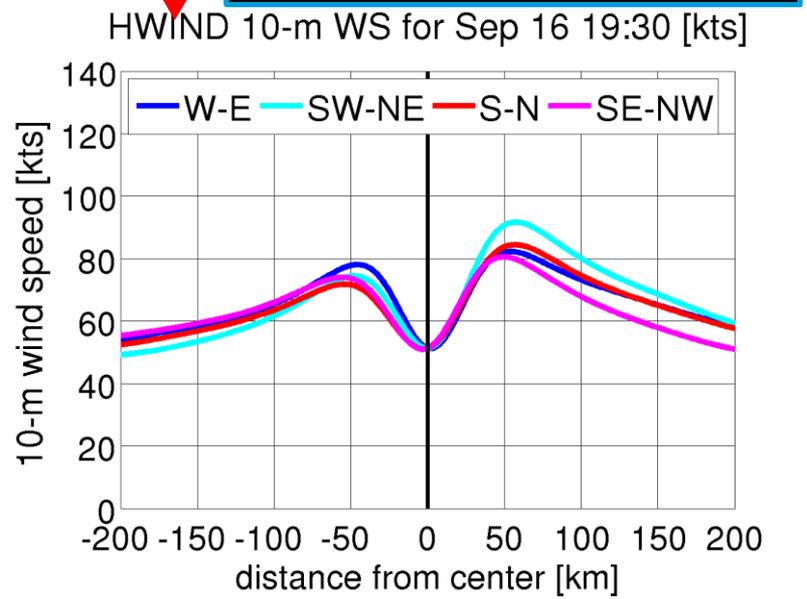
HWIND 10-m WS for Sep 17 19:30 [kts] (AF)



Sections à travers l'Ouragan IGOR

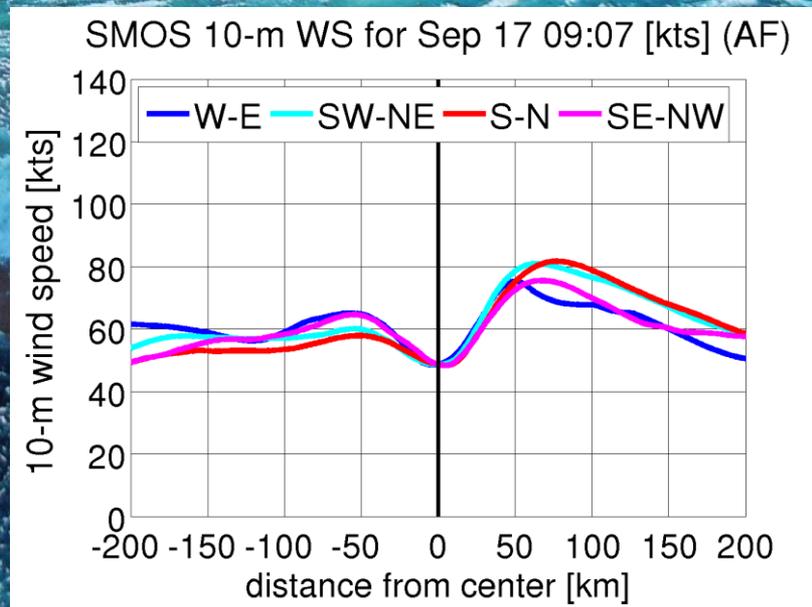


Lissage à la résolution spatiale de SMOS

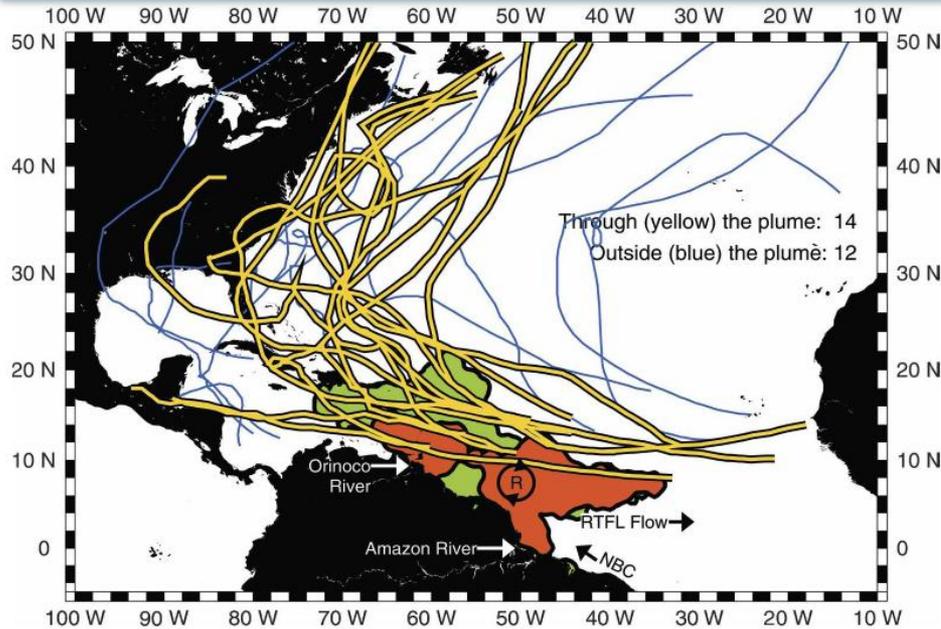


HWIND du HRD

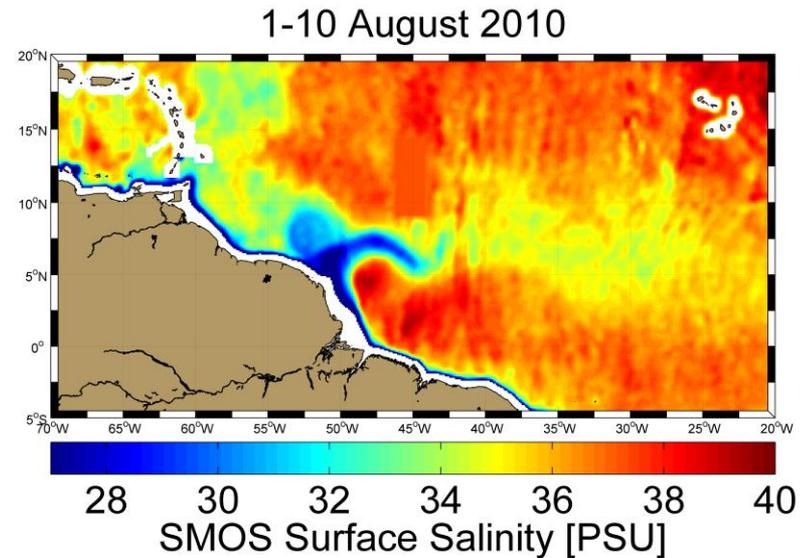
Vent SMOS



Intensification des cyclones tropicaux à leur passage sur le panache de l'Amazone et de l'Orénoque



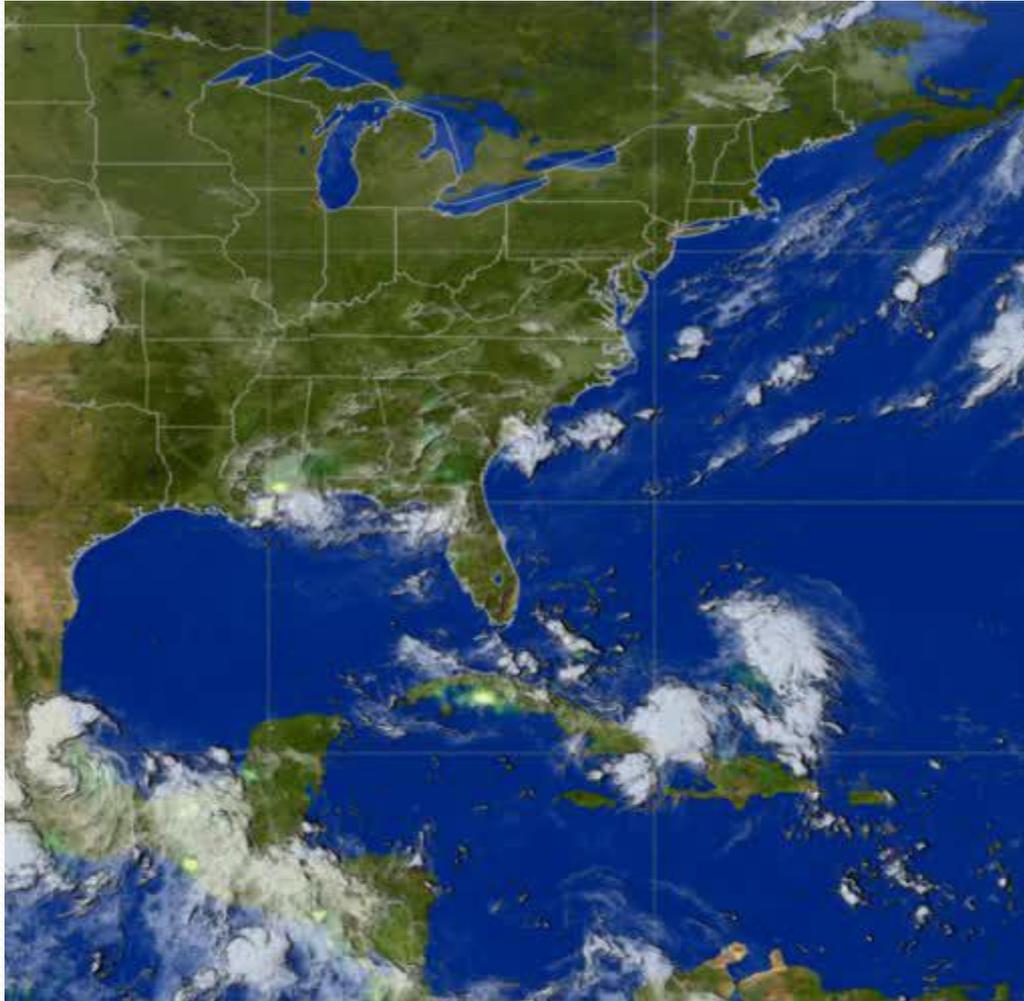
A. Ffield, 2007



Sur la période 1960-2000, 68% des Ouragans de Catégorie 5 sont passés directement au-dessus de la zone historique du panache de l'Amazone. La fine couche désalée (20-30 m) protège les cyclones d'un contact avec les eaux plus froides du courant Nord Brésilien

=>SMOS et son monitoring détaillé de l'étendue et de l'évolution du panache peut aider comme indicateur d'intensification des ouragans sur cette zone

Sillages désalés après le passage d'un cyclone ?



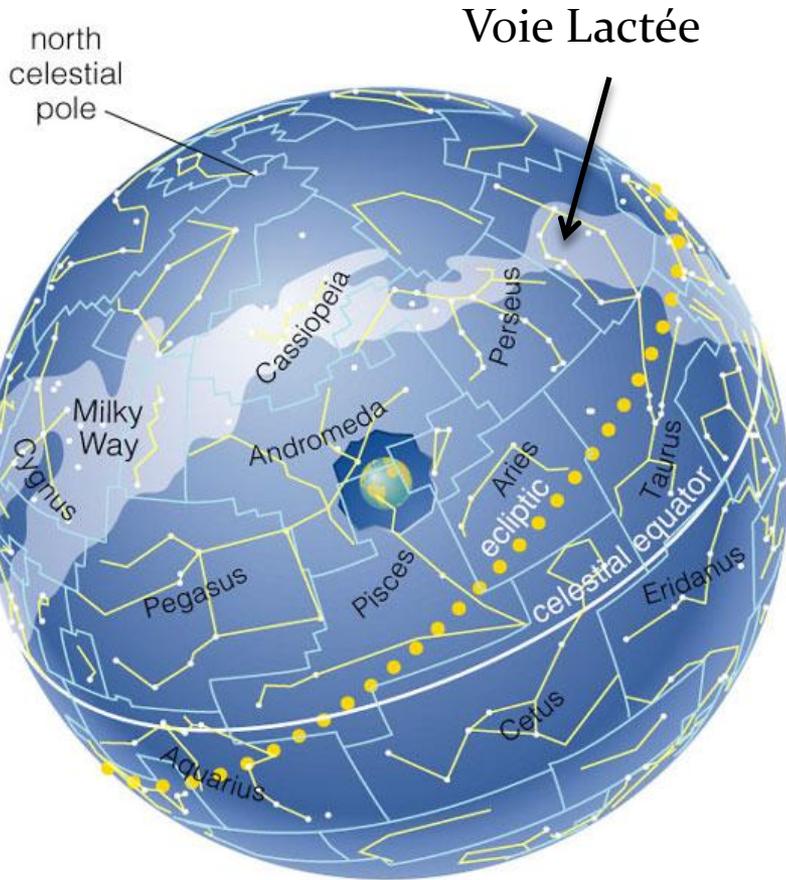
Très fortes précipitations
dans certains cyclones

=> Génération de lentilles
d'eau douce

SMOS en détecte-t-il ?

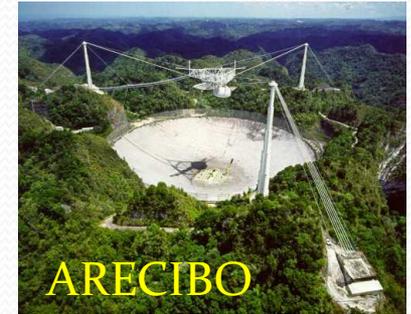
=> à étudier

SMOS détecte l'éclat de la Voie Lactée sur la surface des océans

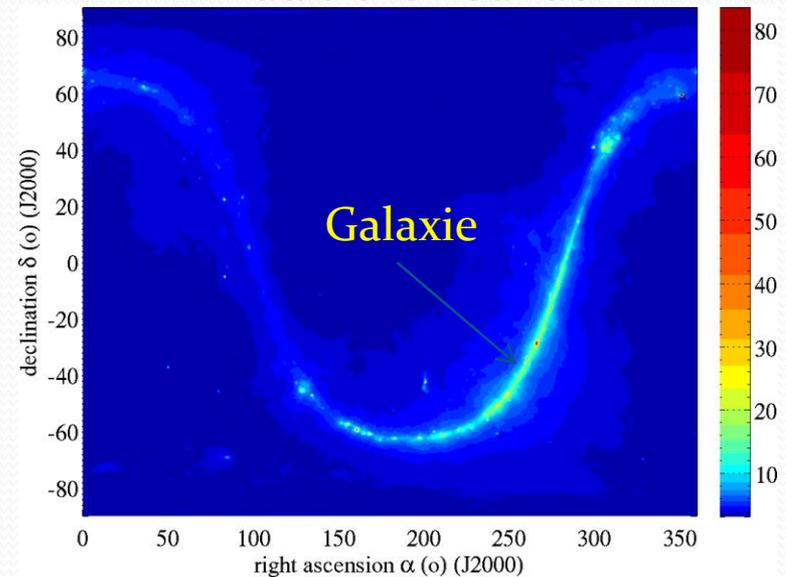


© 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley

Radiomètres terrestres à 1.4 GHz

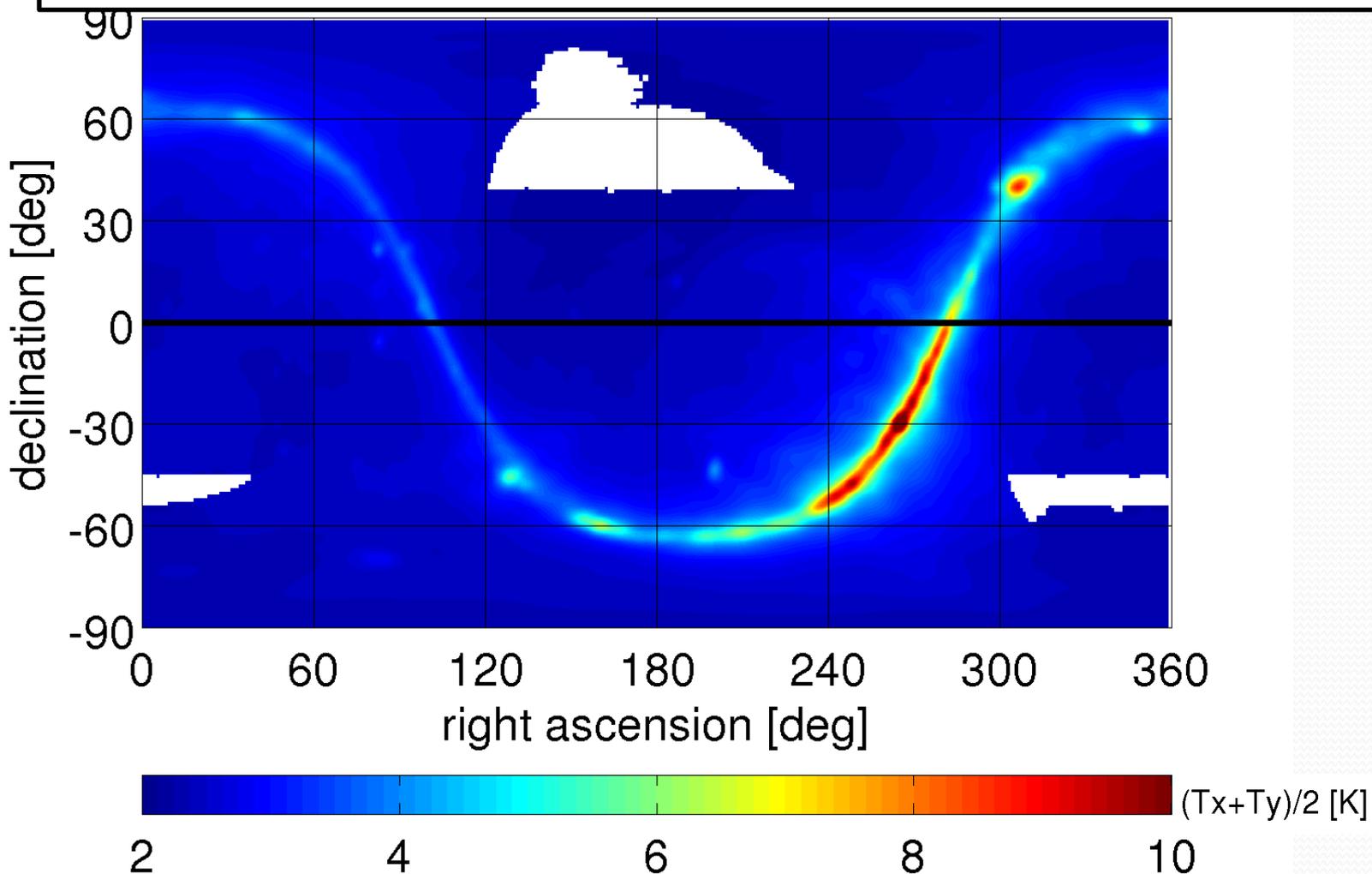


Cartographie de la Température de brillance du ciel en bande L

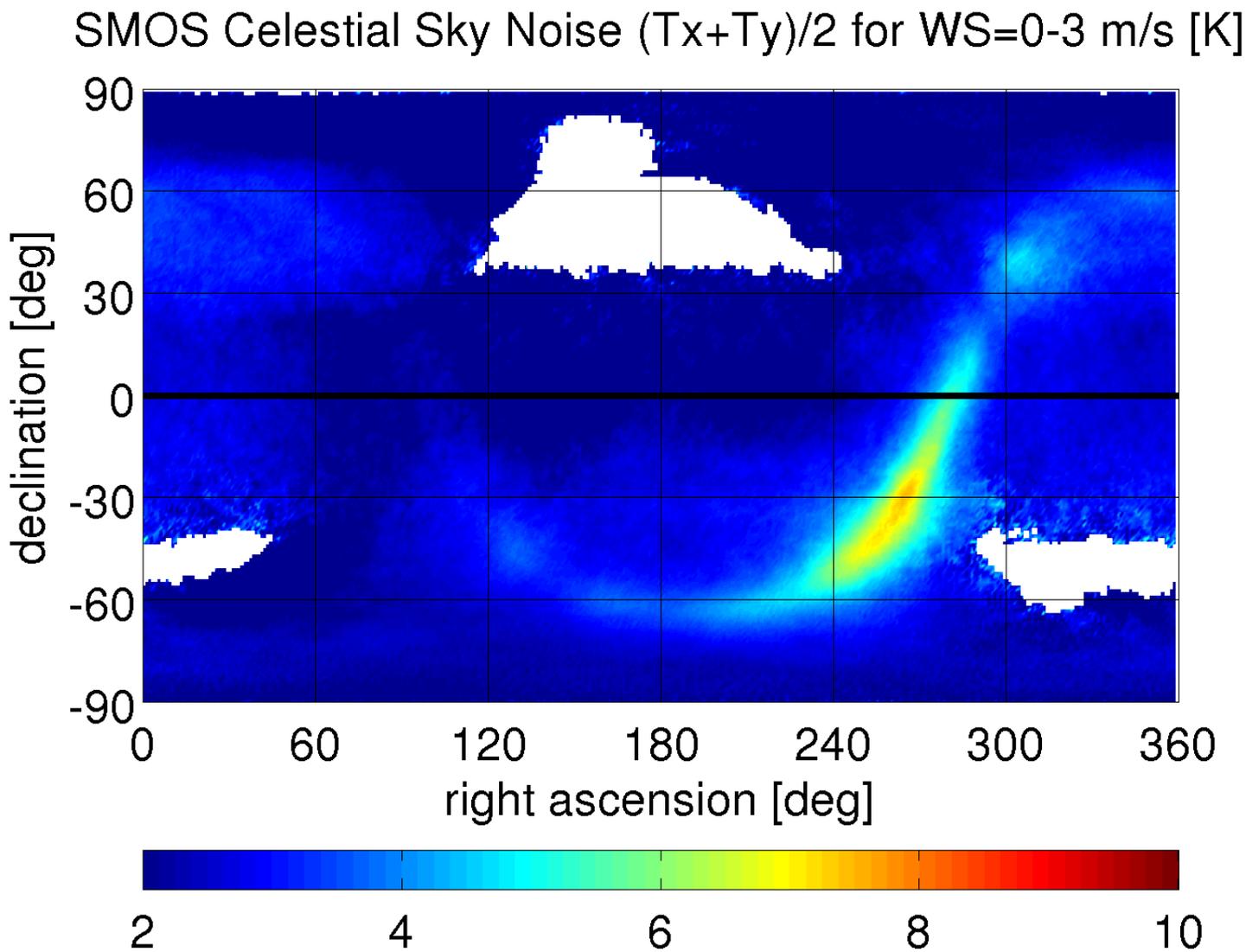


Après 6 mois d'aquisition, SMOS voit une image 'miroir' quasi-complète de la brillance du ciel
Cette image se floute de plus en plus si les vents à la surface des océans augmentent

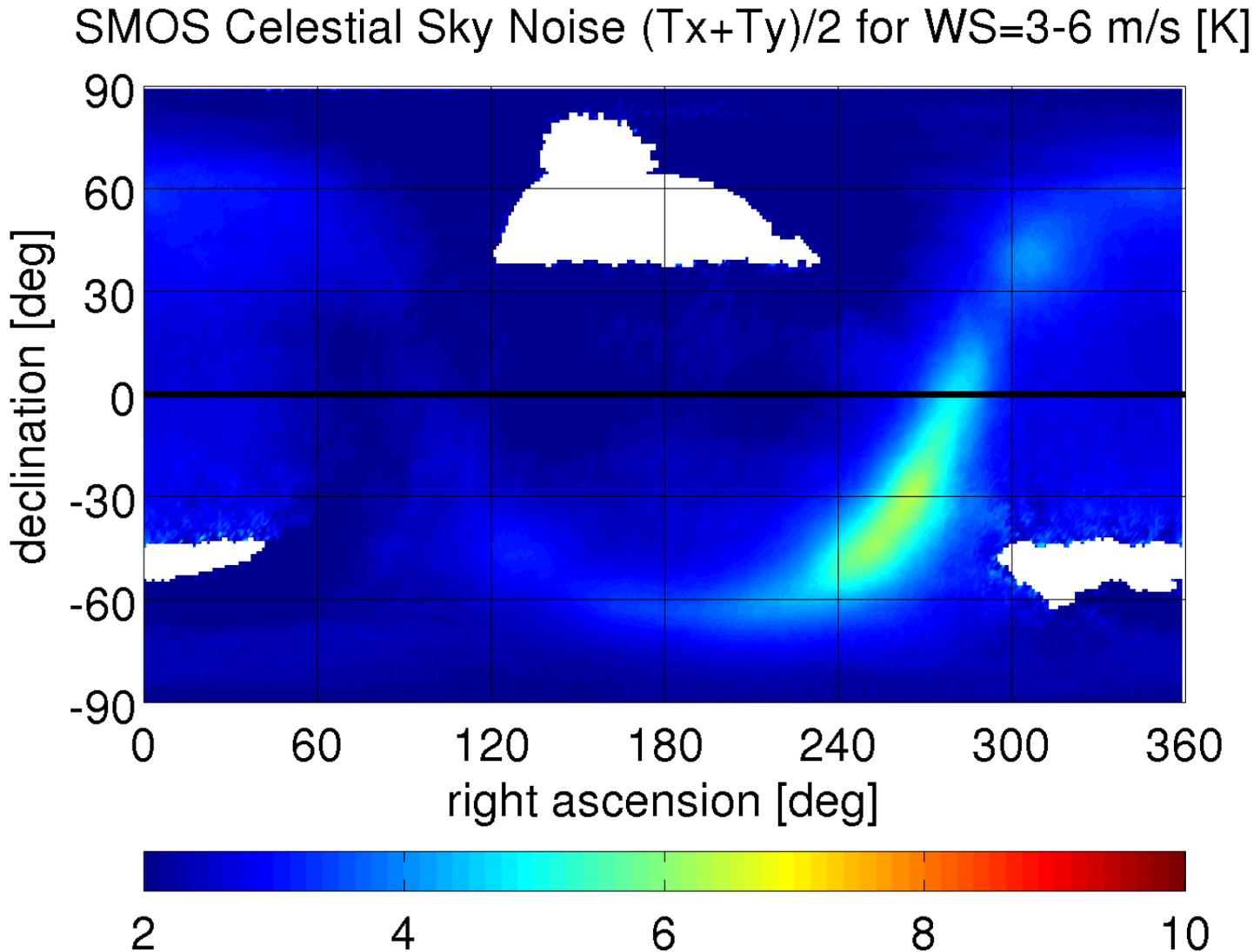
Modèle théorique de la brillance du ciel réfléchi vue par SMOS
si les océans sont supposés parfaitement 'lisses'



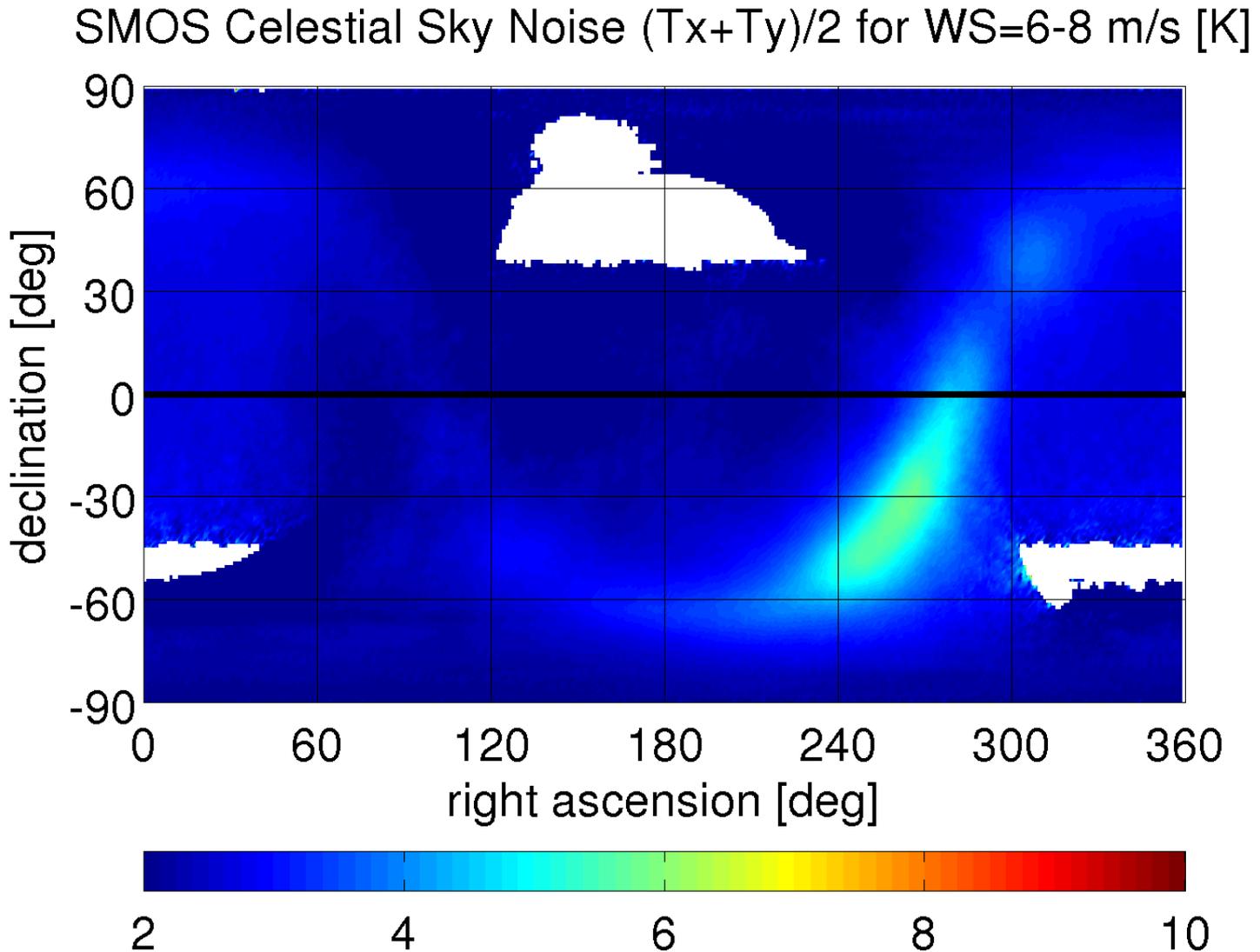
Température de brillance du Ciel réverbérée par la surface océanique Mesures SMOS - vents de 0 à 3 m/s-



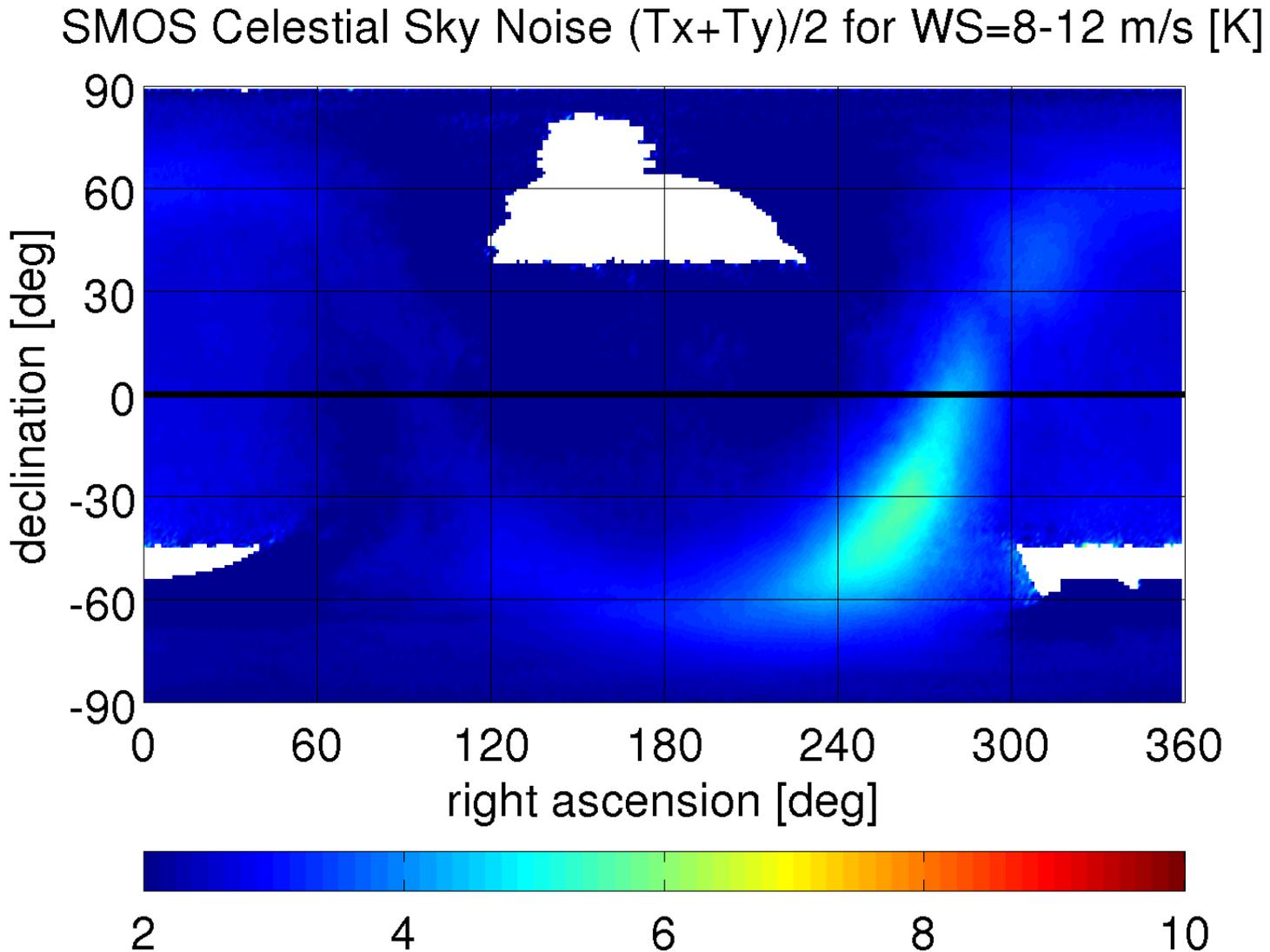
Température de brillance du Ciel réverbérée par la surface océanique
- vents de 3 à 6 m/s-



Température de brillance du Ciel réverbérée par la surface océanique
- vents de 6 à 8 m/s-



Température de brillance du Ciel réverbérée par la surface océanique - vents de 8 à 12 m/s-



Conclusions

La Salinité de surface: une variable clé du climat planétaire maintenant accessible depuis l'Espace grâce à SMOS

Une challenge pour la physique de la mesure & un instrument dont la complexité reste à explorer

Une capacité d'observation multi-dimensionnelle qui permet de filtrer au mieux les divers perturbations de la mesure

Des premiers résultats très prometteurs pour l'océanographie mais un effort certain nous attends pour atteindre pleinement nos objectifs

Un apport majeur pour le suivi spatio-temporelle des fronts salins à grandes échelles

Un potentiel accru et novateur pour, par exemple, mieux délinéer des structures dans les évènements extrêmes tels que les cyclones tropicaux (vent, vagues, flux d'eau douces,..)

SMOS et son nouveau domaine spectral de mesures permet de construire, en complément des capteurs actifs/passifs existant, une vision du visible aux ondes décimétriques quasi-continue des différents types de surface océaniques.

De nombreuses découvertes & applications en perspectives !

Collaborations Internationales



**Institut de Ciències del Mar/
Barcelona Expertise Center (ICM/CSIC-BEC)**



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA (UPC)**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Nansen Environmental and Remote
Sensing Center**



**Coastal Ocean Observing Center at the
University of New Hampshire (UNH)**

