

## *Altimétrie spatiale*

### **Application à l'étude des surfaces continentales**

*Frédéric Frappart (Observatoire Midi-Pyrénées)*

*Jeudi 4 septembre 2014 17h30 - 19h*

# **Plan**

**I Mesure altimétrique - Spécificités des surfaces continentales**

**II Traitement de la donnée - De la mesure altimétrique aux séries temporelles de niveau d'eau**

**III Principales applications de l'altimétrie satellitaire radar à l'étude des surfaces continentales**

**IV Complémentarité altimétrie/imagerie pour le suivi des eaux de surface**

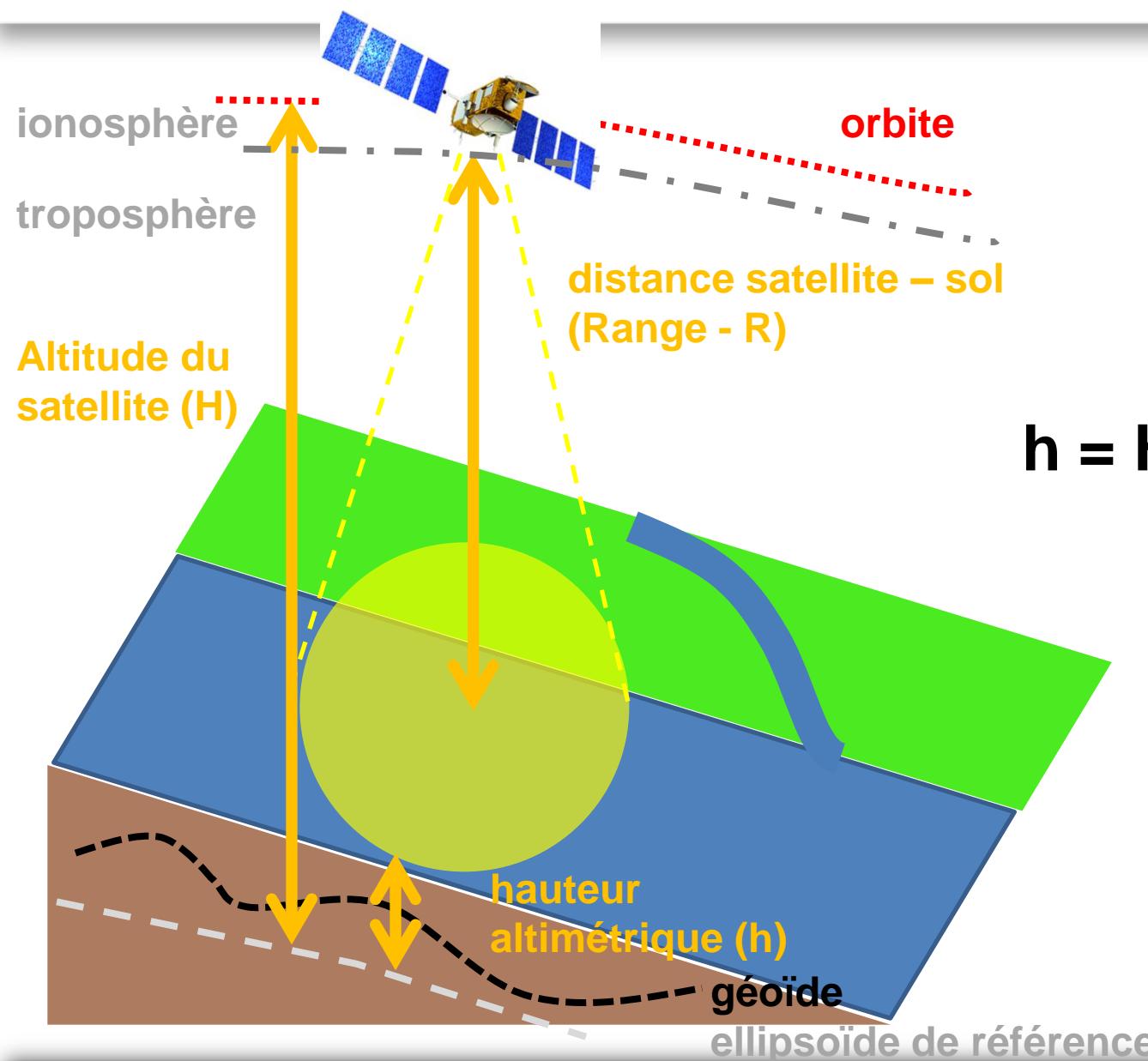
**V Caractérisation des surfaces continentales par le coefficient de rétrodiffusion**

# **Mesure altimétrique**

-

## **Spécificités des surfaces continentales**

# Estimation de la hauteur altimétrique



# **Types de correction**

Cf. cours de N. Picot, E. Obligis et J-P. Boy

- instrumentales : appliquées dans les GDR
- de propagation:
  - ionosphère
  - troposphère sèche et humide
  - biais d'état de mer (grands lacs et mers intérieures)
- géophysiques :
  - marée solide
  - marée polaire

# ***Corrections de propagation (1/2)***

- ionosphère:
  - bi-fréquence appliquée sur les océans déduite de la différence de trajet entre deux bandes de fréquence (Ku et C pour Topex/Poseidon, Jason-1 et Jason-2; Ku et S pour Envisat)
  - inapplicable sur les surfaces continentale car pénétration des ondes radar dans le sol sur les zones non recouvertes d'eau libre

⇒utilisation des cartes de contenu en électrons de la ionosphère (TEC), cf. cours d'Estelle Obligis  
Ex: modèle GIM (JPL, Harris et al., 1999)

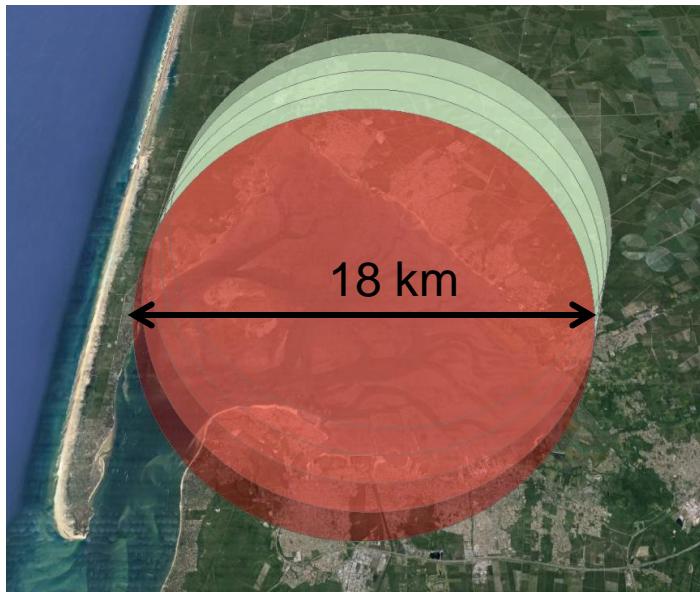
# ***Corrections de propagation (2/2)***

- troposphère sèche:  
déduite des sorties de modèles météorologiques (ECMWF)
  - troposphère humide:
    - contenu en vapeur d'eau déduit des mesures du radiomètre sur les océans
    - inapplicable sur les continents pour cause d'émissivité des surfaces
- ⇒ utilisation des sorties de modèles météorologiques

cf. cours d'Estelle Obligis

# *Empreinte au sol de l'altimètre*

**ENVISAT**



Bande Ku = empreinte au sol  
de 18 km de diamètre

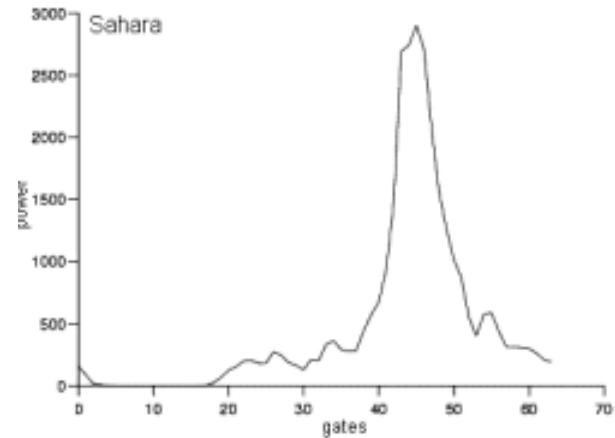
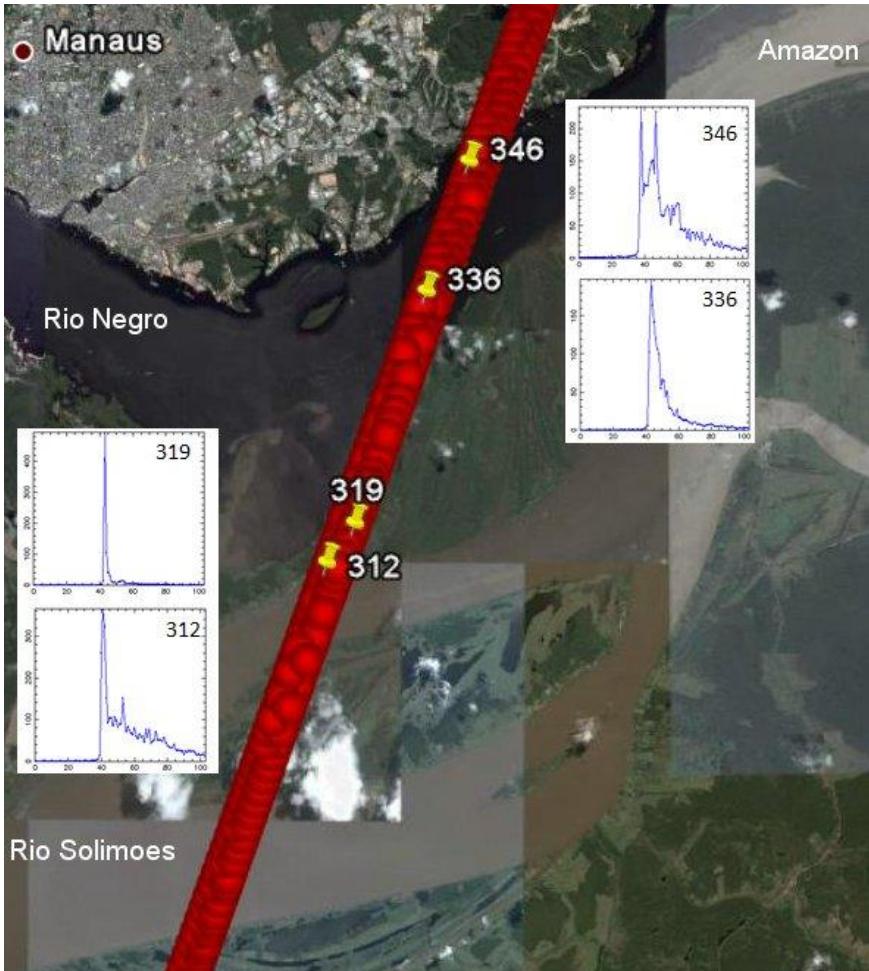
**SARAL**



Bande Ka = empreinte au sol  
de 6 km de diamètre

Spodar (2014)

# Echos radar sur les surfaces continentales



**Grande variété de formes d'onde très différentes du cas océanique (Brown, 1977) ou des calottes (Legrézy et Rémy, 1997)**

Radar altimetry tutorial

[http://www.altimetry.info/html/alti/principle/waveform/land\\_en.html](http://www.altimetry.info/html/alti/principle/waveform/land_en.html)

## **Traitemen**t**t de la donnée**

-

**De la mesure altimétrique  
aux séries temporelles de  
niveau d'eau**

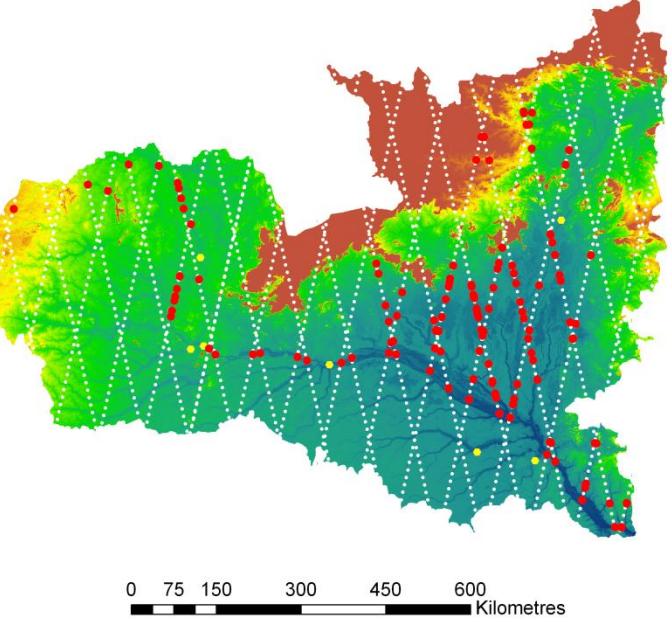
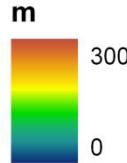
# Intérêt de l'altimétrie

## Rio Negro, Amazonie



- Envisat stations
- In situ stations
- Envisat tracks

SRTM DEM



- Nombre de stations plus important que réseaux classiques
- Suivi des niveaux des fleuves, lacs et plaines d'inondation
- Niveaux d'eau par rapport à la même référence

- Plus faible répétitivité temporelle (10 à 35 jours)
- Précision moindre (> 10 cm)

# ***Choix de l'algorithme de retracking*** (1/2)

Complexité des échos radar sur les surfaces continentales

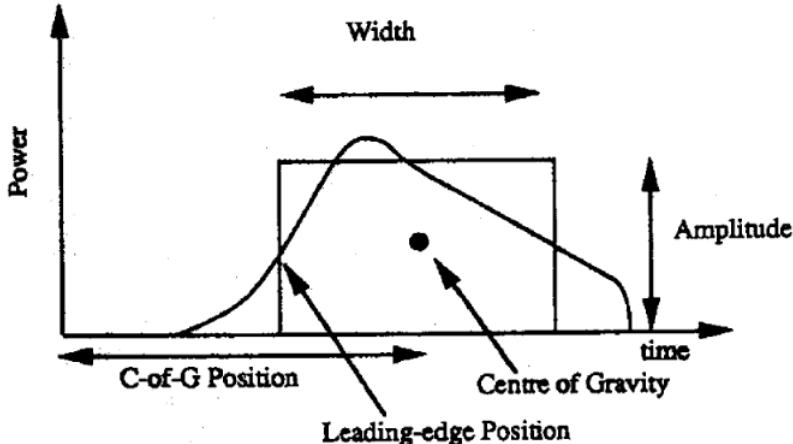
⇒ pas (encore) d'algorithme dédié

Pour le suivi des eaux de surface, différentes études ont montré que Ice-1 et Ice-2 fournissent de meilleurs résultats que Ocean ou Sea Ice (Frappart et al., 2006a; Silva et al., 2010; 2012).

Ranges Ice-1 disponibles pour Envisat, Jason-2 et SARAL (GDR), et Topex/Poseidon (CASH)

# Choix de l'algorithme de retracking (2/2)

Ice-1 ou OCOG (Wingham et al., 1986; Bamber, 1994)



$$\text{centre of gravity} = \frac{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} ny^2(n)}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n)}$$

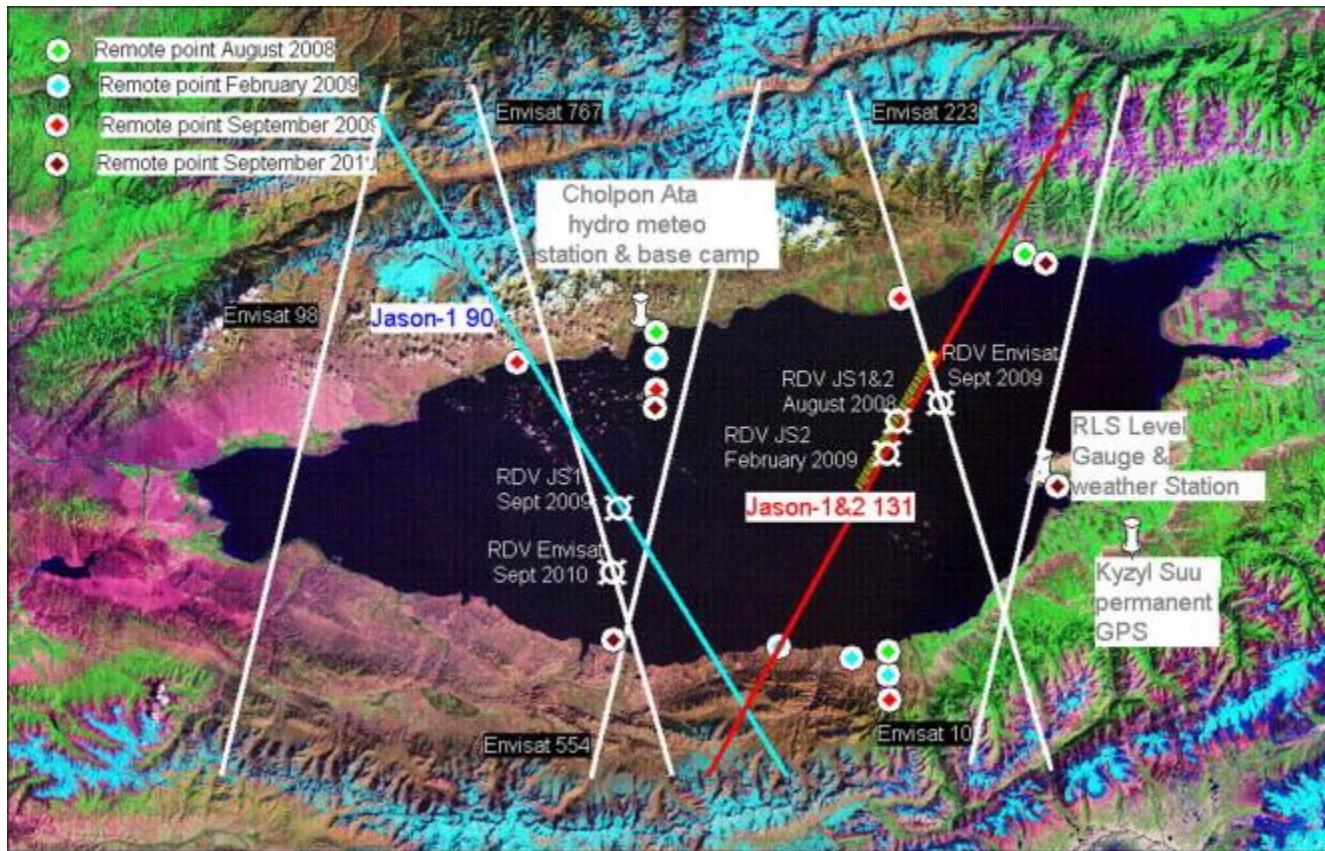
$$\text{amplitude} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^4(n)}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n)}}$$

$$\text{width} = \frac{\left( \sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n) \right)^2}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^4(n)}$$

Ice-2 (Legrésy & Rémy, 1997)  
Cf. cours de Frédérique Rémy

# *Précision de la mesure* (1/2)

Lac Issyk-Kul (Crétaux et al., 2009; 2013)



Biais (Ocean - cm):

Envisat:  
 $48.1 \pm 6.6$ ,

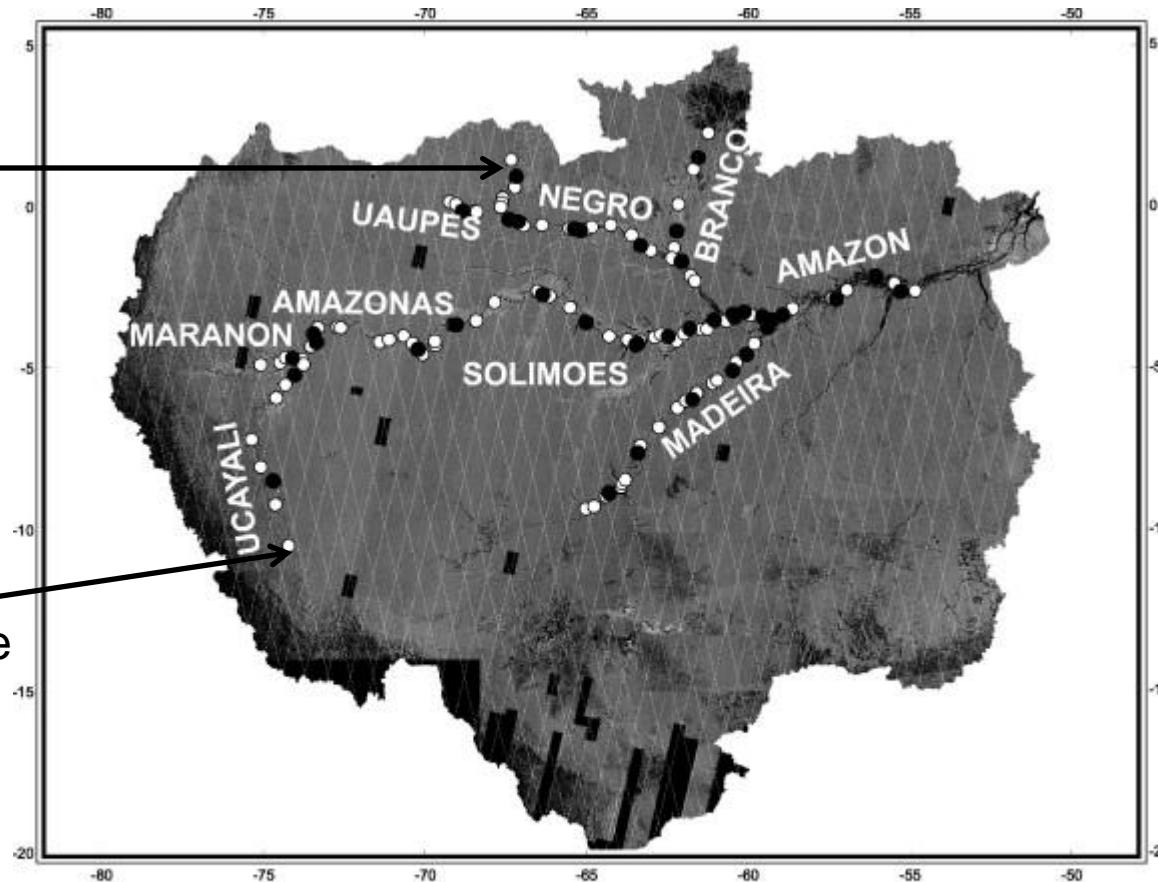
GFO:  
 $7.5 \pm 4.0$

T/P:  
 $0 \pm 4.3$

Jason-1:  
 $7.0 \pm 5.5$

# *Précision de la mesure* (2/2)

Amazone (Calmant et al., 2013; Seyler et al., 2013)



Biais

(ENVISAT/Ice-1)  
 $1,044 \pm 0,212$  m

(Jason-2/Ice-1)  
 $0,244 \pm 0,041$  m

# *Dispersion de la mesure*

(1/2)

Auteurs	Année	Satellite	Période	Site	EQM (m)	Retracking
Morris & Gill	1994	Topex/Poseidon	09-11/1993	Grands lacs	0,04	Ocean
Birkett	1995	Topex/Poseidon	1993-1995	12 lacs	0,04	Ocean
Birkett	1999	Topex/Poseidon	1993-1997	6 lacs d'Afrique de l'est	0,04	Ocean
Medina et al.	2010	Envisat	2004-2006	Lac Izabal	0,09	Ocean
Ricko et al	2012	Multiple	1993-2011	18 lacs	0,20 à 1,41	Multiple
Baup et al.	2014	Envisat	2003-2010	Lac La Bure	0,27	Ice-1

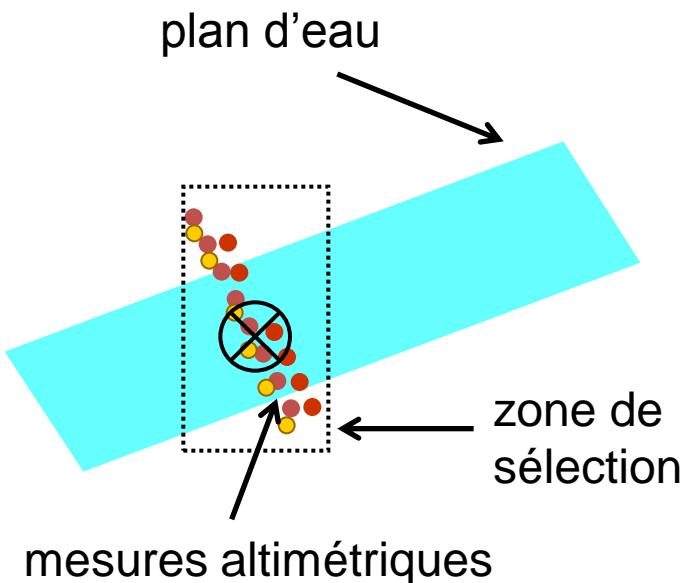
# Dispersion de la mesure

(2/2)

Auteurs	Année	Satellite	Période	Site	EQM (m)	Retracking
Koblinsky et al.	1993	Geosat	1985-1989	Amazone	0,7	Ocean
Birkett et al.	1998/2002	Topex/Poseidon	1993-2001	Amazone	1,1	Ocean
Frappart et al.	2006a	Envisat	2003-2004	Amazone	0,3	Ice-1
Frappart et al.	2006b	Topex/Poseidon	1993-2002	Mekong	0,23	Ocean
Frappart et al.	2006b	Envisat	2003	Mekong	0,15	Ice-1
Silva et al.	2010	Envisat	2003-2008	Amazone	0,26 à 0,56	Ice-1
Papa et al.	2010	Envisat	2003-2009	Gange	0,26	Ice-1

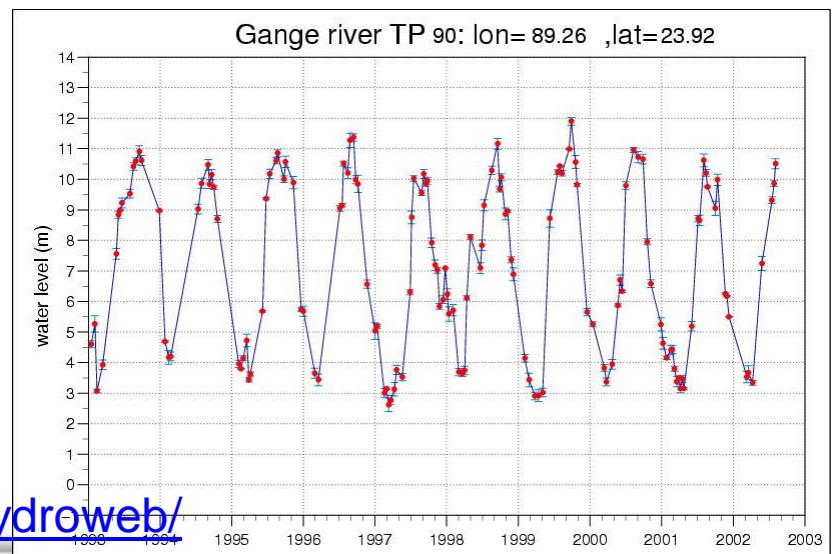
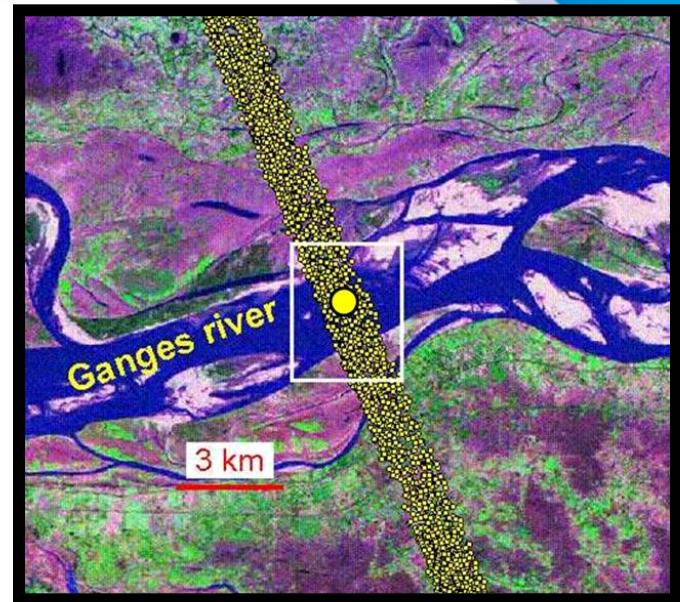
# Station virtuelle - Définition

Intersection d'une trace altimétrique et d'un plan d'eau où l'on peut déterminer les variations temporelles de niveau d'eau

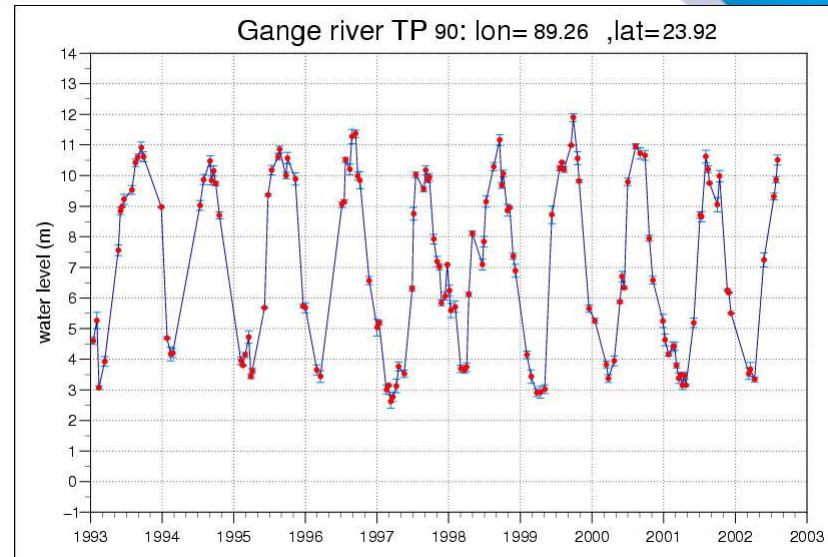
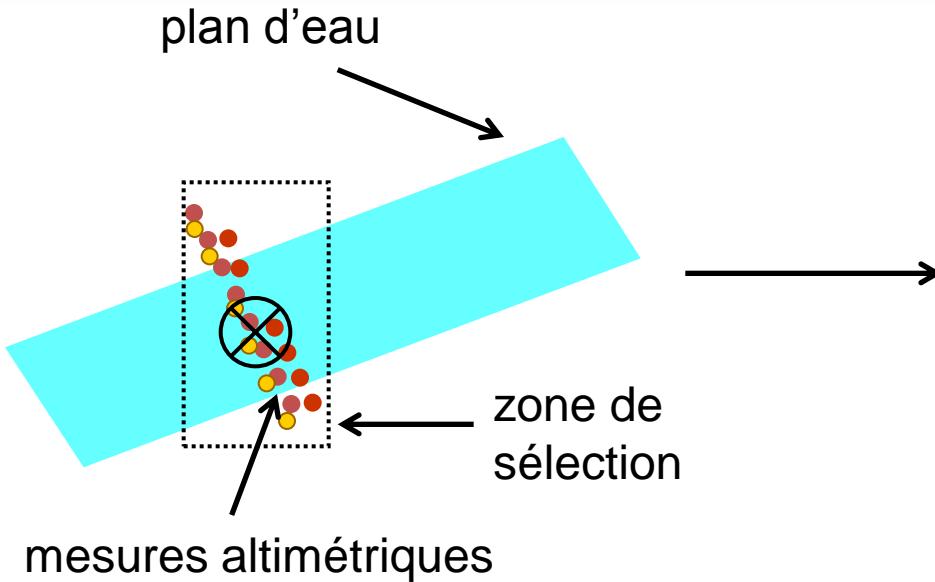


Hydroweb (LEGOS-OMP)

<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/soa/hydrologie/hydroweb/>



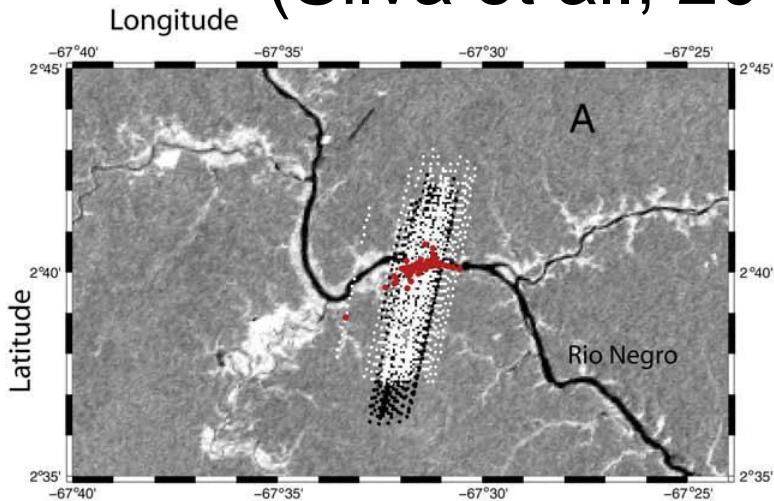
# Station virtuelle – Construction



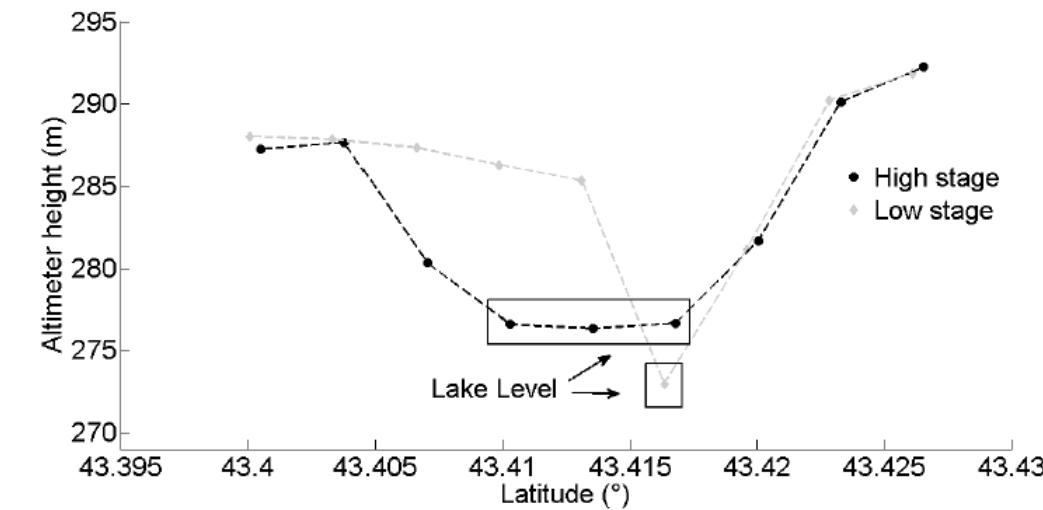
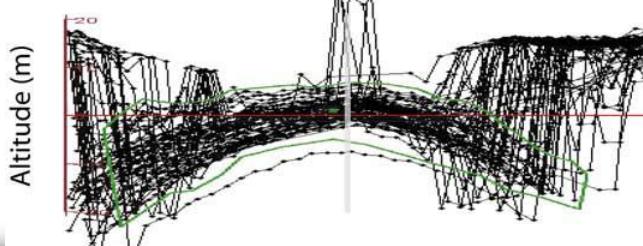
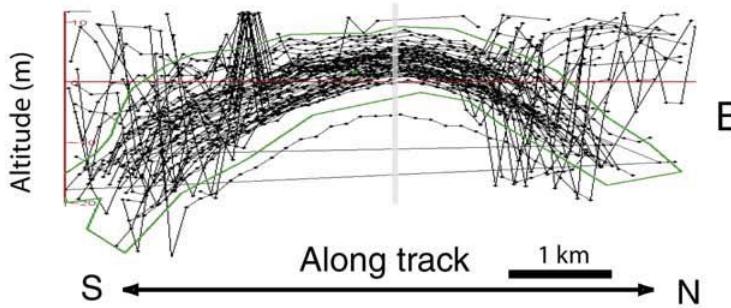
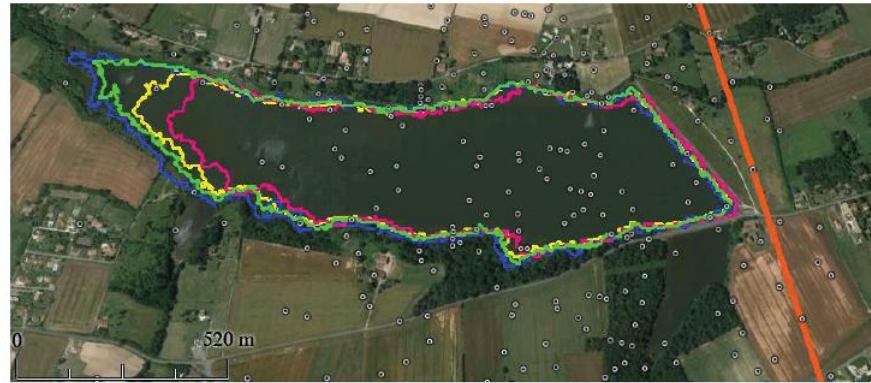
- 1) Fenêtre rectangulaire  $h(t) = \langle h_i(t) \rangle \pm \sigma_{L_2}(h_i(t))$   
(Koblinsky et al., 1993)
- 2) Fenêtre rectangulaire  $h(t) = \text{médiane}(h_i(t)) \pm \sigma_{L_1}(h_i(t))$   
(Frappart et al., 2006a)
- 3) Sélection fine  $h(t) = \text{médiane}(h_i(t)) \pm \sigma_{L_1}(h_i(t))$   
(Silva et al., 2010)

# Profils le long de la trace

(Silva et al., 2010)



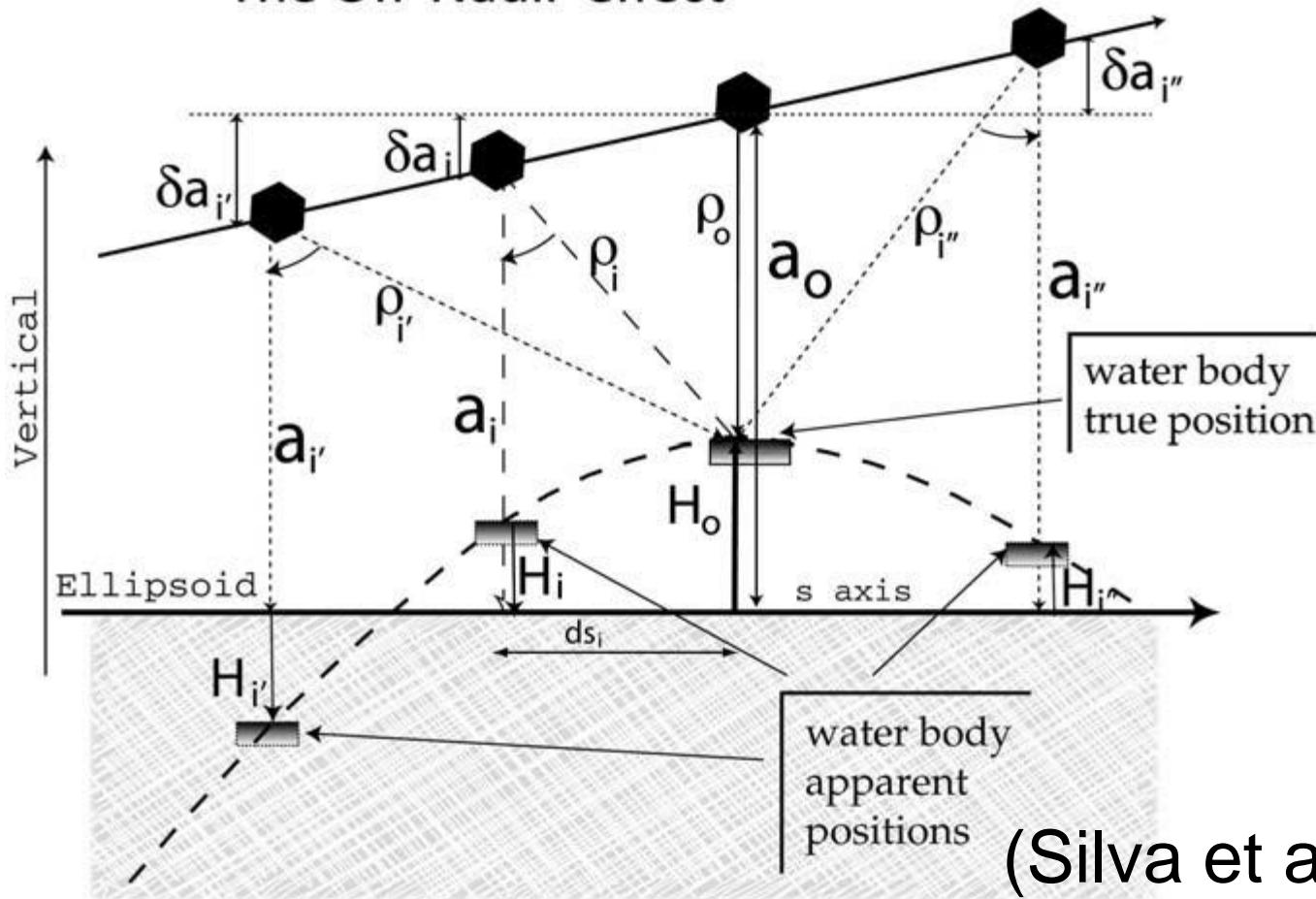
(Baup et al., 2014)



# Correction d'accrochage (1/2)

Accrochage:

The Off-Nadir effect



(Silva et al., 2010)

# Correction d'accrochage (2/2)

$$h = H - \underbrace{\left( R + \sum \Delta R_{geophysical} + \sum \Delta R_{environmental} \right)}_{R_{corr}}$$

$$h(s_0) = h(s_i) + \frac{1}{2R_{corr}(s_0)} \left( 1 + \left( \frac{\partial H}{\partial s}(s_i) \right)^2 \right) ds^2$$

$$h(s_0) = as_0^2 + bs_0 + c$$

$$s_0 = -\frac{b}{2a} \text{ and } h(s_0) = c - \frac{b^2}{4a}$$

# **Station virtuelle – Exemple (1/9)**

Construction de stations virtuelles avec le logiciel  
Multi-mission Altimetry Processing Software (MAPS)  
Développé en collaboration entre l'OMP et l'OASU,  
bientôt distribué par le CTOH

- 1) Sélection grossière de la zone d'étude à l'aide de Google Earth
- 2) Sélection manuelle précise pour éliminer les points faux
- 3) Correction éventuelle d'accrochage
- 4) Génération de la série temporelle de hauteur d'eau

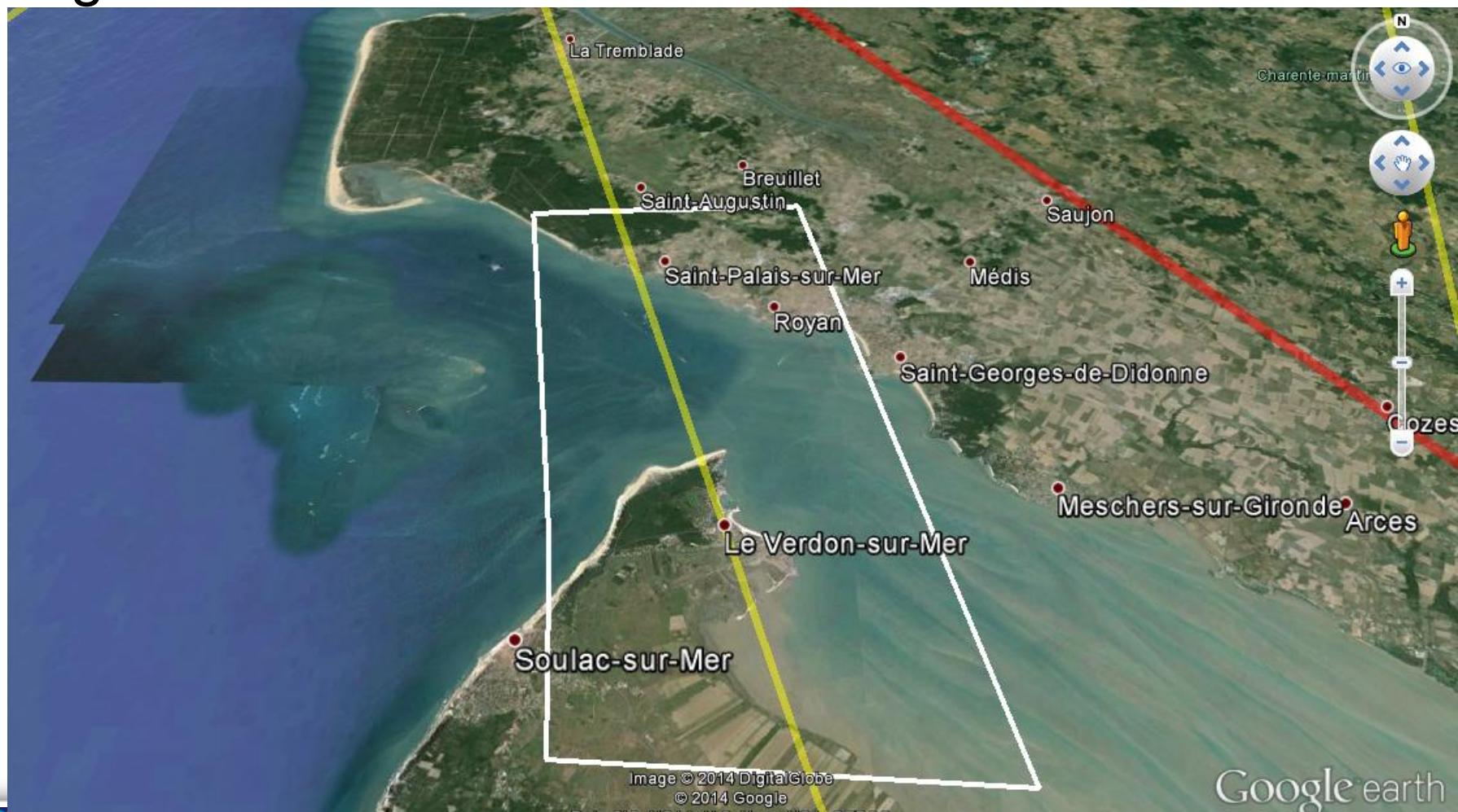
## **Station virtuelle – Exemple (2/9)**

Permet le traitement des données Jason-1, Jason-2, Envisat et SARAL, et bientôt ERS-2, Topex/Poseidon et GFO pour différents types de surface (fleuves, petits et grands lacs, et océan), et la visualisation de l'ensemble des paramètres extraits des GDR et des hauteurs d'eau dérivées avec les différents algos de retracking disponibles.

Permettra la visualisation de paramètres complémentaires ( $\sigma_0$ , Tb, paramètres de la forme d'onde) sur les continents, et la SSH et la SLA haute fréquence (10, 20, 40 Hz) pour différentes combinaisons de corrections

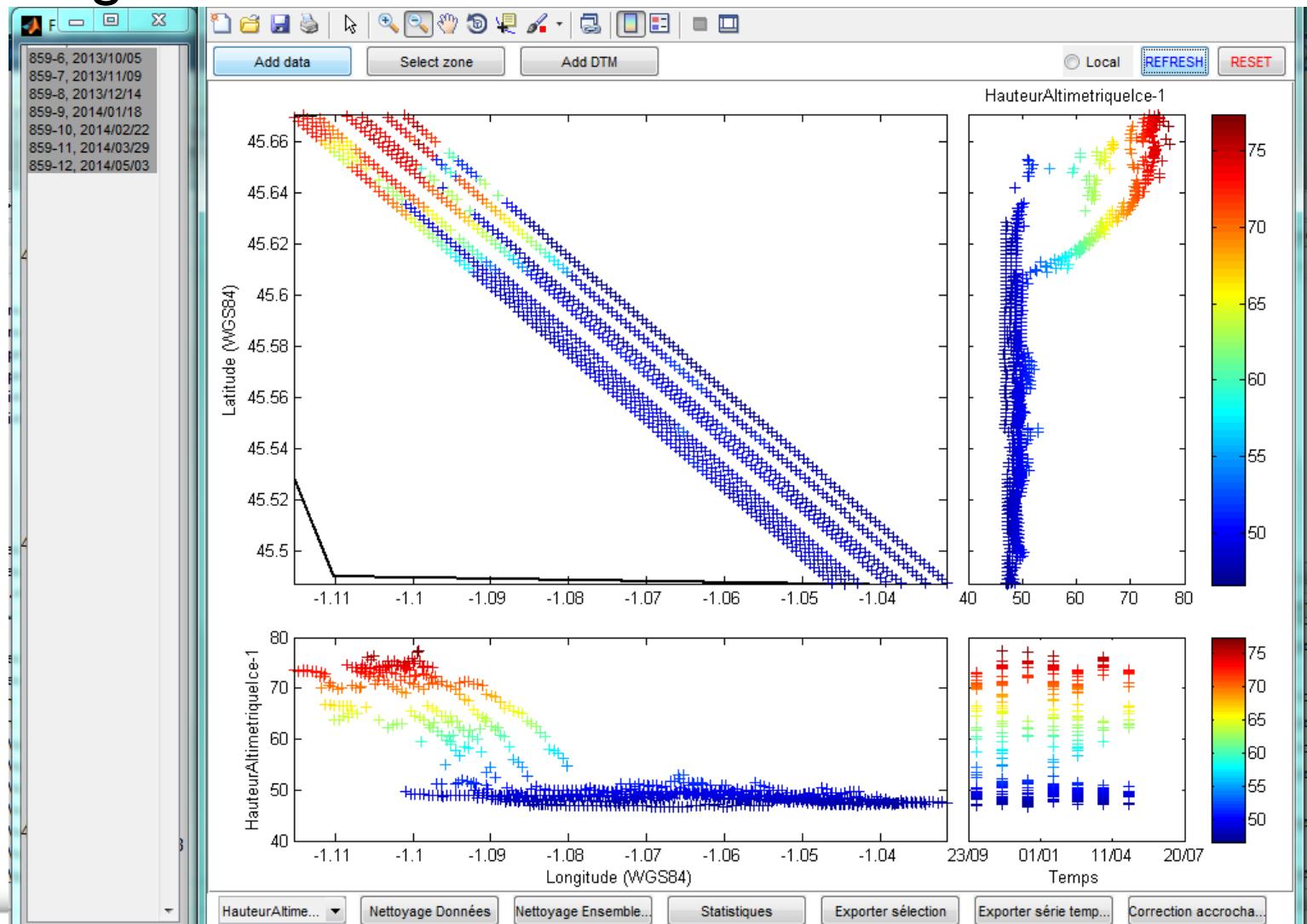
# **Station virtuelle – Exemple (3/9)**

1) Sélection grossière de la zone d'étude à l'aide de Google Earth



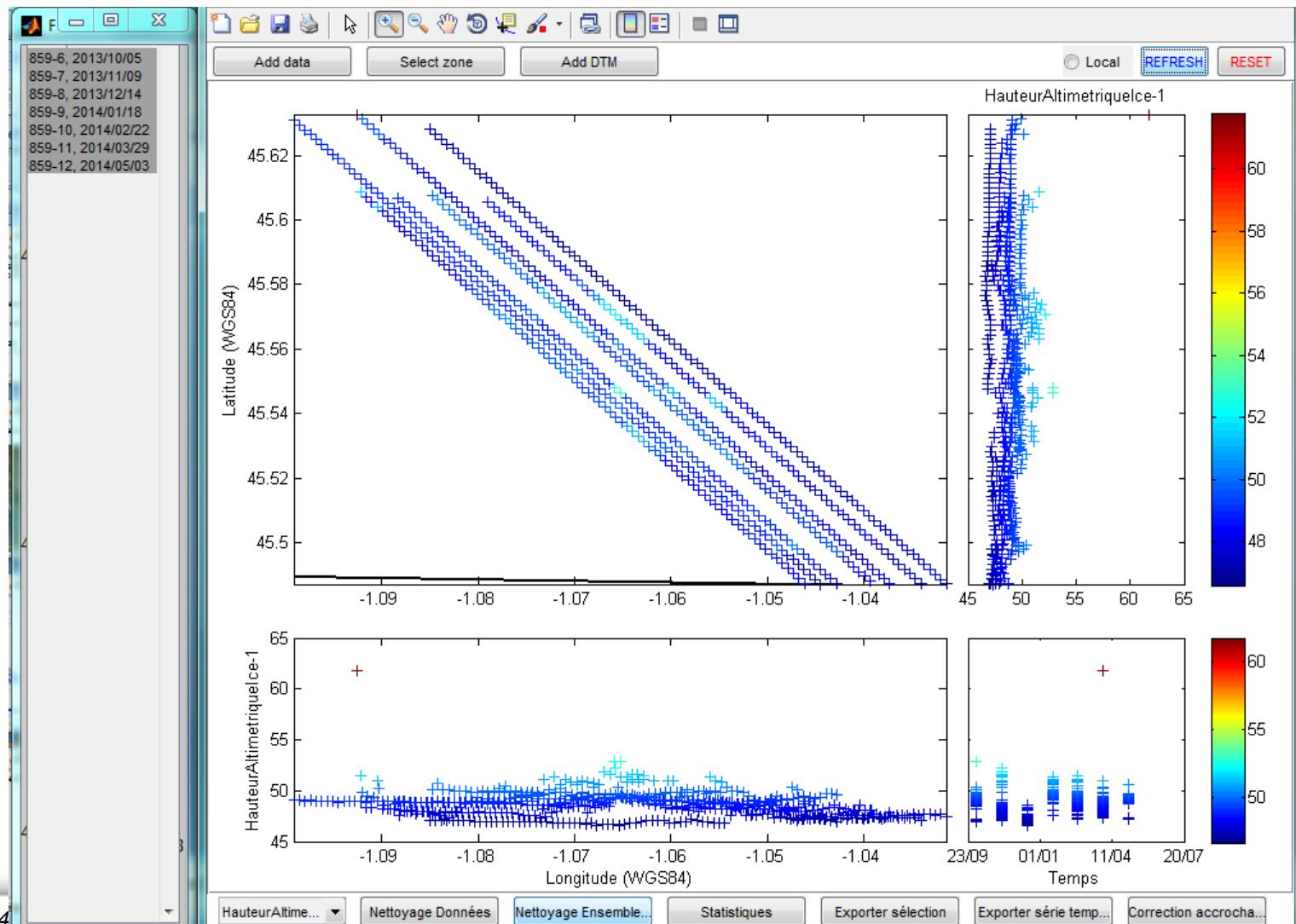
# Station virtuelle – Exemple (4/9)

## 2) Affichage des données

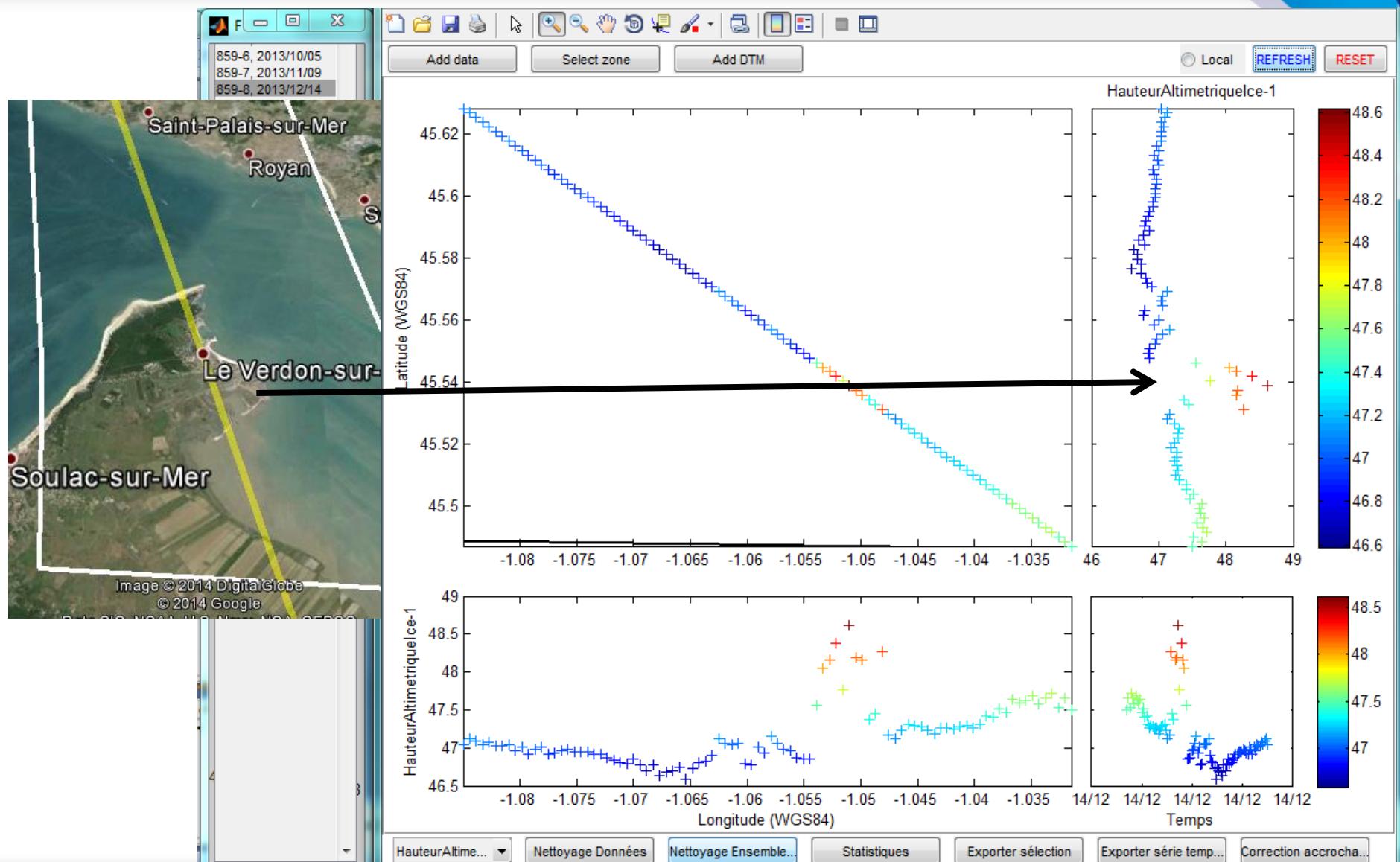


# Station virtuelle – Exemple (5/9)

2) Sélection manuelle précise pour éliminer les points faux

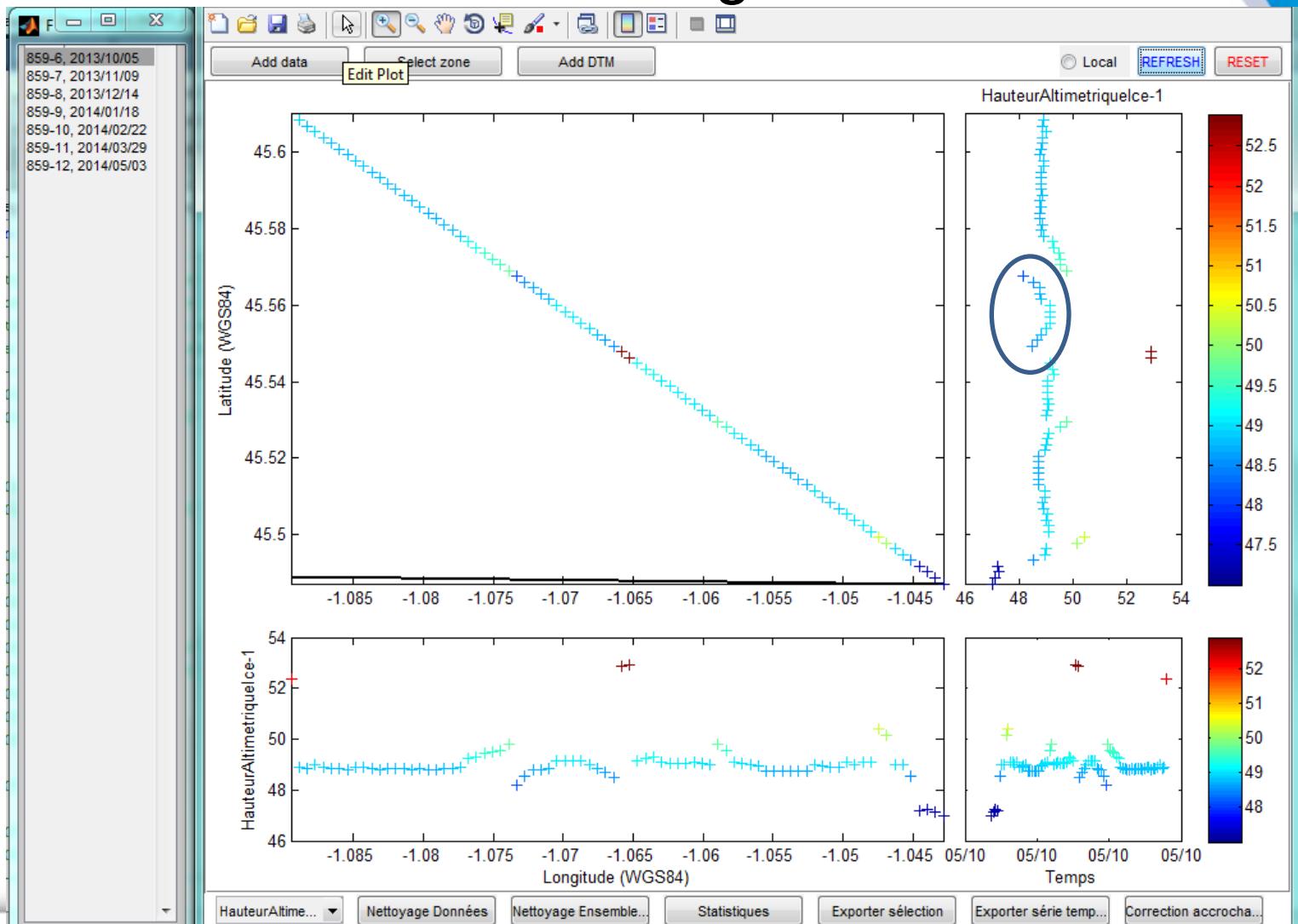


# Station virtuelle – Exemple (6/9)

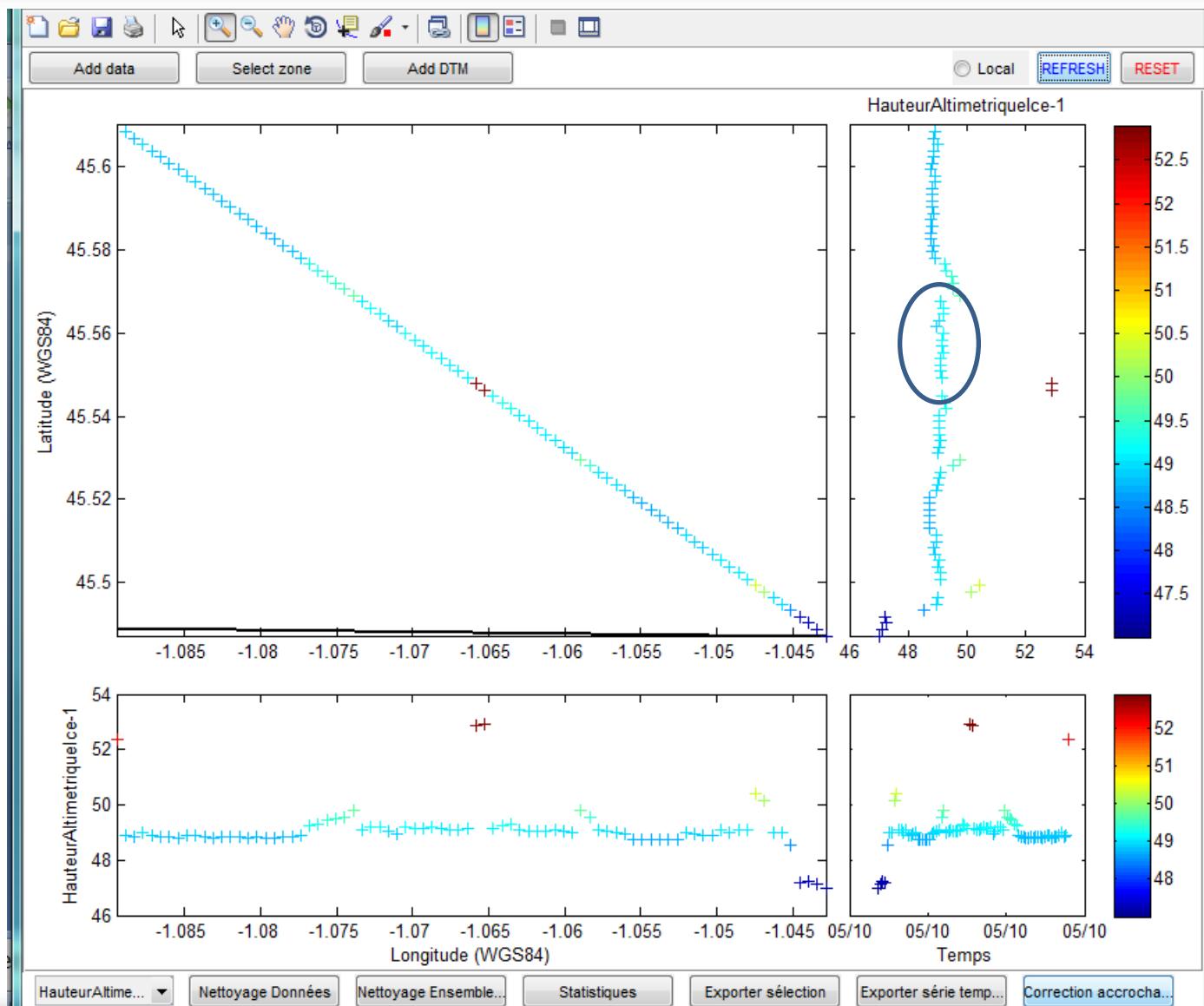


# Station virtuelle – Exemple (7/9)

## 3) Correction éventuelle d'accrochage

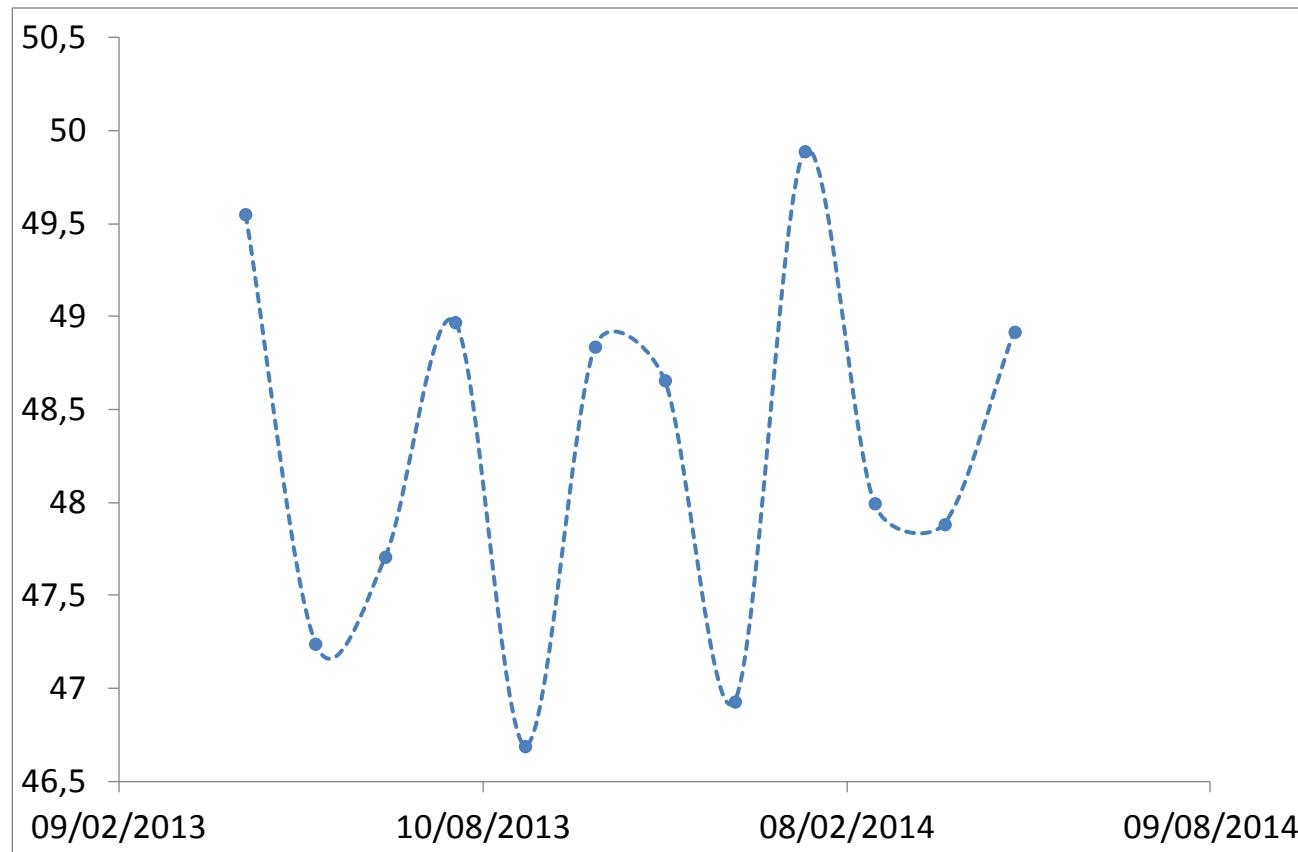


# Station virtuelle – Exemple (8/9)



# **Station virtuelle – Exemple (9/9)**

## 4) Génération de la série temporelle de hauteur d'eau



# *Limites*

Pas de critère de détection des surfaces en eau  
Pas de détection du dépointage

⇒ Automatisation difficile (sauf pour grands lacs)

Précision des corrections troposphériques sur les continents

Limites de détection des surfaces en eau (  $d > 200 - 300$  m)

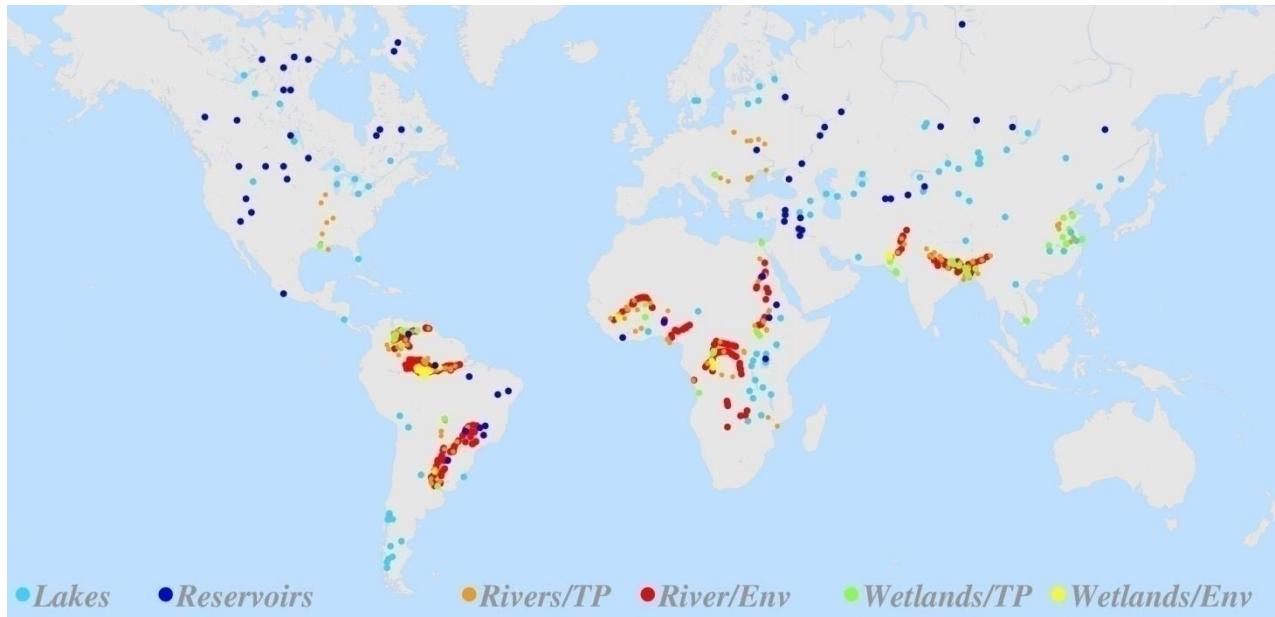
# *Base de données (1/4)*

## Hydroweb (LEGOS-OMP)

<http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/>

Lacs > 100 SV et fleuves > 250 SV

Multi-missions: Topex/Poseidon, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, SARAL



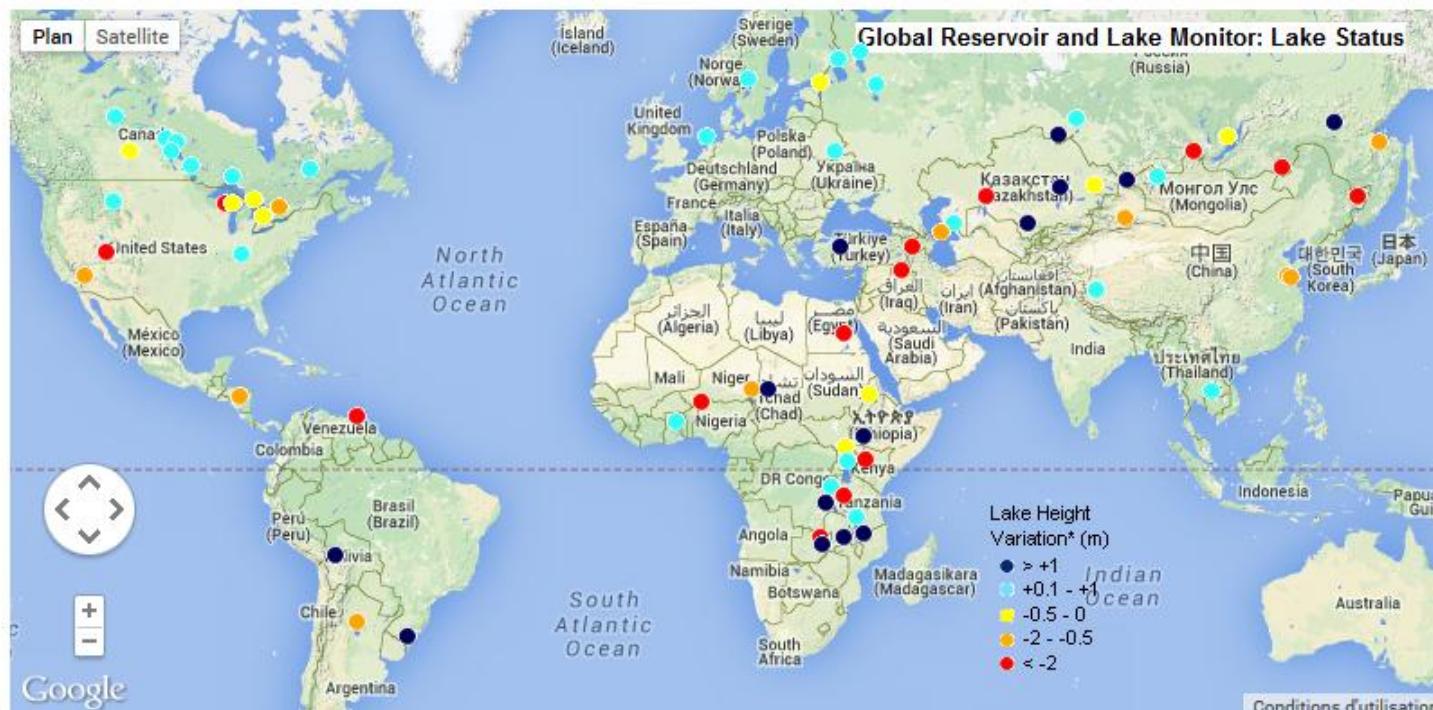
## **Base de données (2/4)**

# Global Reservoir and Lake Monitor (USDA)

[http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global\\_reservoir/](http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/)

## Lacs > 150 SV

Multi-missions: Topex/Poseidon, ERS-1&2, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, SARAL



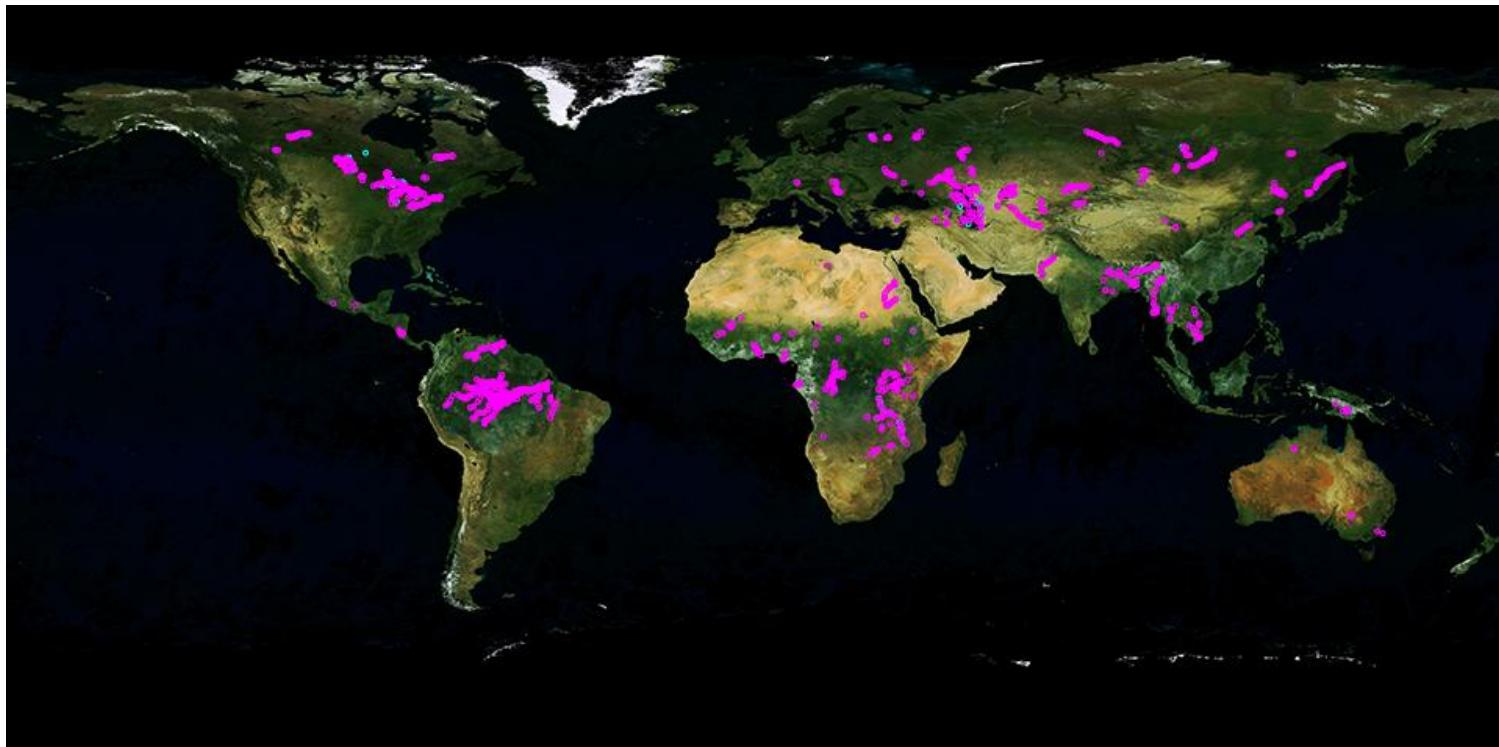
# *Base de données (3/4)*

## River and Lake (DMU/ESA)

<http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/RiverLake/shared/main>

Lacs > 100 SV et Fleuves > 200 SV

Multi-missions: Envisat, Jason-2



## **Base de données (4/4)**

# DAHITI (DGFI)

<http://openadb.dgfi.badw.de/index.php?id=85>

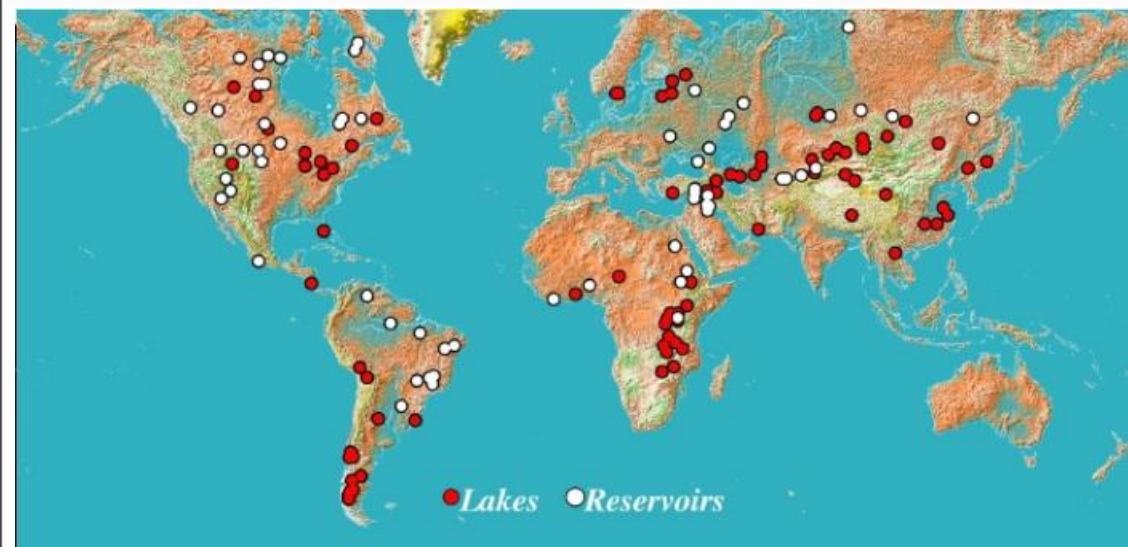
# Lacs > 150 SV et Fleuves > 30 SV

Multi-missions: Topex/Poseidon, GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2, SARAL, Cryosat-2



# **Principales applications de l'altimétrie satellitaire radar à l'étude des surfaces continentales**

# Réseaux de stations virtuelles



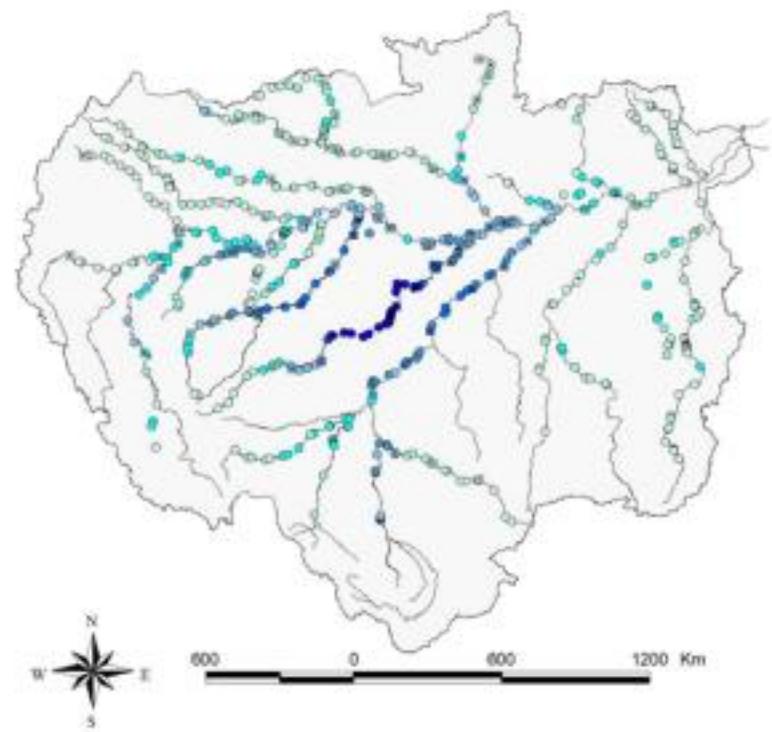
Plus de 500 SV dans le bassin amazonien

Silva et al. (2012)

Lacs > 100 SV

Multi-missions: Topex/Poseidon,  
GFO, Jason-1, Envisat, Jason-2,  
SARAL

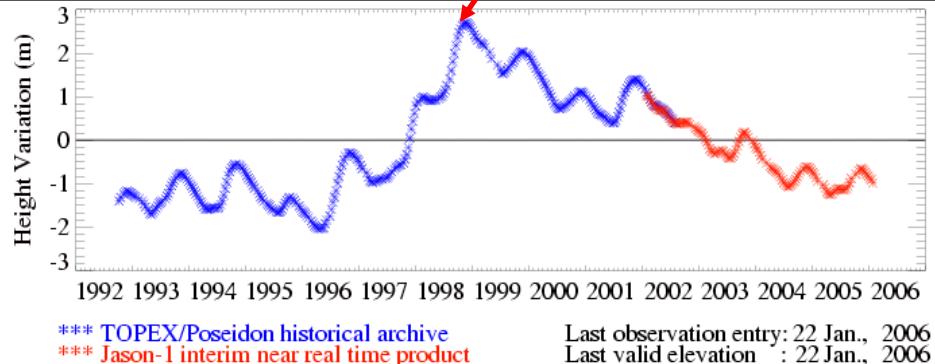
SOLS (Crétaux et al., 2011)



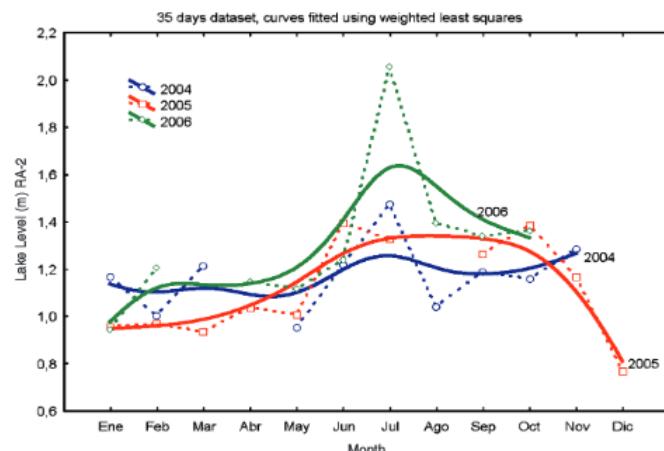
# Relation avec le climat (1/2)

Birkett et al. (1999)

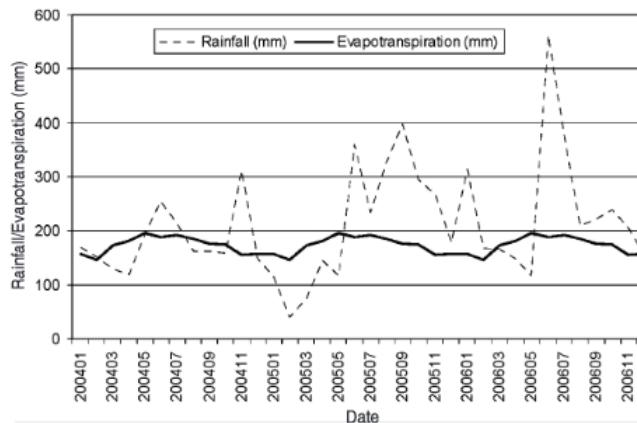
Decrease in lake water levels since 1997/98 El Niño



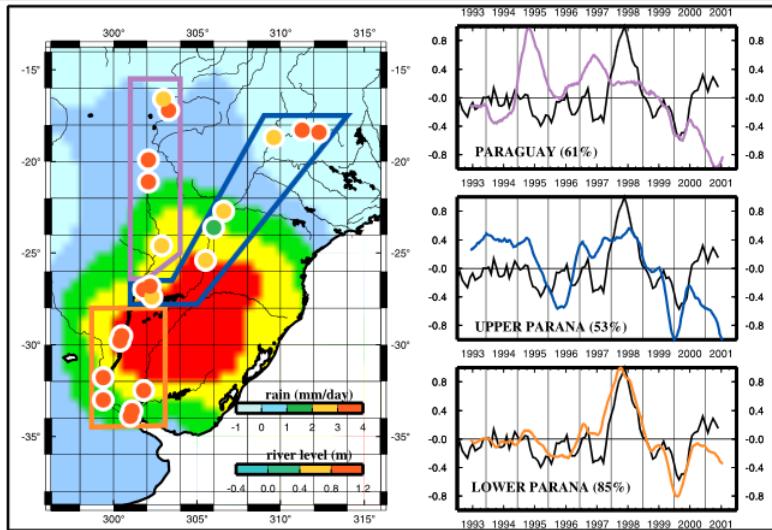
Variations des niveaux de lacs en réponse à la variabilité climatique  
Exemple des lacs africains  
(Birkett et al., 1999; Birkett, 2000;  
Mercier et al., 2002; Becker et al., 2010)



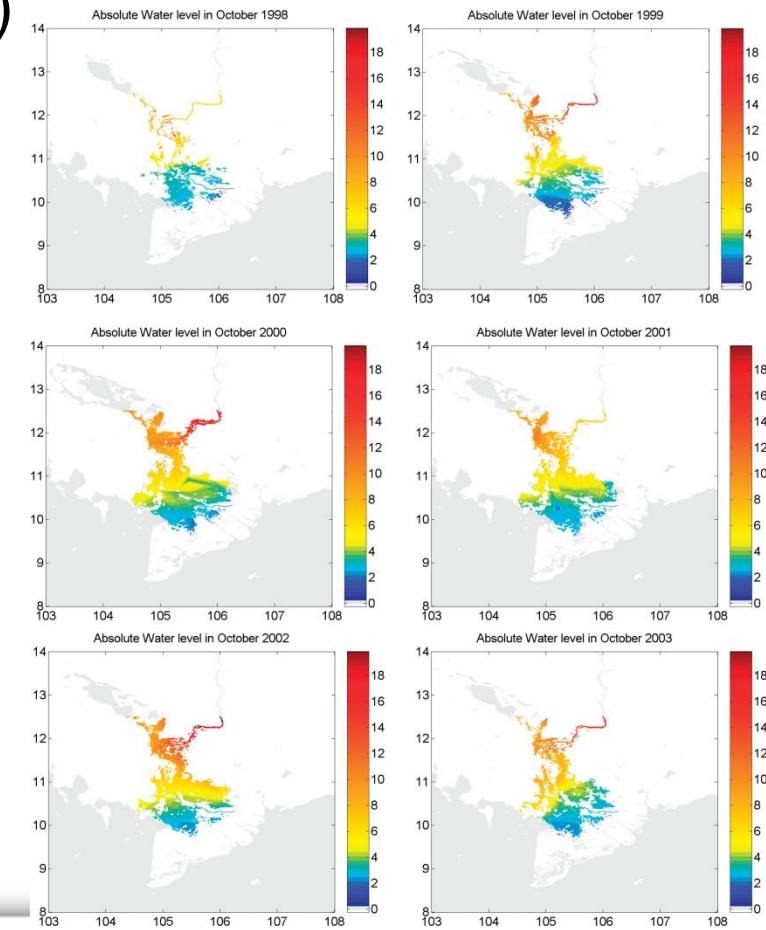
Effets conjugués d'El Niño et de l'oscillation australe sur les niveaux du lac Izabal au Guatemala  
(Medina et al., 2010)



# *Relation avec le climat (2/2)*

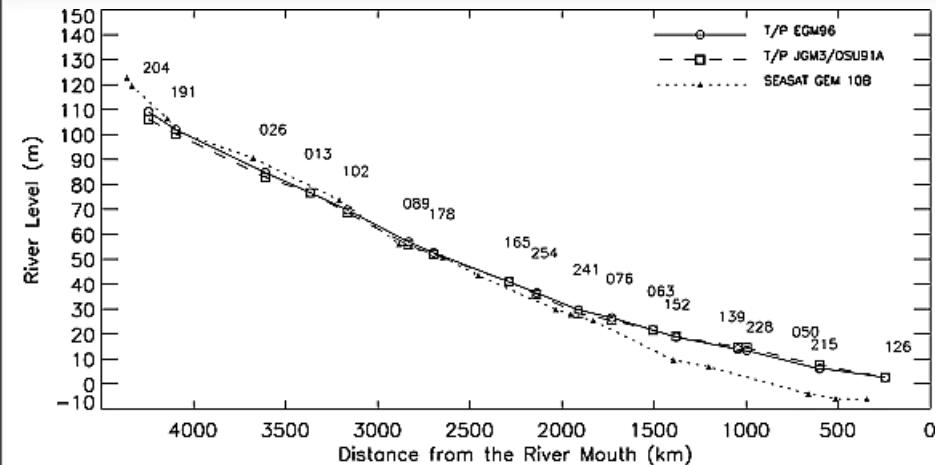


Variations des niveaux d'eau dans le bassin du Rio de la Plata en réponse à la variabilité climatique (Maheu et al., 2003)

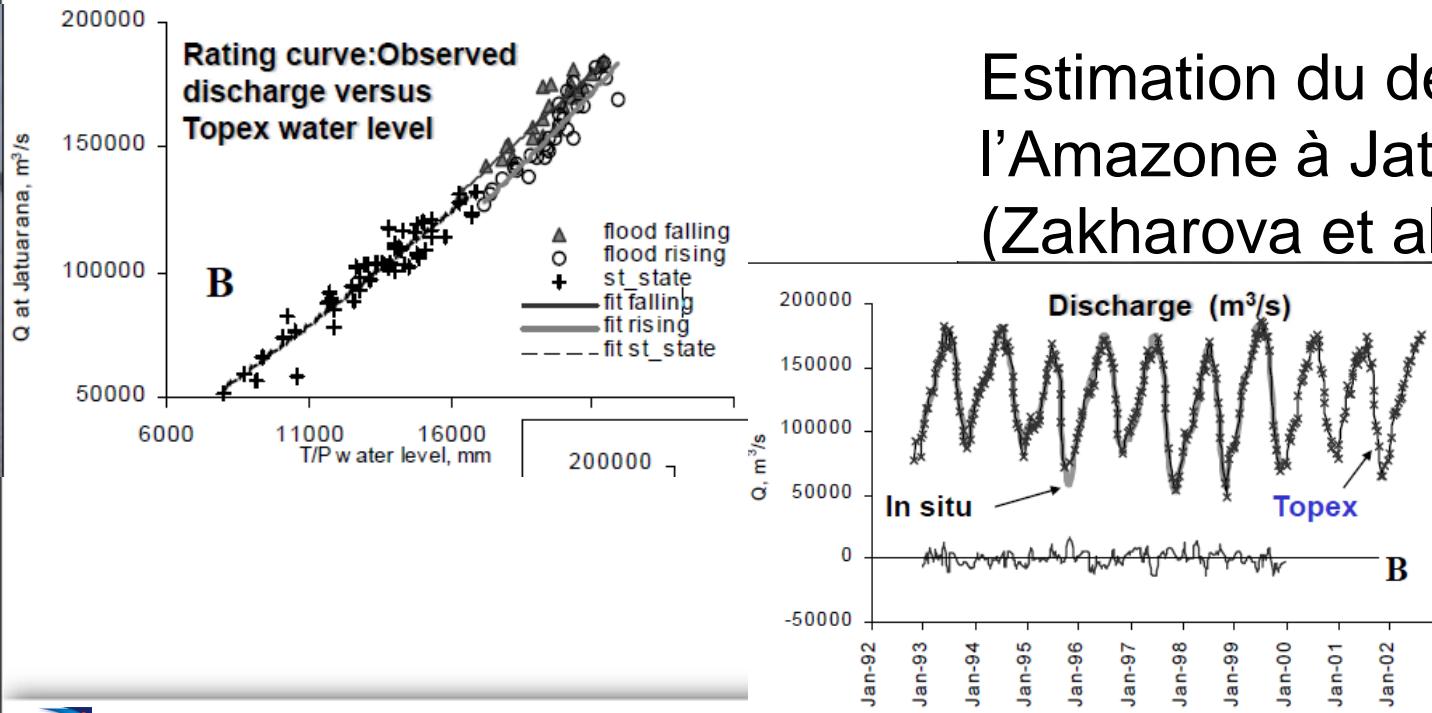


Variations des niveaux d'eau dans les plaines d'inondation du Mékong par altimétrie et imagerie (cf. 4<sup>ème</sup> partie) (Frappart et al., 2006b)

# Pentes et débits



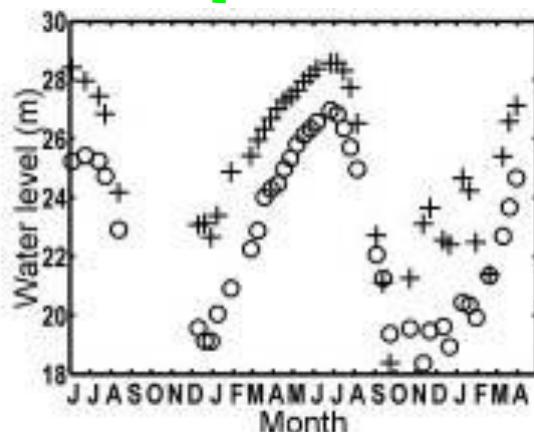
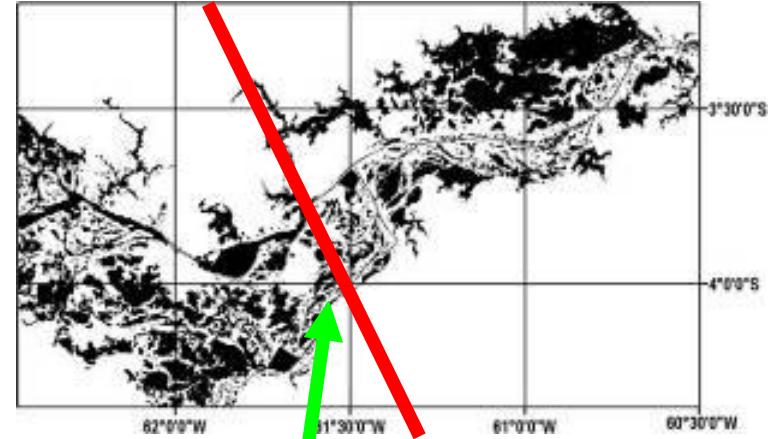
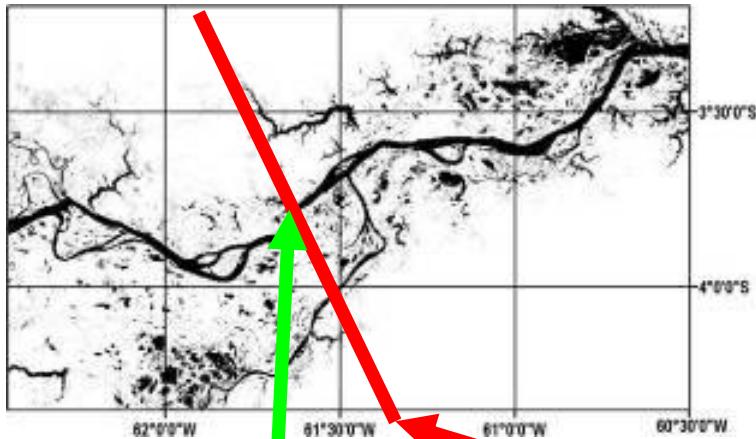
Profil longitudinal moyen du cours principal de l'Amazone au cours de l'année hydrologique 1995-1996 (Birkett et al., 2002)



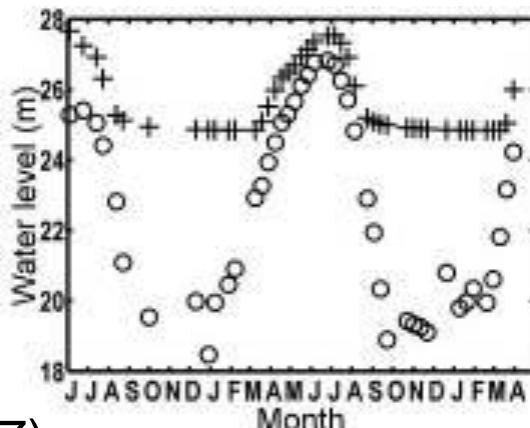
Estimation du débit de l'Amazone à Jatuarana (Zakharova et al., 2006)

# *Validation des modèles*

Modélisation hydrodynamique des plaines d'inondation avec LISFLOOD (P. Bates, U. Bristol): 2D, équations de Navier & Stokes



+ modèle  
o altimétrie

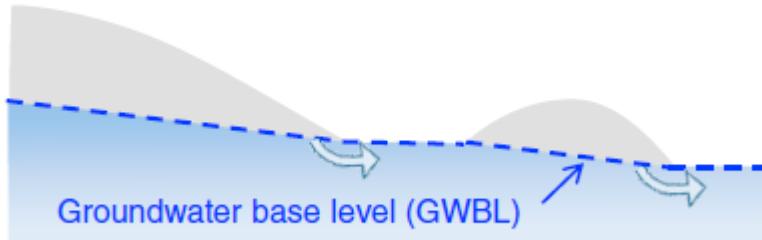


Wilson et al. (2007)

# Carte des niveaux d'eau des nappes

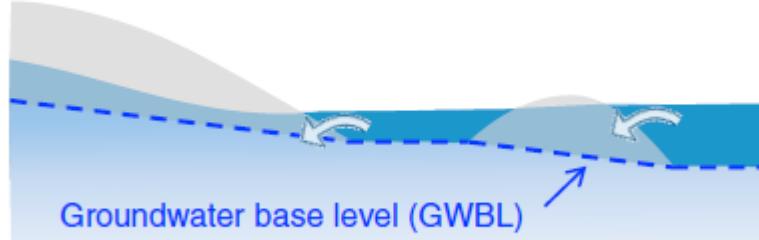
a) low-water periods

hillslope surface    floodplain    bank    river

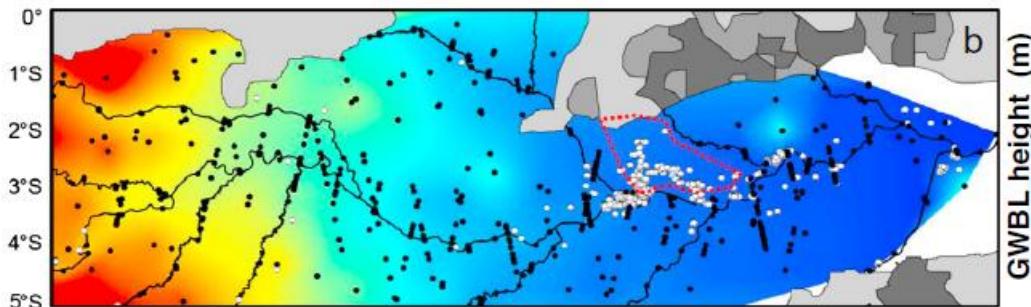


b) high-water periods

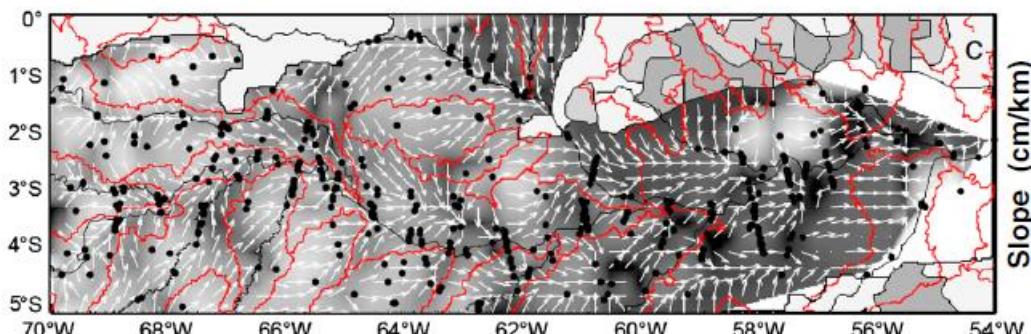
hillslope surface    floodplain    bank    river



open water    saturated zone    seasonally saturated zone    unsaturated zone    water fluxes



GWBL height (m)



Slope (cm/km)

Pfeffer et al. (2014)

## **Complémentarité altimétrie/imagerie pour le suivi des eaux de surface**

# *Eaux de surface*

**Rôle important dans les cycles hydrologiques et biogéochimiques globaux**

- **Réservoir du stock d'eau sur les continents**
- **Part des apports d'eau douce aux océans via les débits des fleuves**  
    ⇒ **variations du niveau de la mer**
- **Sources pour la recharge des aquifères**
- **Les zones humides sont la principale source d'émission de CH<sub>4</sub>**  
    ~ 20 – 40%

# **Suivi des eaux de surface**

**Mesurer l'étendue et le stock d'eau de surface : enjeu crucial pour l'hydrologie**

**A l'heure actuelle, connaissance lacunaire des variations des stocks d'eau de surface aux échelles de temps annuel et interannuel**

**Besoin pour une mission satellitaire dédiée au suivi des eaux de surface du globe (Alsdorf & Lettenmaier, 2003;  
Alsdorf et al., 2007)**

⇒ **Surface Water and Ocean Topography (SWOT)**

# *Suivi global et continu des eaux de surface*

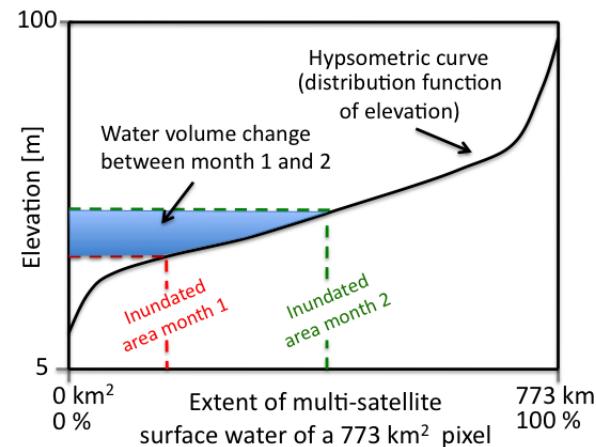
En combinant :

- la superficie des zones humides provenant d'images satellitaires
- les niveaux d'eau des lacs, fleuves, plaines d'inondation par altimétrie radar

On peut caractériser la dynamique du stock d'eau de surface à l'échelle du bassin

# Méthode

- Interpolation bi-linéaire des niveaux d'eau altimétriques sur les zones en eau provenant de l'imagerie satellitaire (Frappart et al., 2005)
- Détermination de courbes hypsométriques pour estimer l'élévation d'un pixel inondé:  
$$h(\lambda, \varphi, t) = f(\text{inondation}(\lambda, \varphi, t))$$

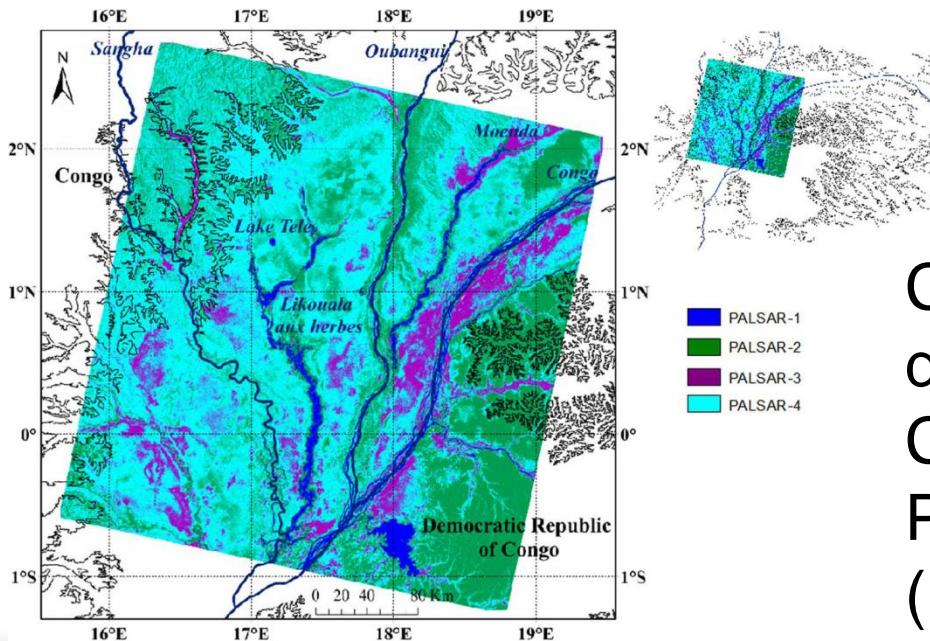


Frappart et al. (2012)

- Calcul des variations volume d'eau de surface

# Cartographie des inondations

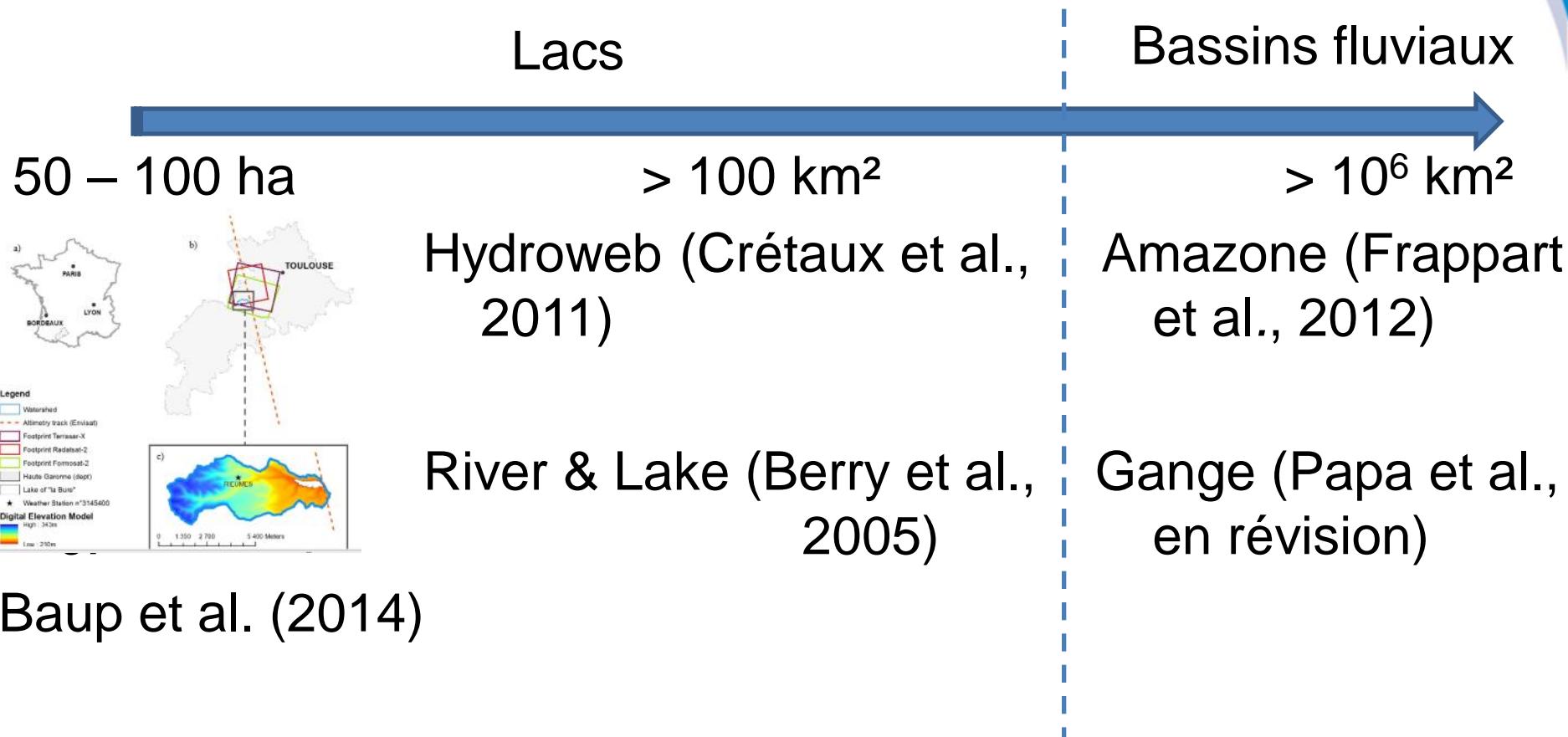
Type d'images	Résolution spatiale	Répétitivité temporelle	Météo	Végétation	
multispectral	+	+	-	-	Frappart et al. 2006b Abarca et al. 2012
SAR	+	-	+	$f(\lambda)$	Hess et al. 2003 Betbeder et al. 2014
Micro-ondes passives	-	++	+	$f(\lambda)$	Prigent et al. 2007 Papa et al. 2010



Cartographie des inondations dans la cuvette centrale du Congo en 2009 avec images PALSAR en bande L (Betbeder et al., 2014)

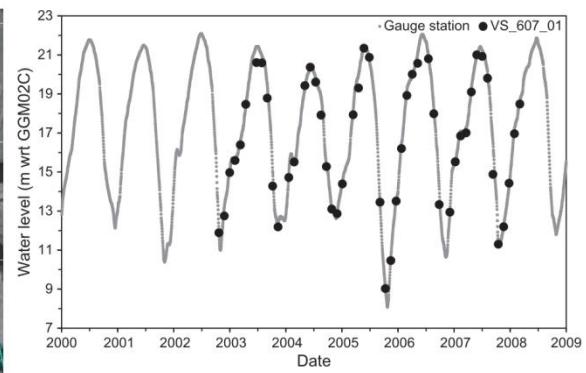
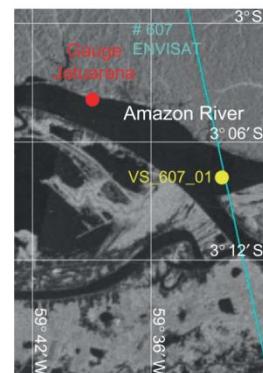
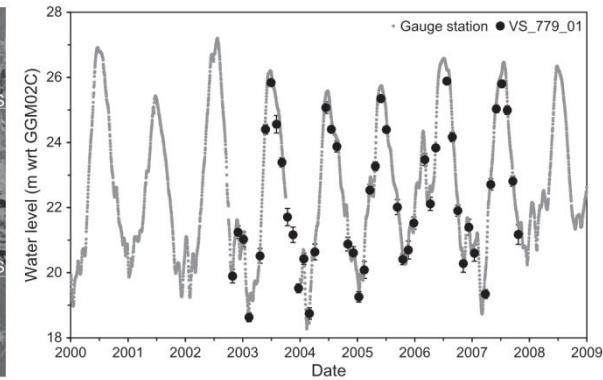
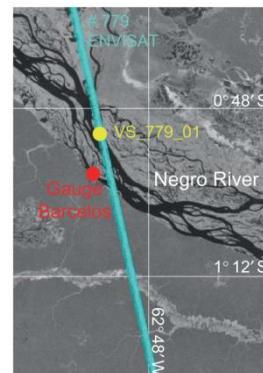
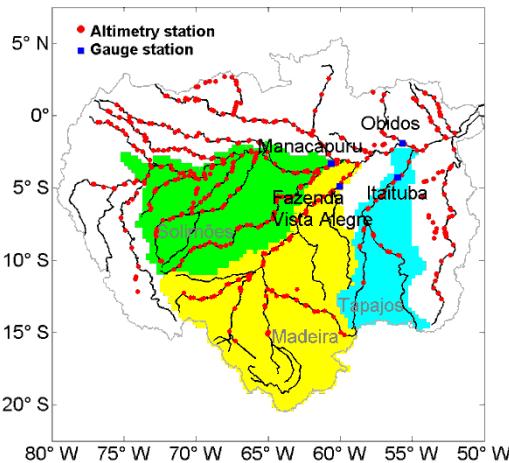
# *Estimation des volumes*

## Echelles spatiales des volumes



# *Exemple du bassin amazonien* (1/6)

543 stations altimétriques  
ENVISAT RA-2



Silva et al., 2012

# Exemple du bassin amazonien (2/6)

Merging of satellite data with different wavelengths (surface classification, NN, vegetation)

## Passive microwave

SSM/I emissivities at 19,  
37 GHz, H and V  
polarizations

## Active microwave

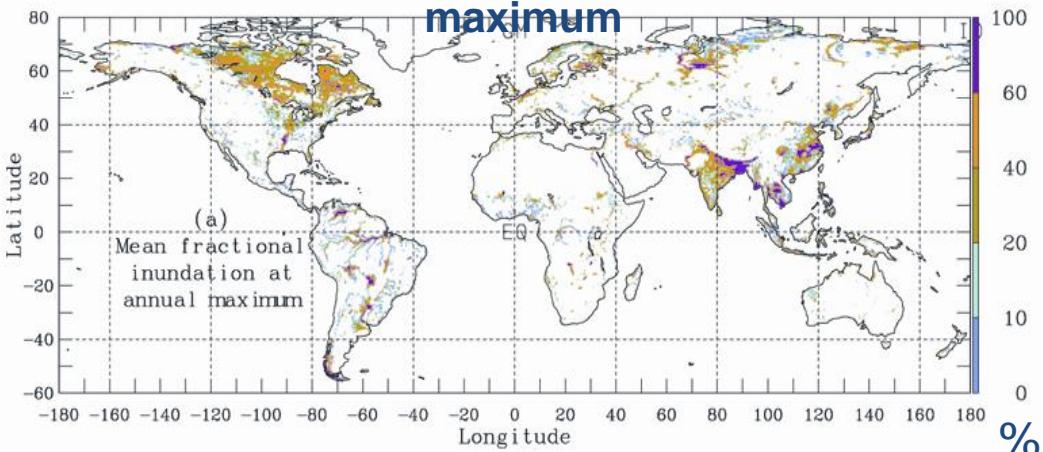
ERS scatterometer  
backscattering coefficient  
at 5.25 GHz

## Visible and near infrared

AVHRR NDVI (visible and  
near-infrared reflectances)

[Prigent et al., J. Geophys. Res., 2007;  
Papa et al. J. Geophys. Res., 2010]

### Mean fractional surface water extent at annual maximum

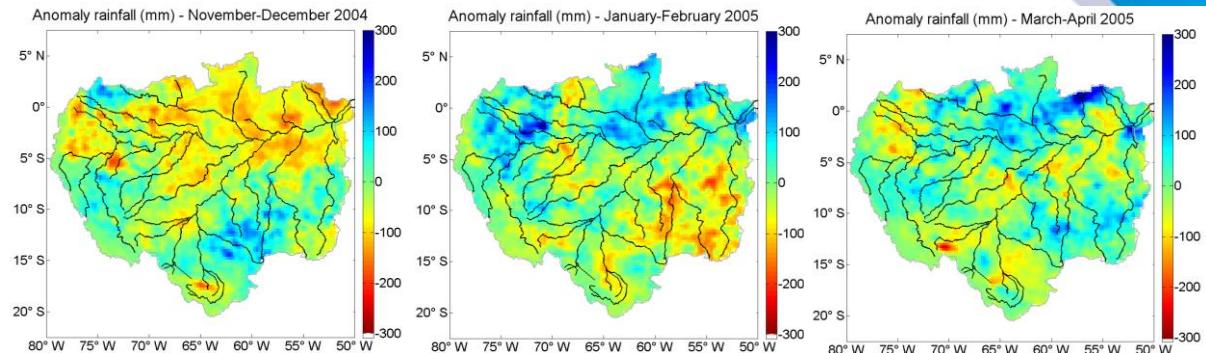


- Data mapped on equal-area grid with  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  resolution at equator ( $773 \text{ km}^2$ )
- Monthly resolution for 1993-2007 (soon 5 days)  
and at least extended to 2012 and longer

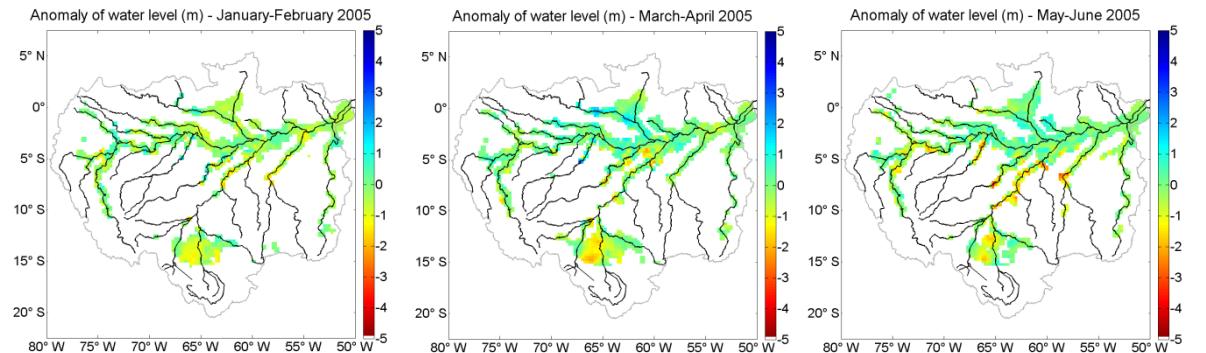
## Global Inundation Extent from Multi-Satellites (GIEMS)

# *Exemple du bassin amazonien (3/6)*

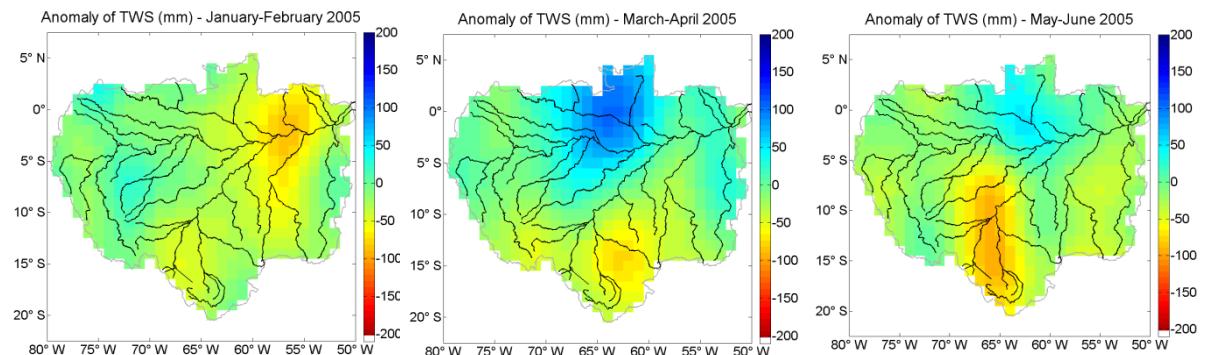
Pluie (TRMM  
3B43)



Eaux de  
surface

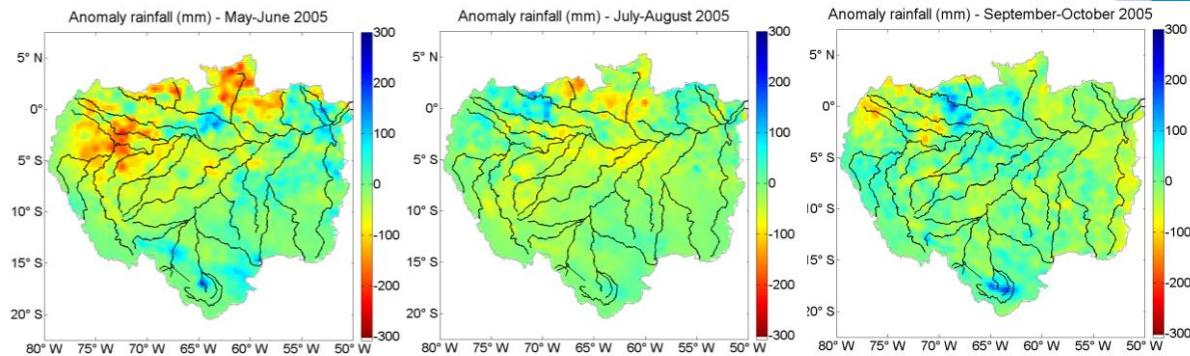


Stock  
total(GRACE)

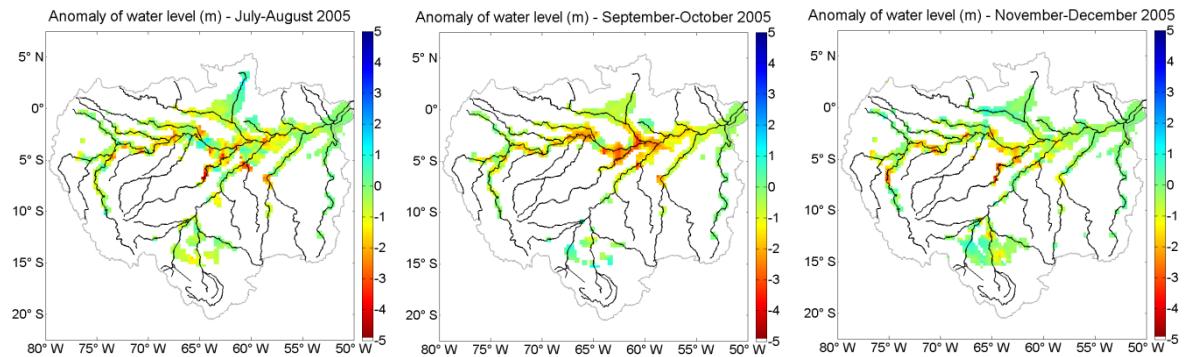


# *Exemple du bassin amazonien (4/6)*

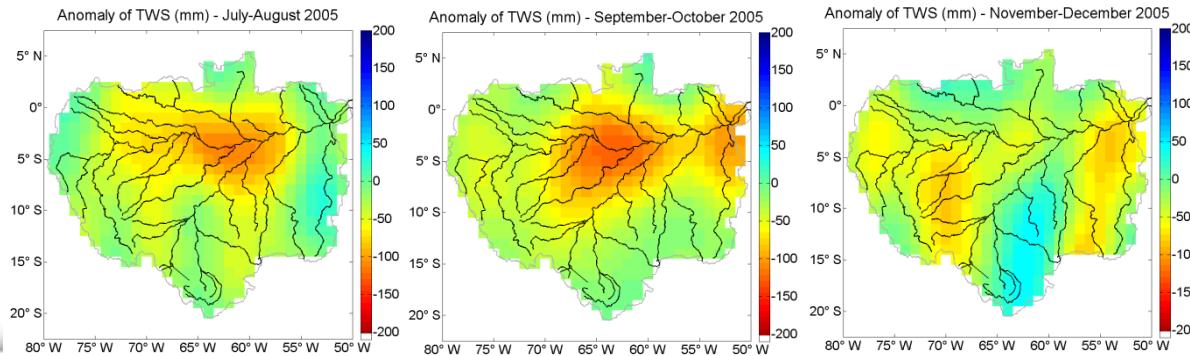
Pluie (TRMM  
3B43)



Eaux de  
surface

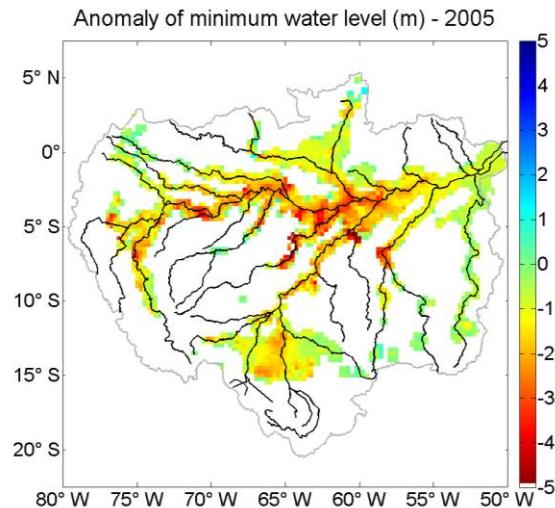


Stock  
total(GRACE)

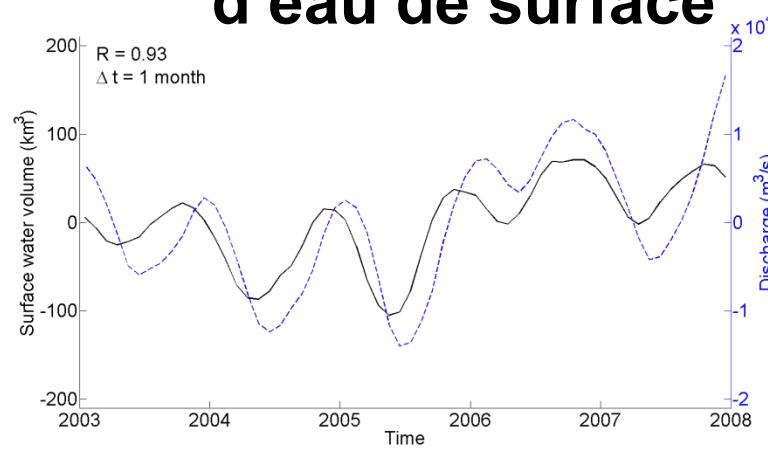


# *Exemple du bassin amazonien* (5/6)

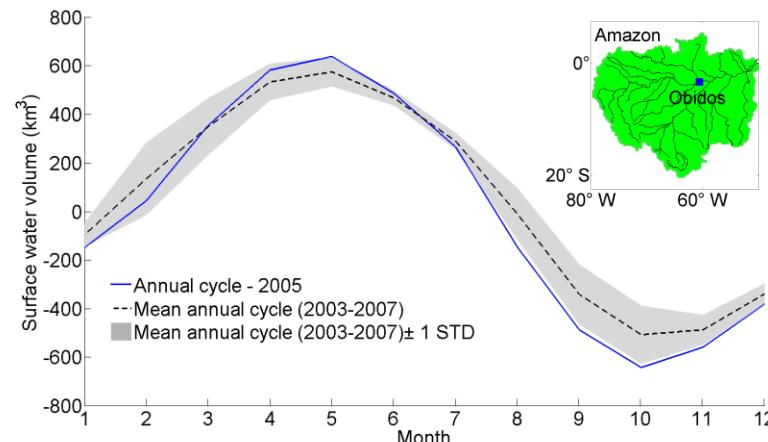
## Sècheresse exceptionnelle de 2005



## Variations des stocks d'eau de surface



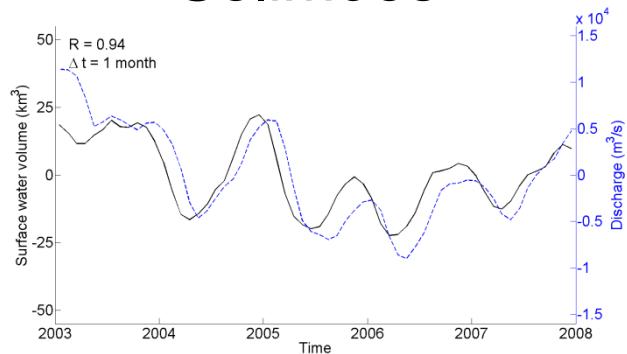
Frappart et al. (2012)



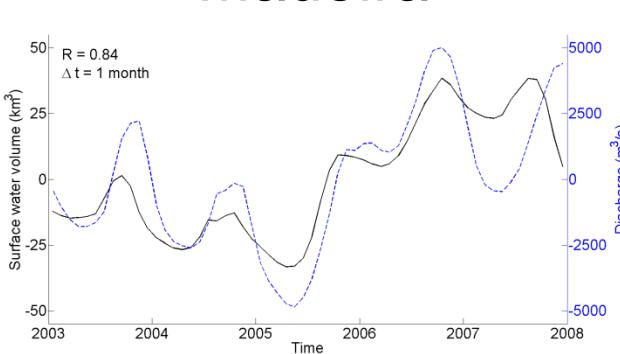
# *Exemple du bassin amazonien* (6/6)

## Variations des stocks d'eau de surface

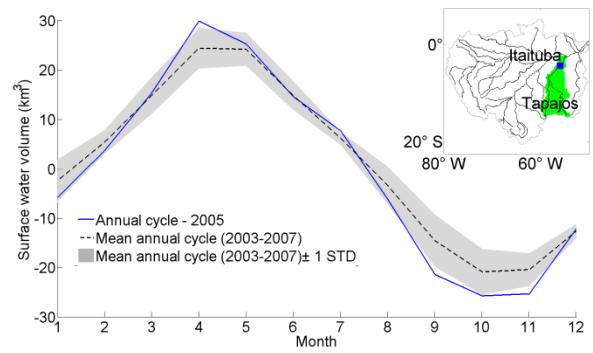
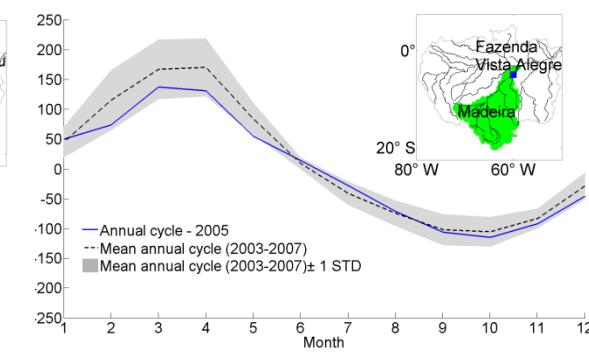
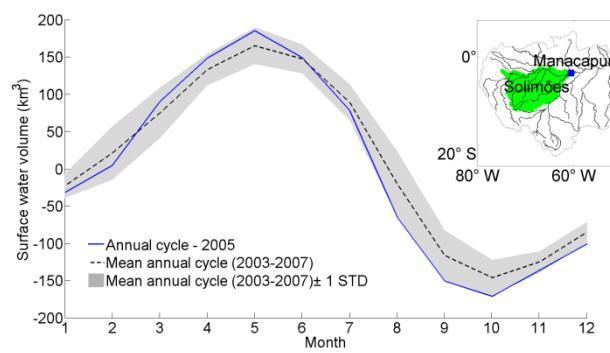
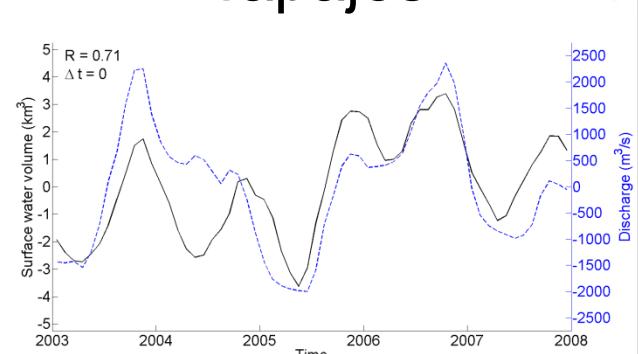
Solimões



Madeira



Tapajos



Frappart et al. (2012)

# **Caractérisation des surfaces continentales par le coefficient de rétrodiffusion**

# **Coefficient de rétrodiffusion**

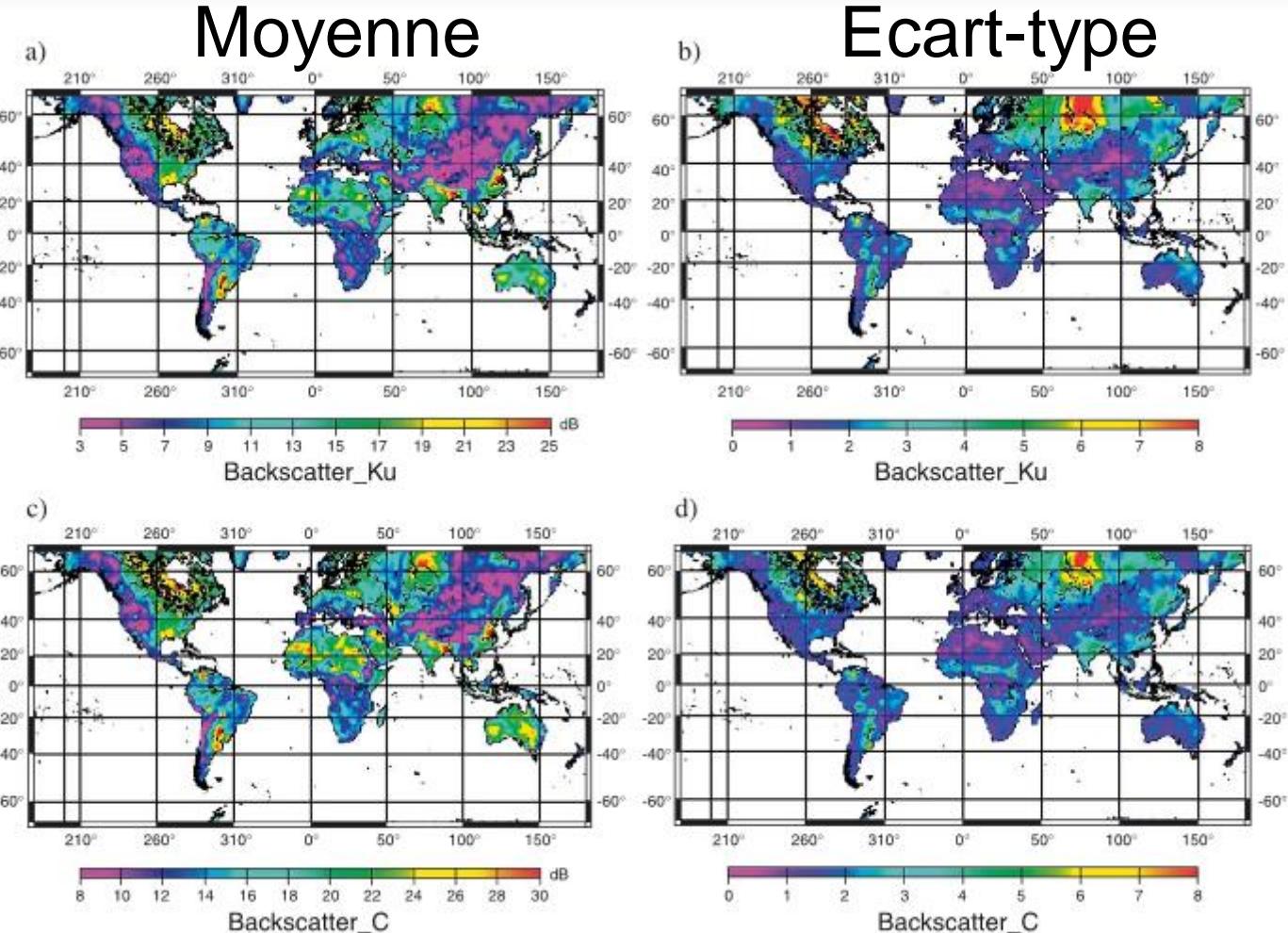
Le coefficient de rétrodiffusion ( $\sigma_0$ ) est l'intégrale de la puissance renvoyée par la cible ramenée à la surface éclairée par la cible (Lacroix, 2007).

Cf. cours de Nicolas Picot pour formulation mathématique

$\sigma_0 = f(P, \dots)$  avec  $P(\varepsilon, \text{rugosité}, \text{état hydrique}, \dots)$

⇒ Caractérisation des surfaces continentales: type de sols et état hydrique

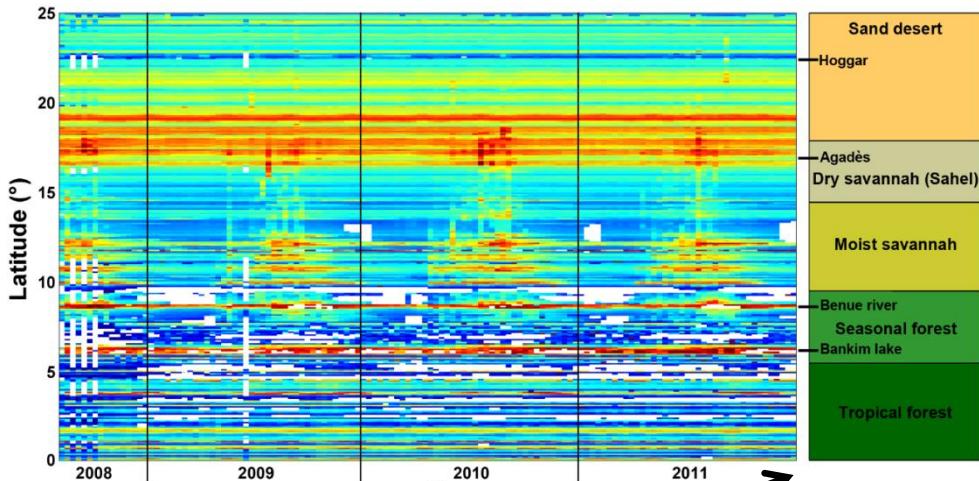
# Cartes de rétrodiffusion



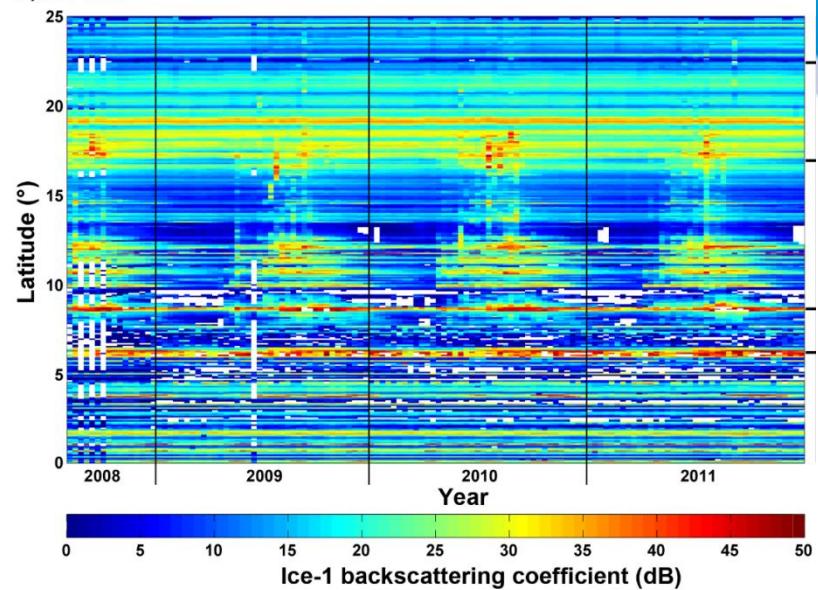
$\sigma_0$  de Topex/Poseidon – 01/1993 - 01/2002 (Papa et al., 2003)

# Variations temporelles de $\sigma_0$ (1/3)

a) C-band



b) Ku-band

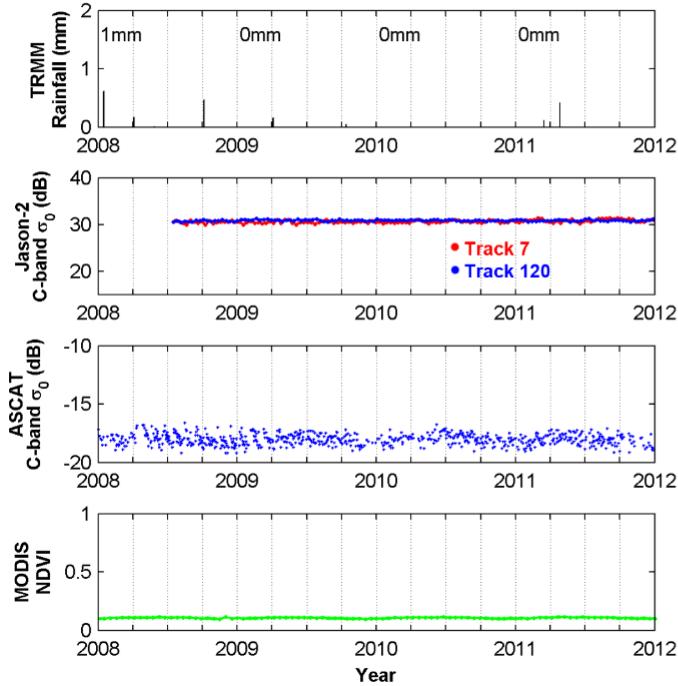


Transects longitudinaux de  $\sigma_0$  Jason-2 sur l'Afrique de l'Ouest (Fatras et al., en révision).

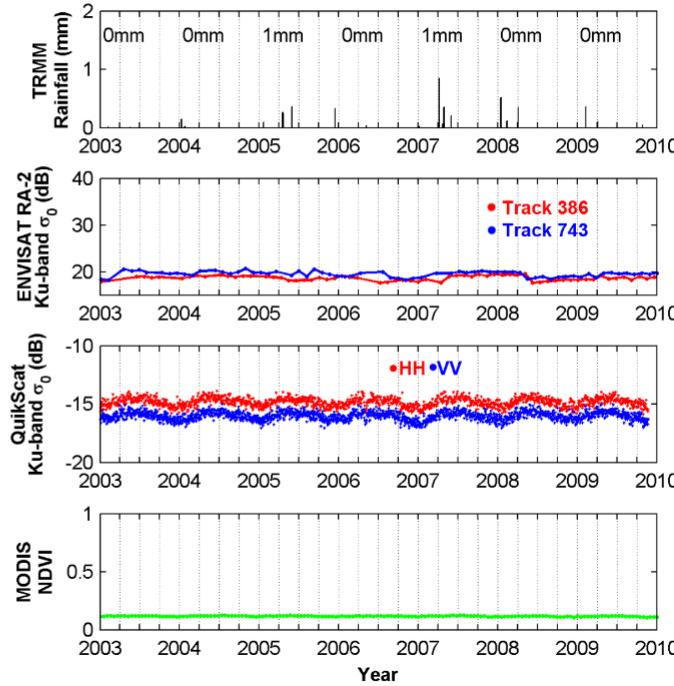
# *Variations temporelles de $\sigma_0$ (2/3)*

Stone desert

a) C-band



b) Ku-band

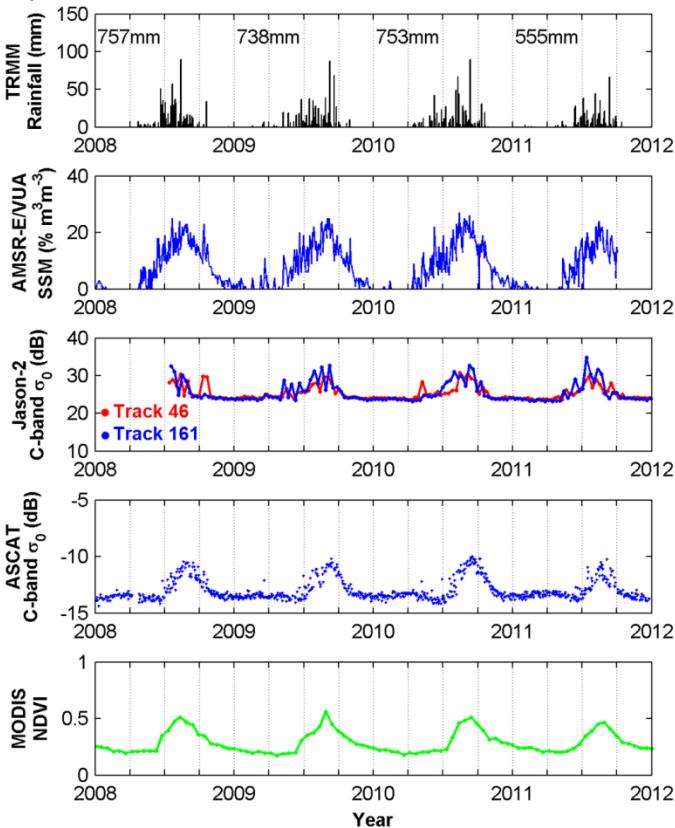


Séries temporelles de  $\sigma_0$  Jason-2 et Envisat sur l'Afrique de l'Ouest (Fatras et al., en révision).

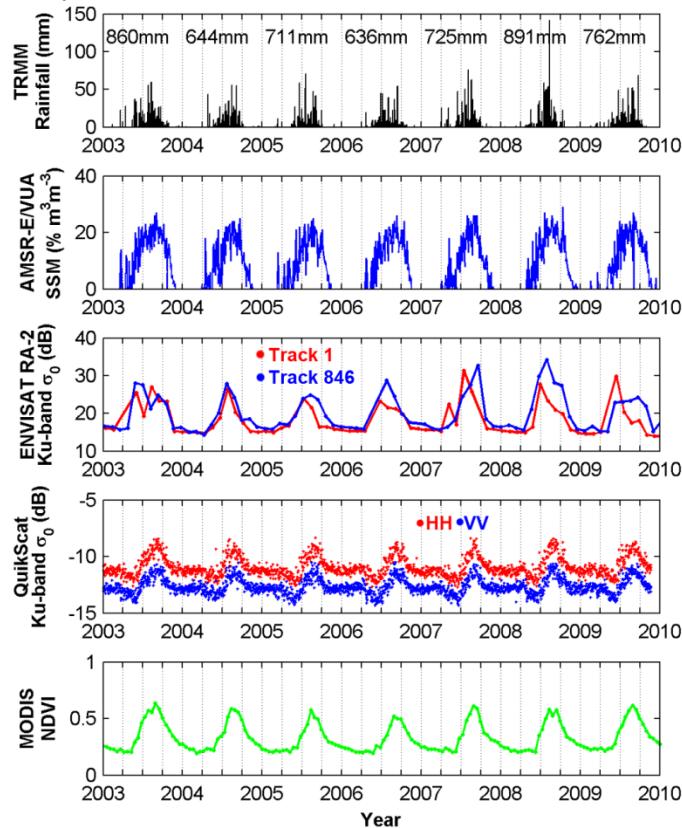
# Variations temporelles de $\sigma_0$ (3/3)

## Soudano-sahelian savannah

a) C-band

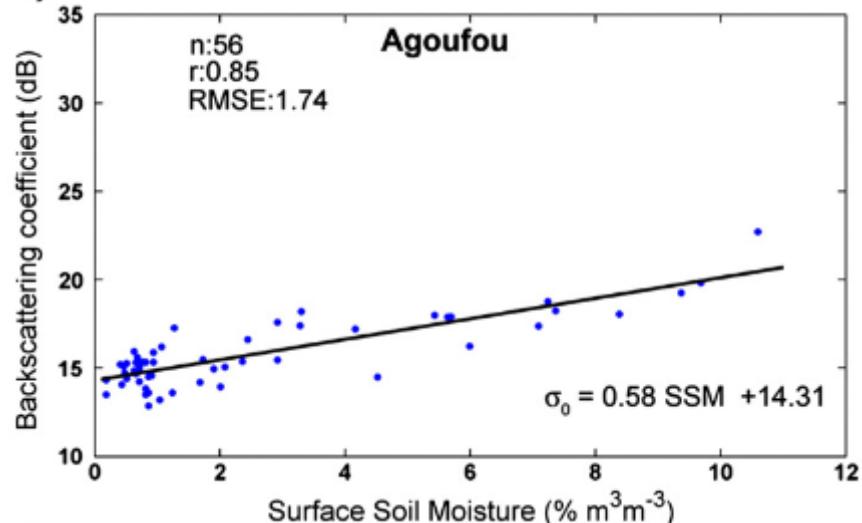
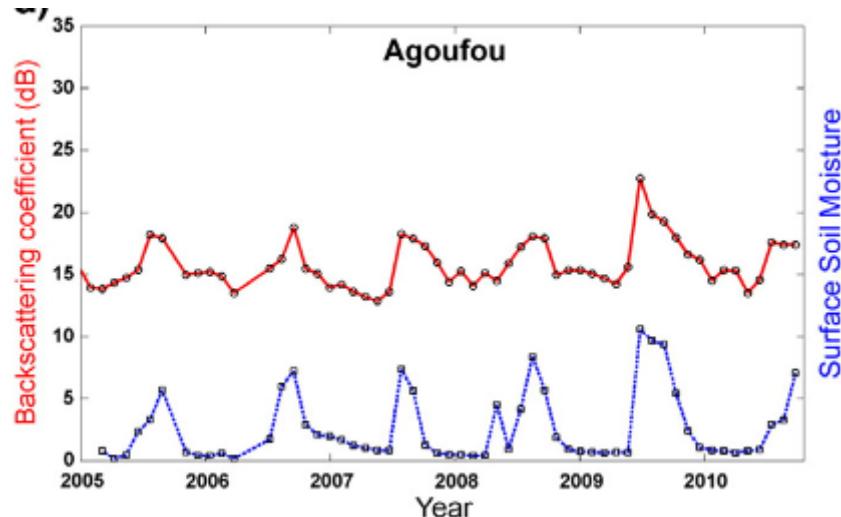


b) Ku-band



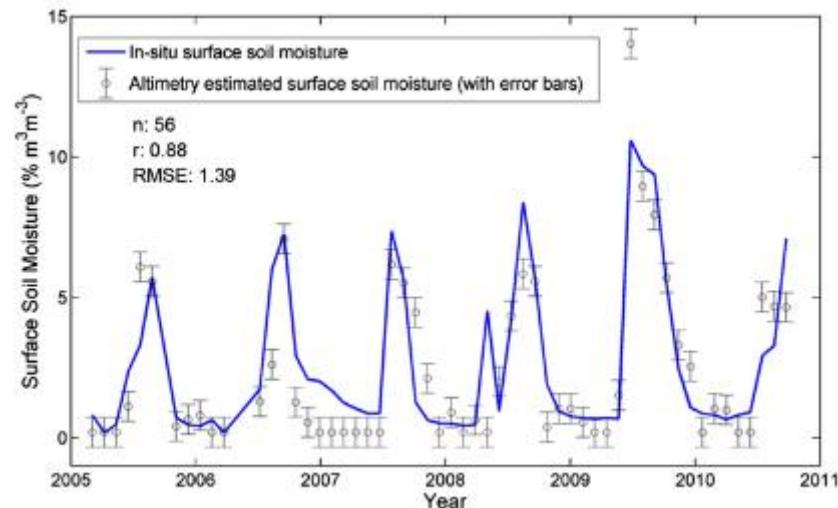
# *Humidité des sols en zone semi-aride*

$\sigma_0$  bande Ku d'Envisat / humidité des sols



⇒ Inversion linéaire de  
l'humidité des sols sur  
sols sableux

(Fatras et al., 2012)

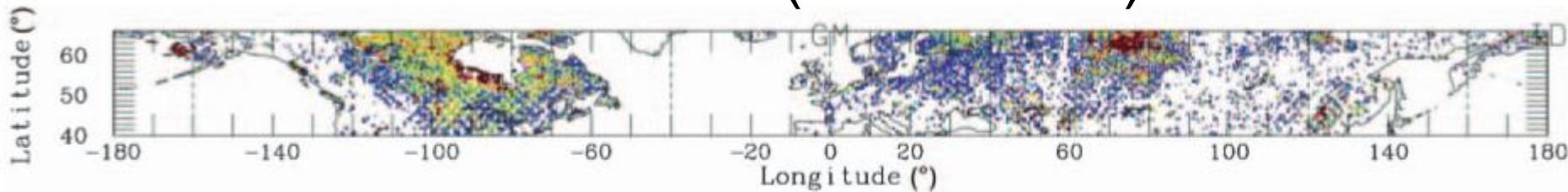


# Cartographie des *inondations* en zone boréale

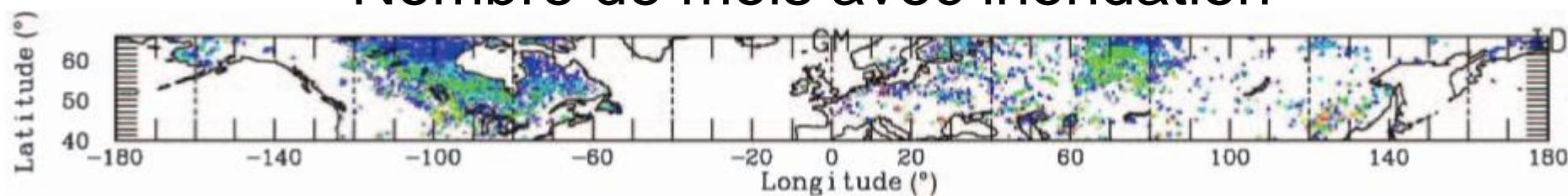
$\sigma_0$  bande C de Topex/Poseidon > 20 dB si inondation

Quand  $\sigma_0$  augmente d'1 dB, l'inondation augmente de 4% (Papa et al., 2006).

% d'inondation (Juillet 1993)



Nombre de mois avec inondation



# Perspectives

- Amélioration des résultats avec l'utilisation de la bande Ka (SARAL): tache au sol plus petite, MNT, ...
  - Altimétrie SAR (Cryosat-2, Sentinel-3, Jason-CS): meilleure résolution spatiale le long de la trace
  - Altimétrie InSAR (SWOT): cartographie des hauteurs d'eau et de la rétrodiffusion, pentes, plus forte répétitivité temporelle (un même site dans plusieurs fauchées)
- ⇒ Meilleure caractérisation des surfaces continentales

# Bibliographie (1/7)

Abarca Del Rio, R.; Crétaux, J.-F.; Berge-Nguyen, M.; Maisongrande, P. Does Lake Titicaca still control the Lake Poopó system water levels? An investigation using satellite altimetry and MODIS data (2000–2009). *Remote Sens. Lett.* 2012, 3, 707–714.

Alsdorf D E and Lettenmaier D P 2003 Tracking fresh water from space *Science* 301 1491–4

Alsdorf D E, Rodriguez E and Lettenmaier D P 2007 Measuring surface water from space *Rev. Geophys.* 45 RG2002

Bamber, J.L. 1994: Ice sheet altimeter processing scheme, *International Journal of Remote Sensing*, v 15, no 4, p 925-938.

Baup F., Frappart F., Maubant, J. « Combined use of high resolution satellite images and altimetry to estimate volume of small lakes », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2007–2020, 2014.

Becker, M., LLoveil, W., Cazenave, A., Guentner, A., & Cretaux, J. F. (2010). Recent hydrological behavior of the East African great lakes region inferred from GRACE, satellite altimetry and rainfall observations. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3), 223-233.

Berry, P. A. M., J. D. Garlick, J. A. Freeman, and E. L. Mathers (2005), Global inland water monitoring from multi-mission altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16401, doi:10.1029/2005GL022814.

Betbeder J., Gond V., Frappart F., Baghdadi N., Briant G., Bartholomé E.. 2014. Mapping of Central Africa forested wetlands using remote sensing. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 7 (2) : 531-542.

# Bibliographie (2/7)

- Birkett, C.M. (1995). The contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *Journal of Geophysical Research* 100(C12), 25,179–25,204, doi:10.1029/95JC02125.
- Birkett, C. M. (1998), Contribution of the TOPEX NASA Radar Altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands, *Water Resour. Res.*, 34(5), 1223–1239, doi:10.1029/98WR00124.
- Birkett, C., Murtugudde, R., & Allan, T. (1999). Indian Ocean climate event brings floods to East Africa's lakes and the Sudd Marsh. *Geophysical Research Letters*, 26(8), 1031-1034.
- Birkett, C. M. (2000). Synergistic remote sensing of Lake Chad: Variability of basin inundation. *Remote sensing of environment*, 72(2), 218-236.
- Birkett, C. M., L. A. K. Mertes, T. Dunne, M. H. Costa, and M. J. Jasinski, Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8059, doi:10.1029/2001JD000609, 2002.
- Brown, G. 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 25(1):67-74.
- S. Calmant , J. S. da Silva , D. M. Moreira , F. Seyler , C. Shum , J. F. Cretaux and G. Gabalda "Detection of Envisat RA2/ICE-1 retrackedradar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS", *Adv. Space Res.*, vol. 51, no. 8, pp.1551 -1564 2013
- Crétaux, J-F., Calmant, S., Romanovski, V., et al. (2009). An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkel in Central Asia, *J. Geod.*, 83, 723-735 DOI: 10.1007/s00190-008-0289-7.

# Bibliographie (3/7)

Crétaux J. F., Jelinski W., Calmant Stéphane, Kouraev A., Vuglinski V., Bergé Nguyen M., Gennero M. C., Nino Fernando, Del Rio R. A., Cazenave A., Maisongrande P. (2011). SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 2011, 47 (9), p. 1497-1507

J.-F. Crétaux, M. Bergé-Nguyen, S. Calmant, V. Romanovski, B. Messignac, F. Perosanz, S. Tashbaeva, A. Arsen, F. Fund, N. Martignano, P. Bonnefond, O. Laurain, R. Morrow, P. Maisongrande Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul *Advances in Space Research*, 51 (8) (2013), pp. 1523–1541

Fatras C., Frappart F., Mougin E., Grippa M., Hiernaux P. (2012). Estimating surface soil moisture using ENVISAT RA-2 altimetry measurements, *Remote Sensing of Environment*, 123(8), 496-507, doi: 10.1016/j.rse.2012.04.013.

Fatras C., Frappart F., Mougin E., Frison P-L., Faye G., Borderies P., Jarlan L. (en révision). Spaceborne altimetry and scatterometry backscattering signatures at C- and Ku-band over West Africa, *Remote Sensing of Environment*.

Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J.-M., Leon, J. G., and Cazenave, A.: Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels, *Remote Sens. Environ.*, 99, 387–399, 2005.

Frappart F., Calmant S., Cauhopé M., Seyler F., Cazenave A. (2006a). Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin, *Remote Sensing of Environment*, 100, 252-264, doi:10.1016/j.rse.2005.10.027.

Frappart F., Do Minh K., L'Hermitte J., Cazenave A., Ramillien G., Le Toan T., Mognard-Campbell N. (2006b). Water volume change in the lower Mekong basin from satellite altimetry and imagery data, *Geophysical Journal International*, 167 (2), 570-584, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03184.x.

# Bibliographie (4/7)

Frappart, F., Papa, F., Santos da Silva, J., Ramillien, G., Prigent, C., Seyler, F., and Calmant, S.: Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought, Environ. Res. Lett., 7, 044010, doi:10.1088/1748-9326/7/4/044010, 2012.

Harris, B.A., Ho, I.L., Lindqwister, C.M., Mannucci, U.J., Pi, A.J., Reyes, X., Sparks, M.J., Wilson, B.D. (1999). Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 61 1205-1218

Koblinsky, C. J., R. T. Clarke, A. C. Brenner, and H. Frey (1993), Measurement of river level variations with satellite altimetry, Water Resour. Res., 29(6), 1839–1848, doi:10.1029/93WR00542.

Lacroix P. (2007). Apport de l'altimétrie radar spatiale à l'étude de la neige de la calotte polaire Antarctique, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 148 p.

Legrésy B., Rémy F. (1997). Altimetric observations of surface characteristics of the Antarctica ice sheet, J. of Glaciol., 43, 144, 265-275.

Maheu, C., A. Cazenave, and C. R. Mechoso (2003), Water level fluctuations in the Plata Basin (South America) from Topex/Poseidon Satellite Altimetry, Geophys. Res. Lett., 30, 1143.

Medina, C. E., Gomez-Enri, J., Alonso, J. J., & Villares, P. (2008). Water level fluctuations derived from ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and in-situ measurements in a subtropical waterbody: Lake Izabal (Guatemala). Remote Sensing of Environment, 112(9), 3604-3617.

# Bibliographie (5/7)

Mercier, F., Cazenave, A., & Maheu, C. (2002). Interannual lake level fluctuations (1993–1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean–atmosphere interactions over the Indian Ocean. *Global and Planetary Change*, 32(2), 141-163.

Morris, C. S., and S. K. Gill (1994), Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes, *J. Geophys. Res.*, 99(C12), 24527–24539

Papa, F., Legresy, B., & Remy, F. (2003). Use of the Topex–Poseidon dual-frequency radar altimeter over land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 87, 136–147.

Papa, F., C Prigent, W.B. Rossow, B. Legresy, and F. Remy, 2006: Inundated wetland dynamics over boreal regions from remote sensing: The use of Topex-Poseidon dual-frequency radar altimeter observations. *Int. J. Remote Sens.*, 27, 4847-4866, doi:10.1080/01431160600675887.

Papa F, Prigent C, Aires F, Jimenez C, Rossow W B and Matthews E 2010 Interannual variability of surface water extent at global scale *J. Geophys. Res.* 115 D12111.

Papa F., Frappart F., Malbeteau Y., Shamsuddoha M., Venugopal V., Sekhar M., Ramillien G., Prigent C., Aires F., Pandey R.K., Bala S., Calmant S. (en révision). Satellite-derived surface and sub-surface water storage in the Ganges-Brahmaputra river basin, *Journal of Hydrology – Regional Studies*.

Pfeffer, J., F. Seyler,M.-P. Bonnet, S. Calmant, F. Frappart, F. Papa, R. C. D. Paiva, F. Satgé, and J. S. D. Silva (2014), Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2013GL059134.

# Bibliographie (6/7)

Prigent C, Papa F, Aires F, Rossow W B and Matthews E 2007 Global inundation dynamics inferred from multiple satellite observations, 1993–2000 J. Geophys. Res. 112 D12107

Ričko M.; Birkett C.M.; Carton J.A. and Crétaux J-F. (2012). Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry, J. Appl. Remote Sens. 6(1), 061710 (Dec 12, 2012).

Seyler, F. ; Calmant, S. ; Silva, J. S. ; Moreira, D. M. ; Mercier, F ; Shum, C. K . (2013). From Topex/Poseidon to Jason2-OSTM in the Amazon basin. Advances in Space Research, 51, 1542-1550.

Silva, J. S., Calmant,, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O.C., Cochonneau, G., Mansur, W.J. (2010). Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2-ENVISAT radar altimetry missions, Remote Sensing of Environment, 114 (10), 2160-2181.

Silva J S, Seyler F, Calmant S, Rotunno Filho OC, Roux E, Araujo, Guyot J-L. (2012). Water Level Dynamics of Amazon Wetlands at the Watershed Scale by Satellite Altimetry. International Journal of Remote Sensing, 33(11), p. 3323-3353 doi:10.1080/01431161.2010.531914.

Spodar A. (2014). Observation des niveaux d'eau et de la bathymétrie du Bassin d'Arcachon par altimétrie satellitaire. Rapport de Master2, Université Bordeaux I, 42 p.

Wilson M.D., Bates P.D., Alsdorf D., Forsberg B., Horrit M., Melack J., Frappart F., Famiglietti J.S. (2007). Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands, Geophysical Research Letters, 34, L15404, doi:10.1029/2007GL030156.

# Bibliographie (7/7)

Wingham, D. J., Rapley, C. G., & Griffiths, H. (1986). New techniques in satellite altimeter tracking systems. Proceedings of IGARSS'86 Symposium, Zurich, 8–11 Sept. 1986, Ref. ESA SP-254(pp. 1339–1344

Zakharova, E. A., Kouraev, A. V., Cazenave, A., & Seyler, F. (2006). Amazon River discharge estimated from TOPEX/Poseidon altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(3), 188-196.