

**Premières estimations de l'épaisseur de glace en Antarctique.  
Vers de nouvelles caractérisations des incertitudes.**

**Florent Garnier**, Sara Fleury,  
Tanguy Jacober, Antoine Laforge,  
Frédérique Rémy and Benoit Meyssignac

# Plan

## 0) L'épaisseur de glace (SIT) par altimétrie

### L'Antarctique

- 1) Envisat/Cryosat-2 franc-bord radar
- 2) Epaisseur de neige : AMSR et données Ka/Ku
- 3) Comparaison avec ICESat : franc-bord total
- 4) L'épaisseur de la glace de mer en Antarctique

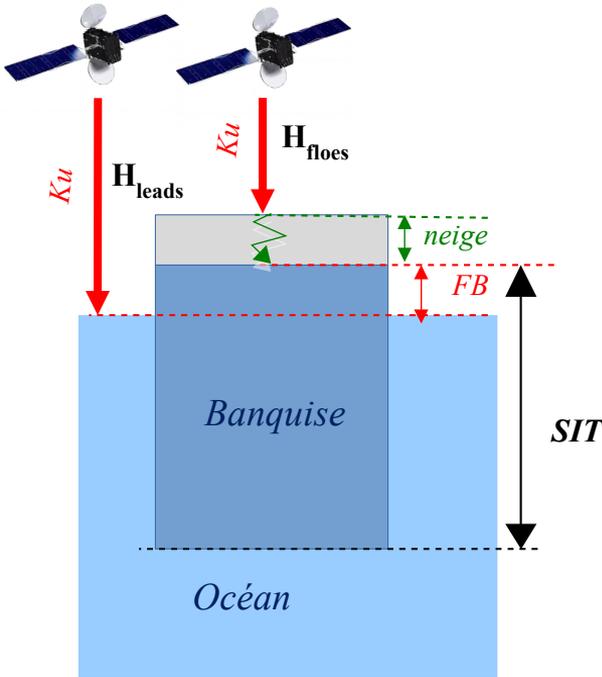
### Les Incertitudes

- 1) Principales sources d'incertitude
- 2) Incertitudes des produits de glace de mer
- 3) Vers de nouvelles approches pour quantifier les incertitudes



# 0) L'épaisseur de glace (SIT) par altimétrie

## La méthodologie du franc-bord (Laxon, 2003)



### 3 étapes

#### 1. Identification Leads/Floes

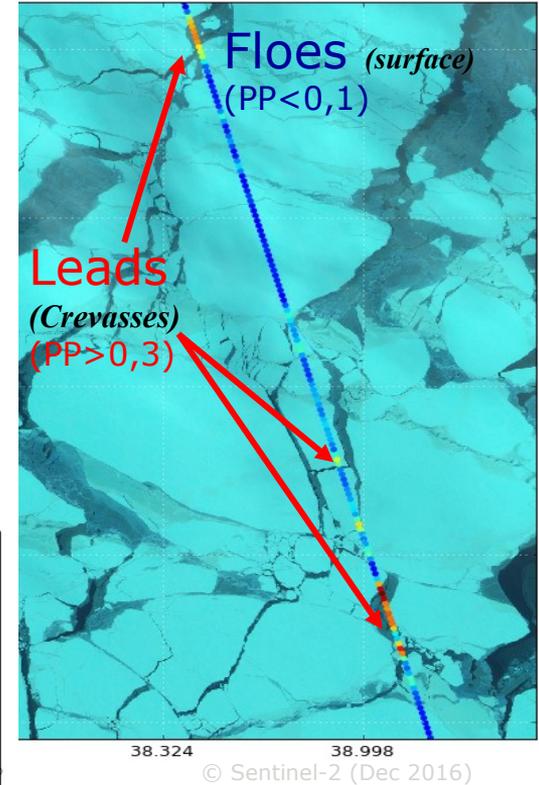
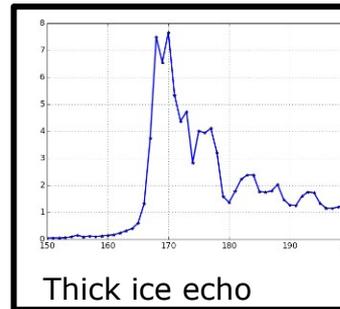
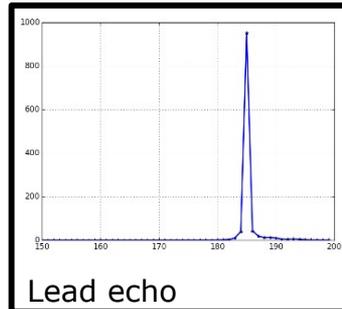
(Pulse Peakiness)

$$PP = \frac{\text{Max}(WF)}{\sum_i WF_i}$$

#### 2. Retracking Leads/Floes (TFMRA-60)

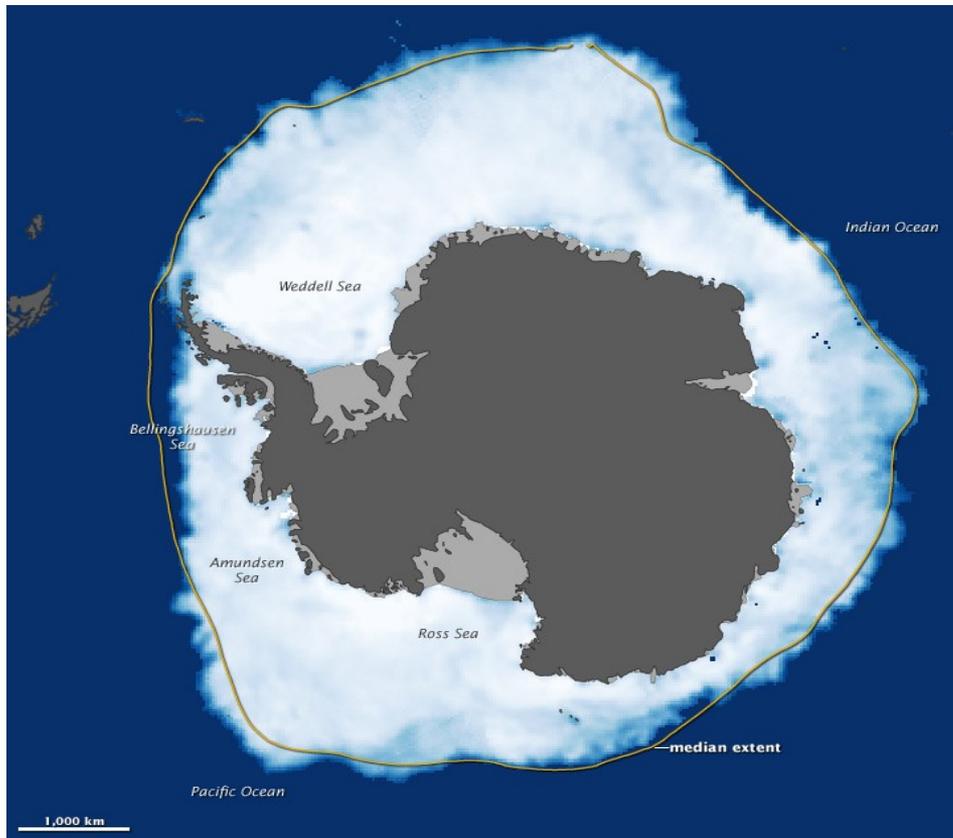
#### 3. Franc-bord radar = H<sub>floes</sub> - H<sub>leads</sub>

=> SIT (équilibre hydrostatique)



(c) LEGOS/CTOH

# Partie 1 : L'Antarctique



**A part un produit ESA SI-CCI, il n'y a pas aujourd'hui de données d'observation globale de l'Antarctique**

*Très peu d'études ...*

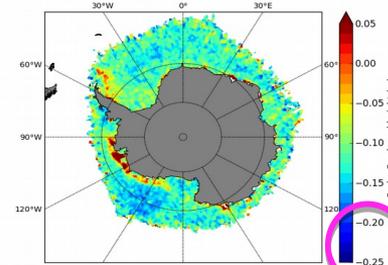
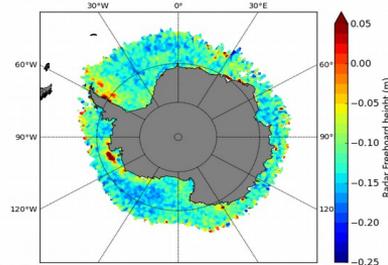
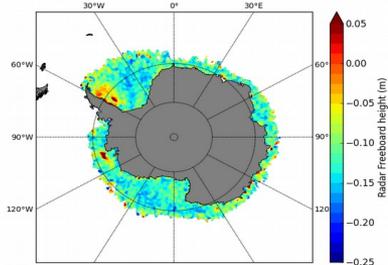
# 1) Envisat/Cryosat-2 franc-bord radar

Mai 2011

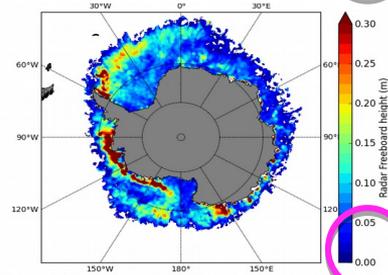
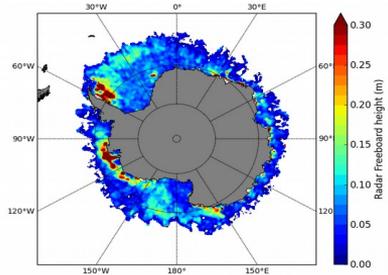
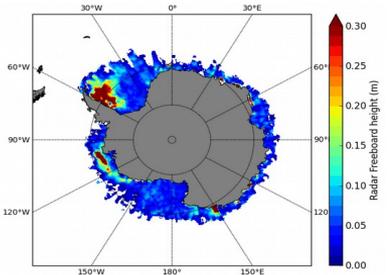
Juillet 2011

Septembre 2011

Envisat



Cryosat-2

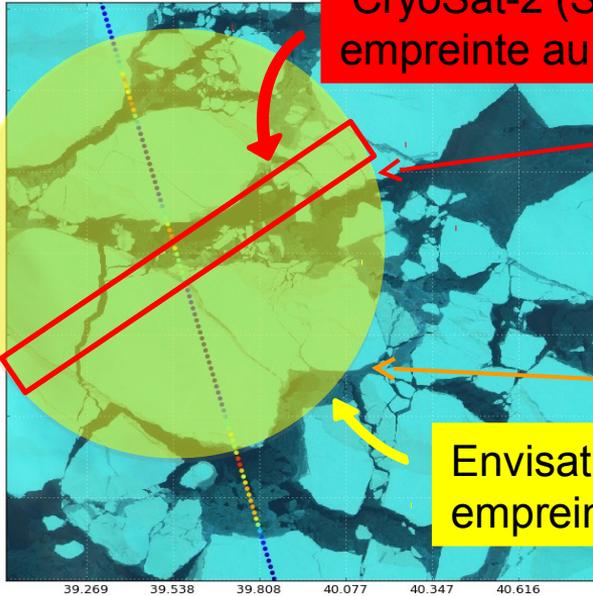


**Pb :**

**Continuité entre Envisat et Cryosat-2 !!!**  
(continuité SAR-LRM)

# 1) Envisat/Cryosat-2 franc-bord radar

CryoSat-2 (SAR)  
empreinte au sol



La surface qui réfléchit l'écho radar est principalement au Nadir  
→ La rugosité de surface a peu d'impact

La rugosité de surface a un impact fort

Envisat (LRM)  
empreinte au sol

➔ **Le franc-bord d'Envisat est re-calibré sur celui de Cryosat-2 en fonction de la rugosité de surface (PP) (Guerreiro et al, 2017)**

# 1) Envisat/Cryosat-2 franc-bord radar

Mai 2011

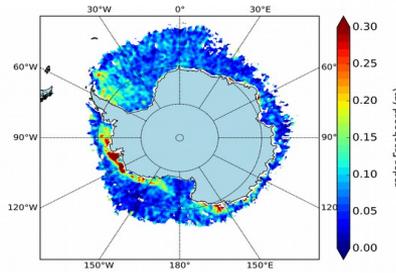
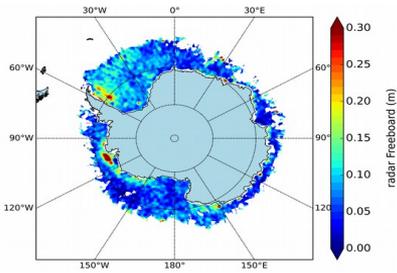
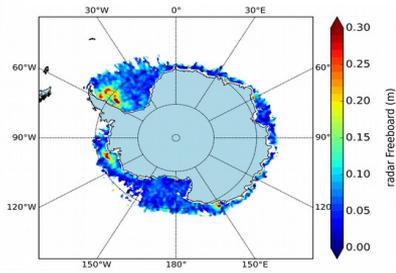
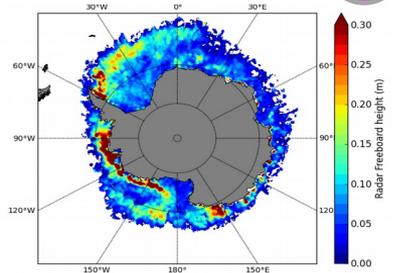
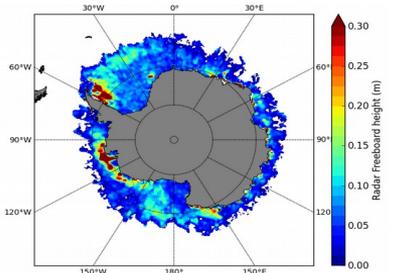
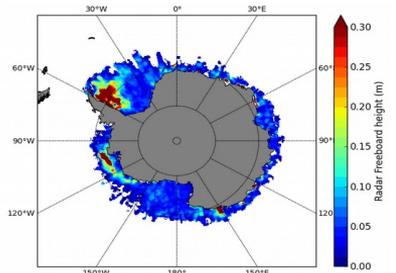
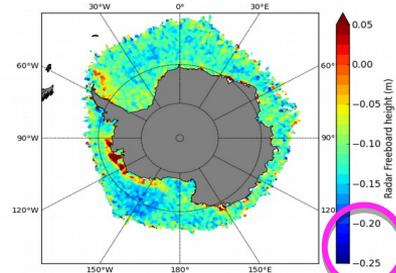
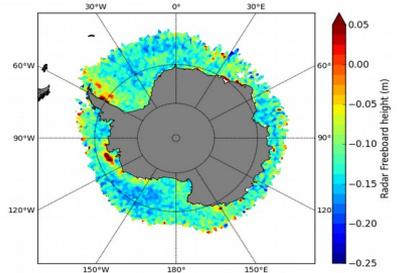
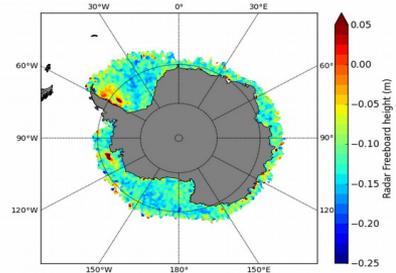
Juillet 2011

Septembre 2011

Envisat

Cryosat-2

Envisat/PP



	CS-2	Env	Env/PP
Mean	8,15	-12	7,3
Std	7,8	3,9	5
RMSD	x	21,2	5,7
R	x	56	66,5

Comparé à CryoSat-2 :

- Glace épaisse → sous-estimée
- Glace fine → surestimée

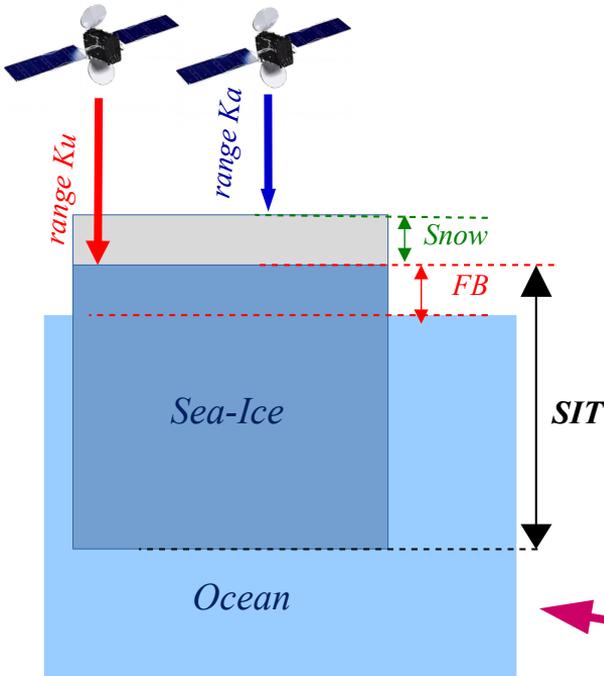
## 2) Epaisseur de neige : AMSR et données Ka/Ku

### Forts impacts :

- croissance de la glace (*rôle d'isolant*), albedo, bilan d'eau douce...
- enfoncement de la glace de mer + diminution de la vitesse de l'écho radar
- **entre 30 et 100%** d'incertitudes sur l'épaisseur (*stage hippert, 2017*)

### ... encore insuffisamment connue !

- Arctique : Warren-99 climatologie (*données de 1957-90 !*)

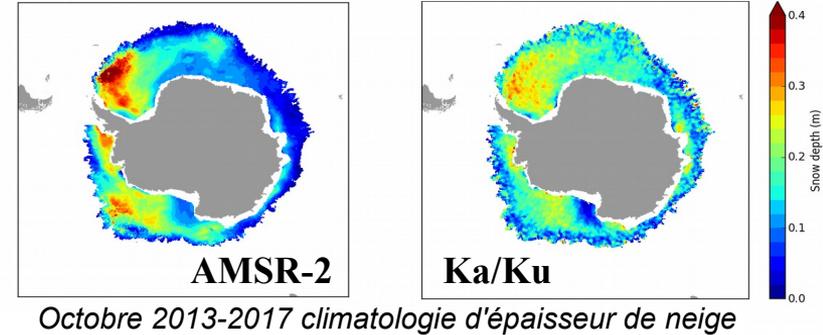
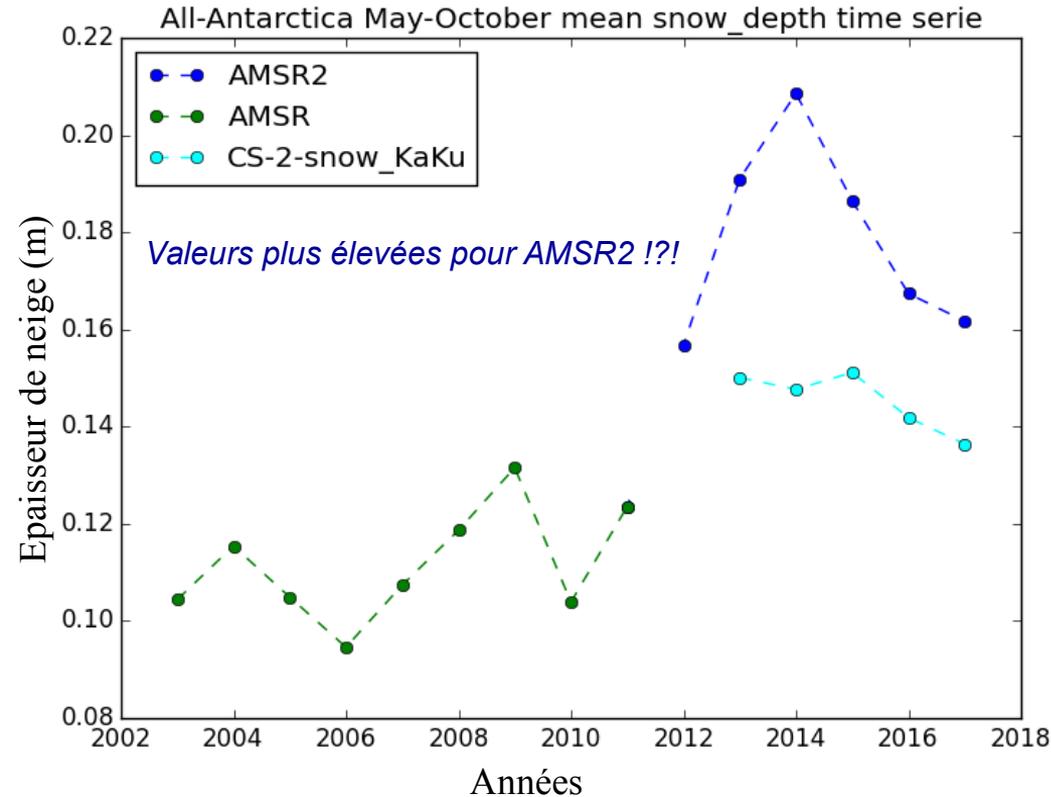


### En Antarctique ?

1) Advance Microwave Scanning Radiometer (AMSR-AMSR2)  
AMSR (*Aqua*) : **2002(08)-2011(09)**- AMSR2 (*GCOM-W1*) : **2012(07)-2018**

2) **Saral/Altika (Ka)** – **Cryosat-2 (Ku) (2013-2018)**:  
différence de pénétration entre les fréquences **Ka** and **Ku**  
(*Guerreiro et al, 2016*)

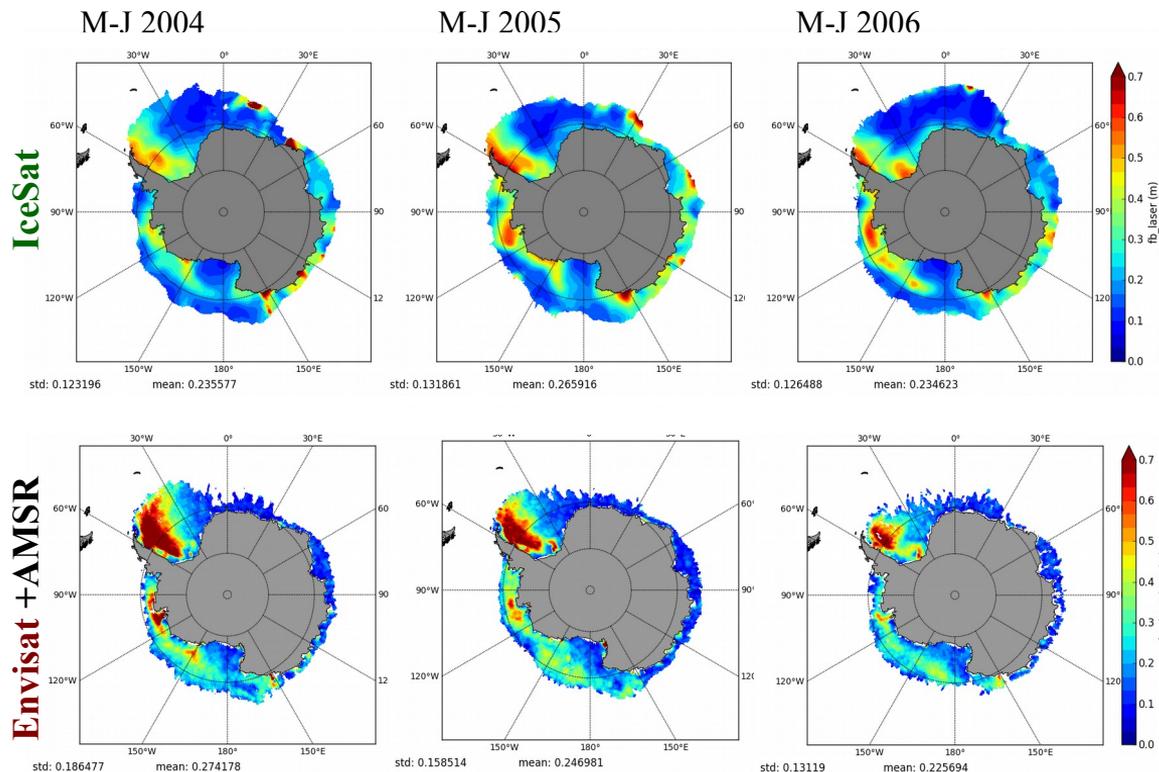
## 2) Epaisseur de neige : AMSR et données Ka/Ku



- distributions spatiales comparables
- gradients **Ka/Ku** plus faibles
- moyenne **Ka/Ku** plus faible

**Pas de données de validation!**

# 3) Comparaison avec ICESat : franc-bord total



**Table 1.** ICESat Data Collection Time Periods

Year	Dates		
	Spring	Summer	Fall
2003	Oct 1 to Nov 18	–	–
2004	Oct 3 to Nov 8	Feb 17 to Mar 21	May 18 to Jun 21
2005	Oct 21 to Nov 24	Feb 17 to Mar 24	May 20 to Jun 23
2006	Oct 25 to Nov 27	Feb 22 to Mar 27	May 24 to Jun 26
2007	Oct 2 to Nov 5	Mar 12 to Apr 14	–
2008	–	Feb 17 to Mar 21	–

*From Kurtz and Markus, 2012*

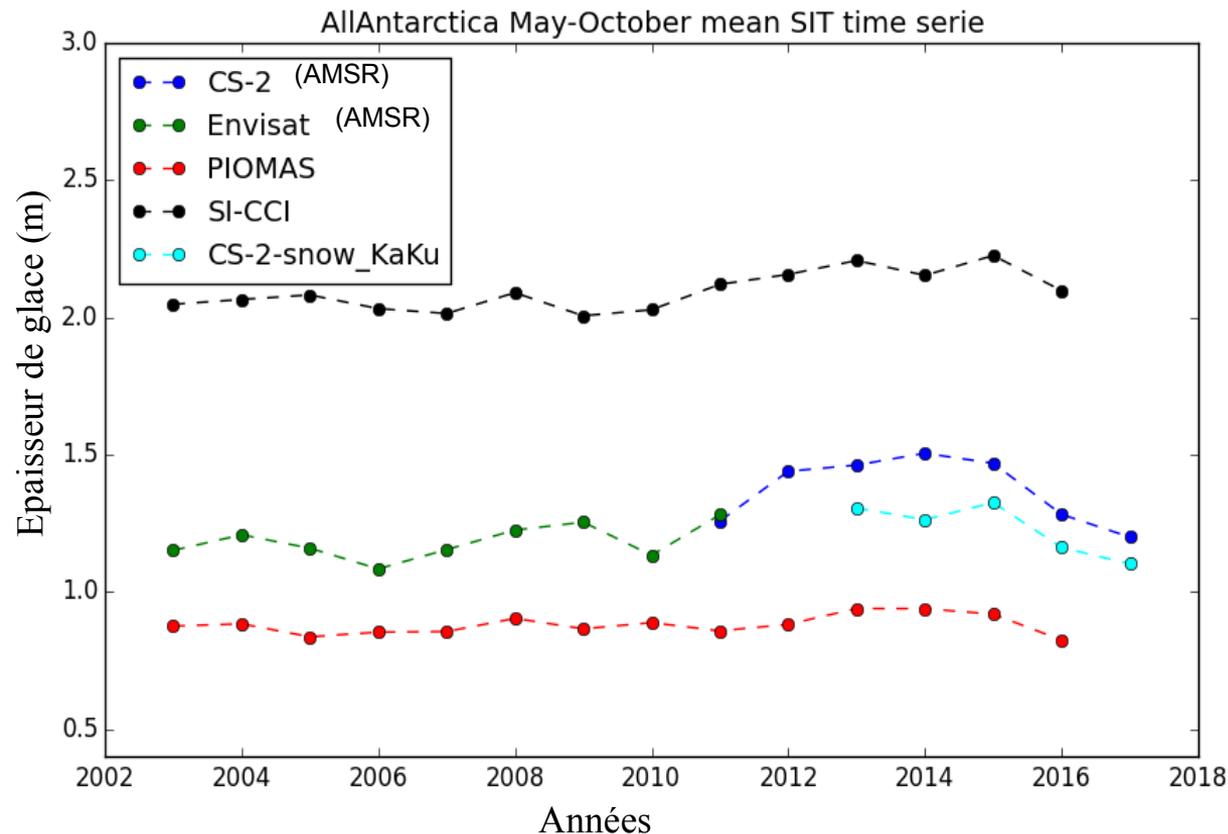
**Envisat + AMSR présente :**

- Zones de franc-bord plus élevées (ex : mer de Weddell)

- Franc-bord plus faible dans la zone de l'océan indien

**Distributions cohérentes**

## 4) L'épaisseur de glace en Antarctique

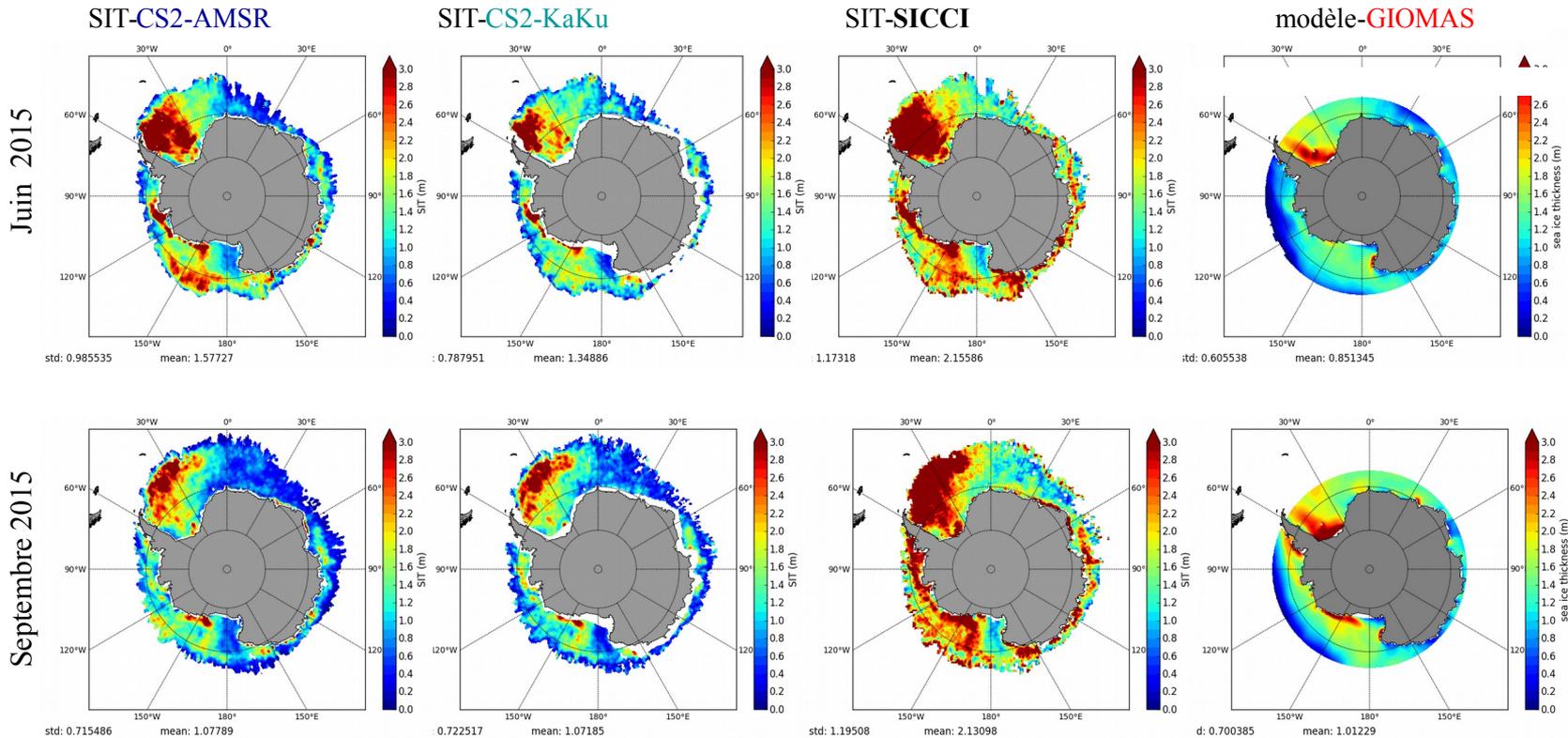


→ Écarts important avec ESA SI-CCI

→ Pas de données de validation pour discriminer les différentes estimations !!

→ Comparé à l'Arctique, la variabilité inter-annuelle est faible

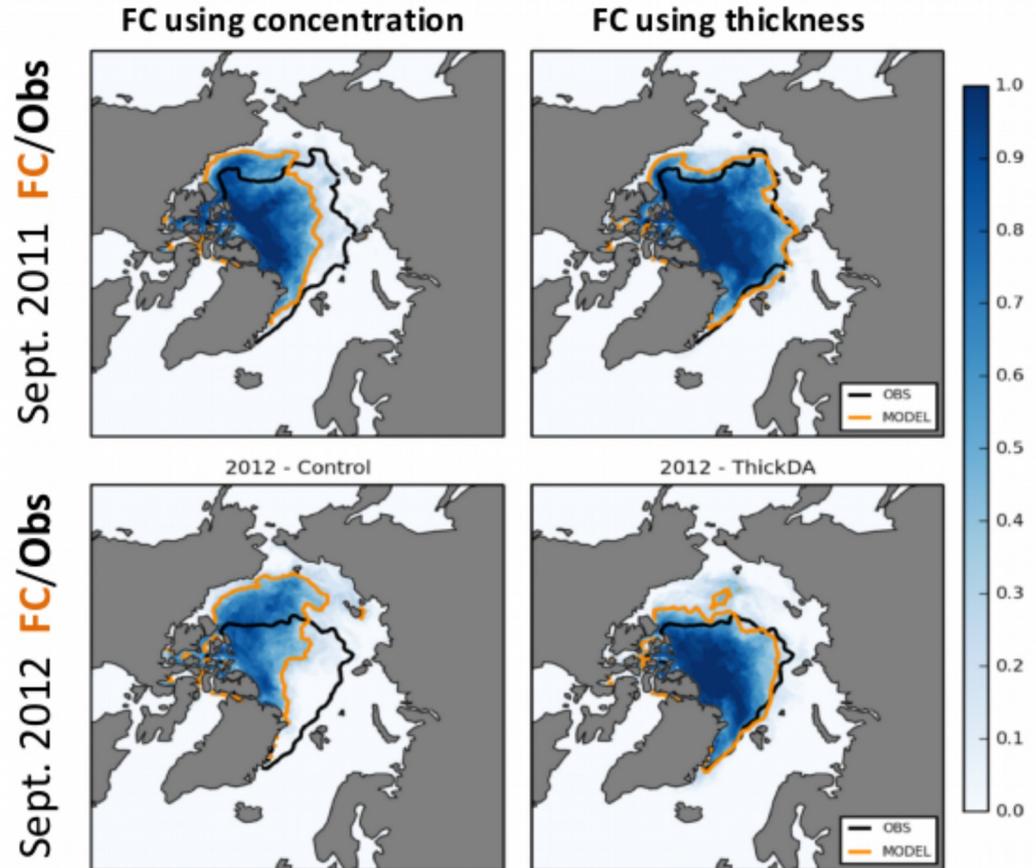
# 4) L'épaisseur de glace en Antarctique



# Partie 2: Incertitudes

Prévisions (en orange) de 4 mois (mai-septembre) de l'extension de la glace de mer réalisées à partir d'observations de **concentration de glace** (figures de **gauche**) et à partir d'observations **d'épaisseur** (figures de **droite**). Résultats pour 2011 (figures du haut) et 2012 (figures du bas). (Source Blockley et al, 2018).

Les observations d'épaisseurs sont cruciales pour la modélisation



# 1) Principales sources d'incertitude

SIT
Franc-bord
ralentissement de l'onde radar dans la neige
neige

$$H_g = \frac{\rho_e((H_{floe} - H_{lead}) + h_n(1 + 0.51\rho_n)^{-1.5}) + \rho_n h_n}{\rho_e - \rho_g}$$

**Équilibre hydrostatique**

Littérature

$$\epsilon_{H_g}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f^2}{\partial x_i} \epsilon_{x_i}^2$$

$$\epsilon_{H_g}^2 = \left[ -\frac{((H_{floe} - H_{lead}) + h_n(1 + 0.51\rho_n)^{-1.5})\rho_g + \rho_e h_n}{(\rho_e - \rho_g)^2} \right]^2 \epsilon_{\rho_e}^2 + \left[ \frac{\rho_e((H_{floe} - H_{lead}) + h_n(1 + 0.51\rho_n)) + \rho_n h_n}{(\rho_e - \rho_g)^2} \right]^2 \epsilon_{\rho_g}^2 + \left[ \frac{\rho_e(1 + 0.51\rho_n)^{-1.5} + \rho_n}{(\rho_e - \rho_g)} \right]^2 \epsilon_{h_n}^2 + \left[ \frac{\rho_e(-1.5)(0.51)(1 + 0.51\rho_n)^{-2.5} + h_n}{(\rho_e - \rho_g)} \right]^2 \epsilon_{\rho_n}^2 + \left[ \frac{\rho_e}{(\rho_e - \rho_g)} \right]^2 \epsilon_{H_{floe}}^2 + \left[ -\frac{\rho_e}{(\rho_e - \rho_g)} \right]^2 \epsilon_{H_{lead}}^2$$

Incertitudes sur le franc-bord

Hypothèses : erreurs gaussiennes non corrélées

# 1) Principales sources d'incertitude (sur H)

- Réflexion de l'écho radar
- *Speckle*
- *Corrections géophysiques (atmosphérique et niveau de la mer)*
- *Altitude du satellite*
- *MSS*
- *Interpolation de la SLA sous les floes*
- *Classification Lead/floe*
- Échantillonnage de la forme d'onde
- seuil fixe du TFMRA
- Calcul du franc-bord en fonction de la distance au lead le plus proche

# 1) Principales sources d'incertitude (sur H)

- Réflexion de l'écho radar → considérée à l'interface neige/glace (Ku)
- *Speckle* →  $\sigma_{L1b} = 0.10 \text{ m}$  (Ricker et al, 2014)
- ~~Corrections géophysiques (atmosphérique et niveau de la mer)~~ → (Ricker et al, 2016)
- ~~Altitude du satellite~~ → quelques mm
- ~~MSS~~ →  $fb_{DTU18} \sim fb_{DTU15}$
- ~~Interpolation de la SLA sous les floes~~ → ????????????
- ~~Classification Lead/floe~~ →
- Échantillonnage de la forme d'onde →
- seuil fixe du TFMRA →
- Calcul du franc-bord en fonction de la distance au lead le plus proche →

Biais + random

## 2) Incertitudes des produits de glace de mer

**Aujourd'hui on ne considère pas explicitement ces différentes sources d'incertitudes**

## 2) Incertitudes des produits de glace de mer

### LEGOS:

Gaussiennes et non biaisées

Along track sur 25 km

$$\epsilon_{H_{floe}} = \frac{\sigma_{SLA}}{\sqrt{N_{obs_{floe}}}}$$

$$\epsilon_{H_{lead}} = \frac{\sigma_{SLA}}{\sqrt{N_{obs_{lead}}}}$$



	CryoSat-2	Envisat
$\sigma_{SLA}$	0.037 m	0.093 m

(Thèse Kevin Guerreiro, 2017)

~ équivalent à celles des autres produits  
(cf IICWG-DA workshop in Bremen)

Ex : 

$$\sigma_{FR}^2 = \underbrace{\sigma_{lib}^2}_{\text{Speckle}} + \sigma_{SSA}^2$$

Speckle = 0,01

**L'incertitude sur le franc bord est très faible**

### 3) De nouvelles quantification des incertitudes..

- Ces méthodes sont basées sur des **hypothèses fortes** et ne **peuvent pas caractériser les différentes sources d'incertitudes** inhérentes au processus de traitement « waveform to freeboard »
- Synergie avec les modèles (data assimilation) est difficile
- **Idée** : produire un ensemble d'observations (EnKF stochastic, *Evensen, 2003 ; Burgers et al, 2018*)

### 3) De nouvelles quantification des incertitudes..

On introduit des bruits gaussiens pour simuler :

- **Réflexion de l'écho radar** std = 5cm sur l'epoch

---
- ***L'interpolation de la SLA sous les floes*** *std = 2cm sur la SLA<sub>sous floes</sub>*

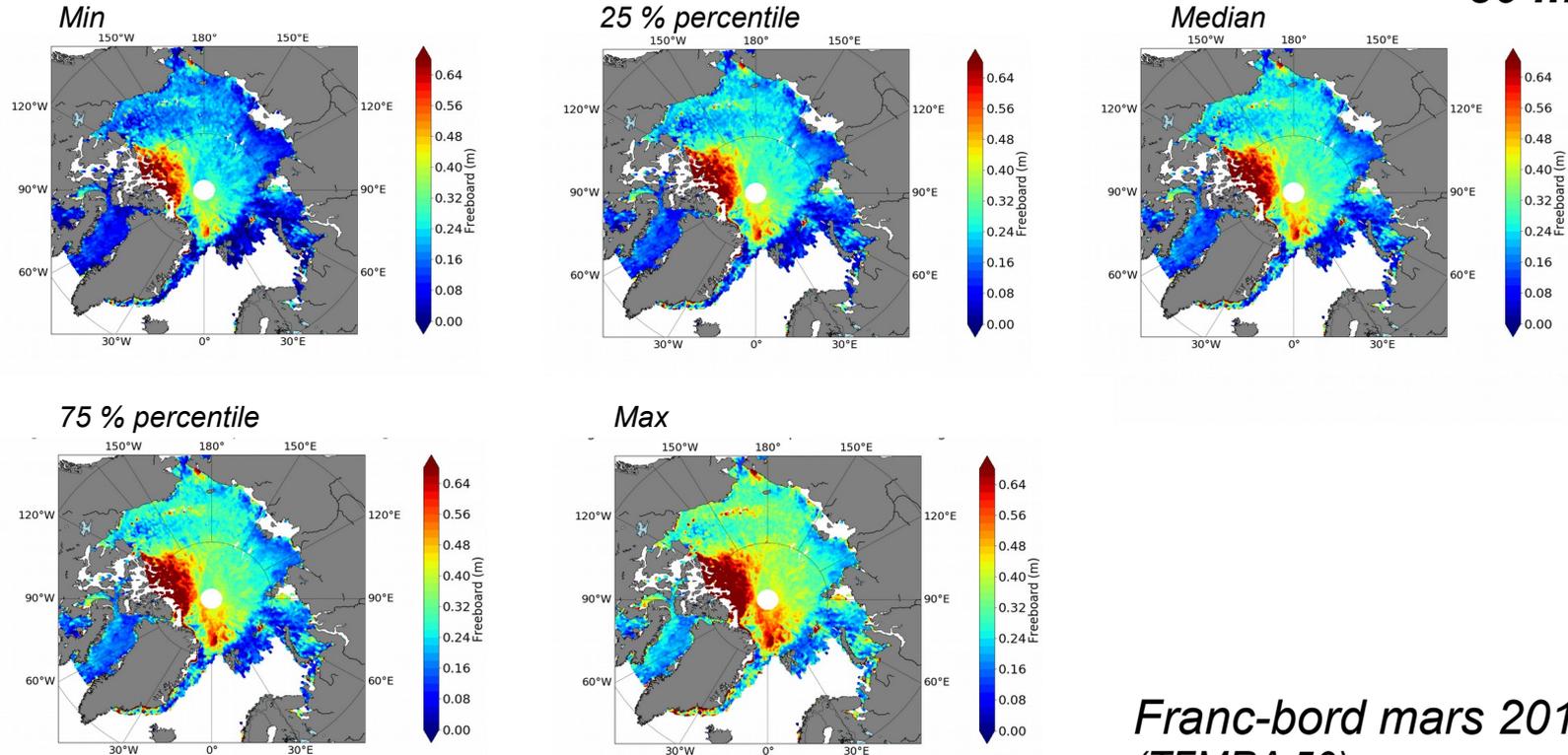
---
- ***Classification Lead/floe*** std = 20 % sur le seuil du PP

---
- **Echantillonnage de la forme d'onde** std = 20 % sur  $wvf_{\max}$ 

---
- **Seuil TFMRA fixe** std = 10 % sur le seuil TFMRA50

# 3) De nouvelles quantification des incertitudes..

30 membres



Franc-bord mars 2015  
(TFMRA 50)



# Conclusion

- On dispose d'un produit d'épaisseur de glace en Antarctique
  - avec neige AMSR
  - avec neige Ka/Ku
- Distributions **CTOH/AVISO+/ODATIS** d'une nouvelle version des produits (**Arctique et Antarctique**) dans l'été
- Affiner les analyses des résultats en Antarctique → **publication des résultats**

## Perspectives :

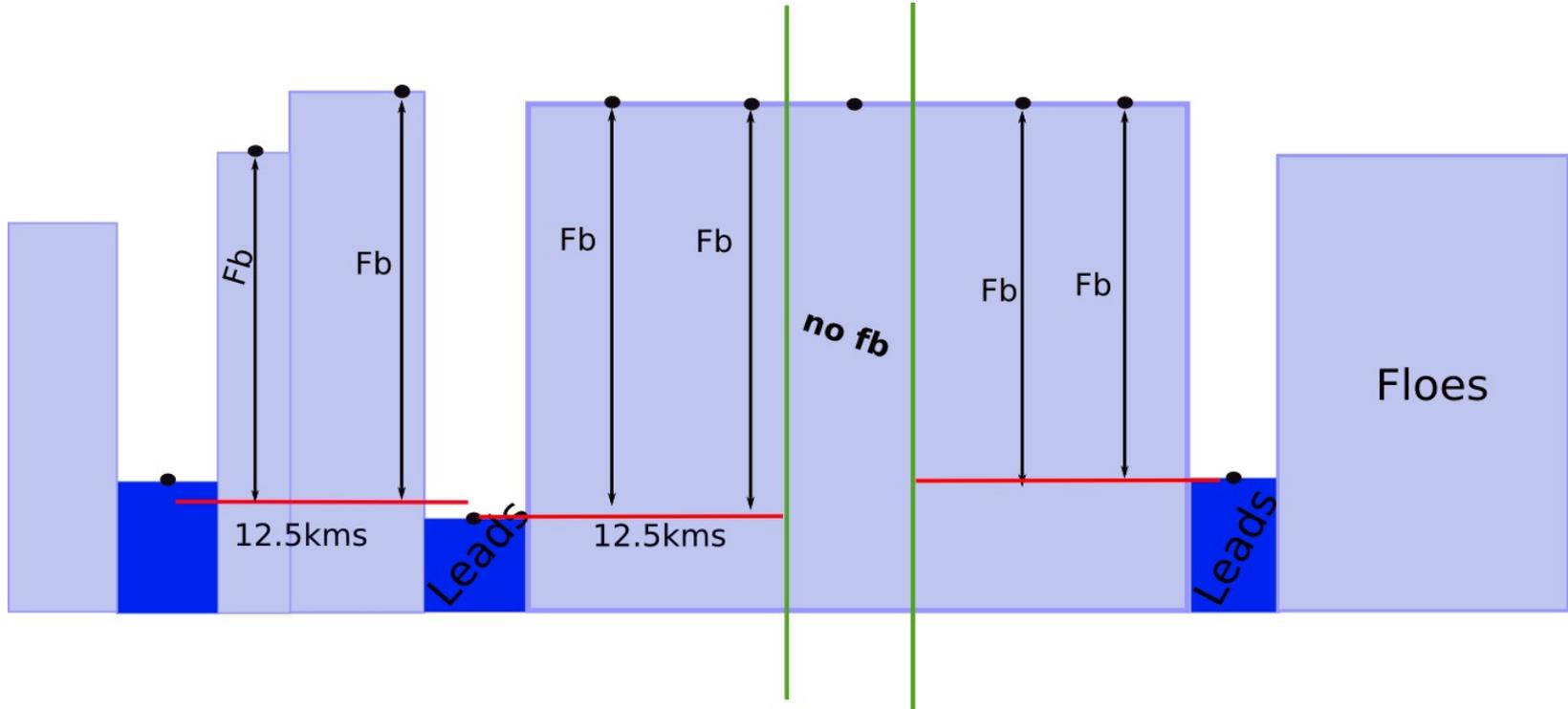
- Aide à la préparation de la mission **CRISTAL**
- Synergie avec les modèles (*collaboration Gilles Garric, Mercator*)
- Allonger la série temporelle avec les données ERS (*projet FDR4Alt, avec CLS*)
- Validations ICESat2
- Études géophysiques → niveau de la mer (*benoît Meyssignac*)



Questions ?

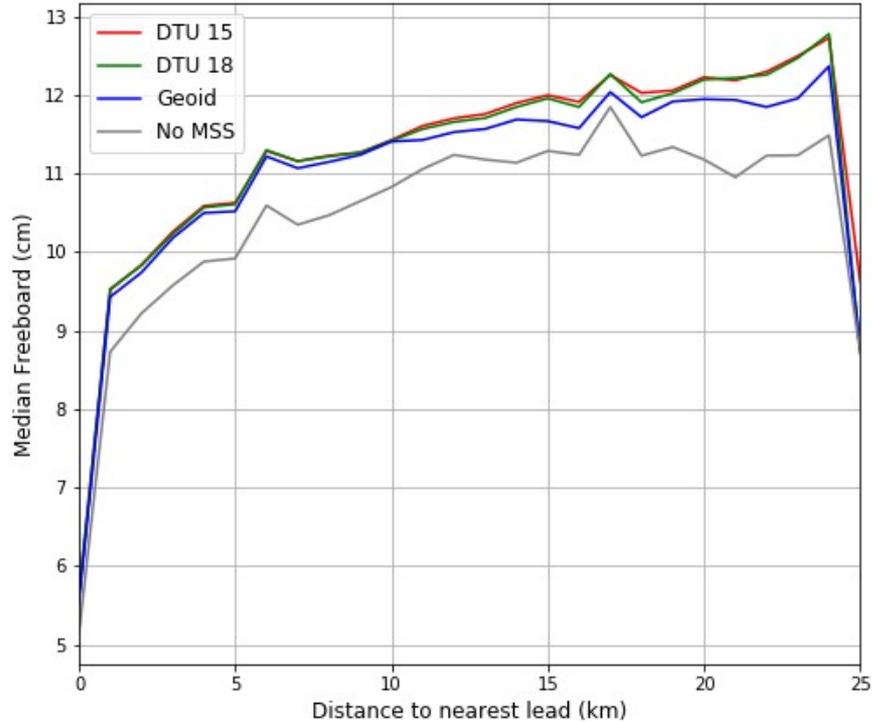
# 0) L'épaisseur de glace (SIT) par altimétrie

Les anomalies de niveau de la mer (SLA) ( $H_{\text{leads}}$ ) sont interpolées sous les floes par un filtre median

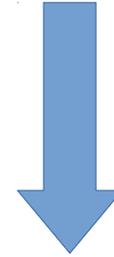


## 2) Main sources of uncertainties (on height)

### - Distance to lead and Mean Sea Surface (MSS)



Difference between red and green curves  $\sim 0$

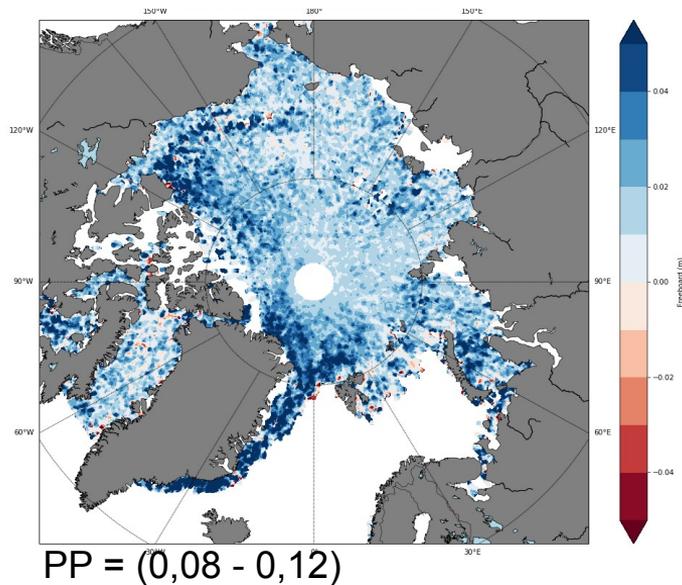


**MSS : small impact on freeboard**

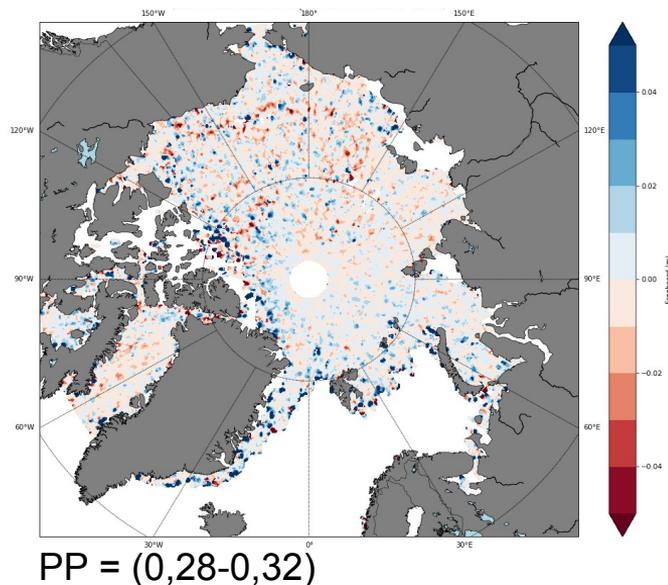
## 2) Main sources of uncertainties

### - Classification lead/floes

### a) Pulse Peakiness threshold



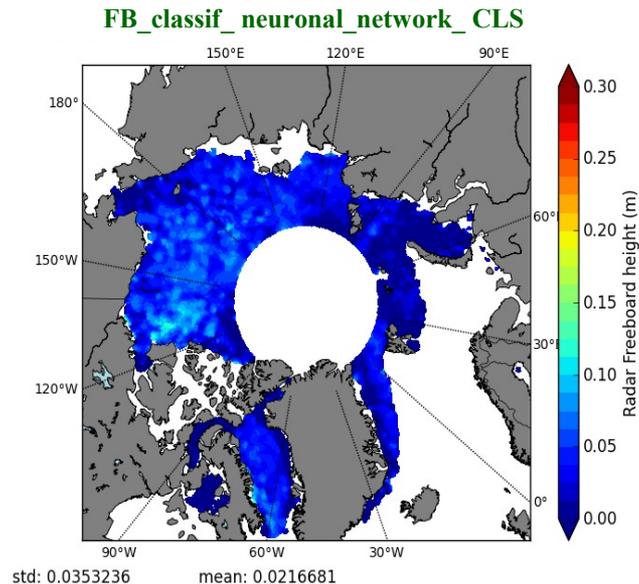
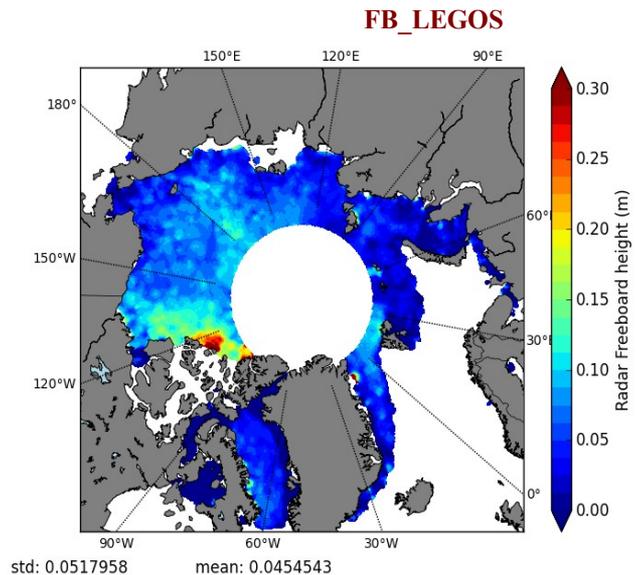
**Floes** : 1,5 cm mean bias et 4 cm std



**Leads** : 4 cm std

## 2) Main sources of uncertainties

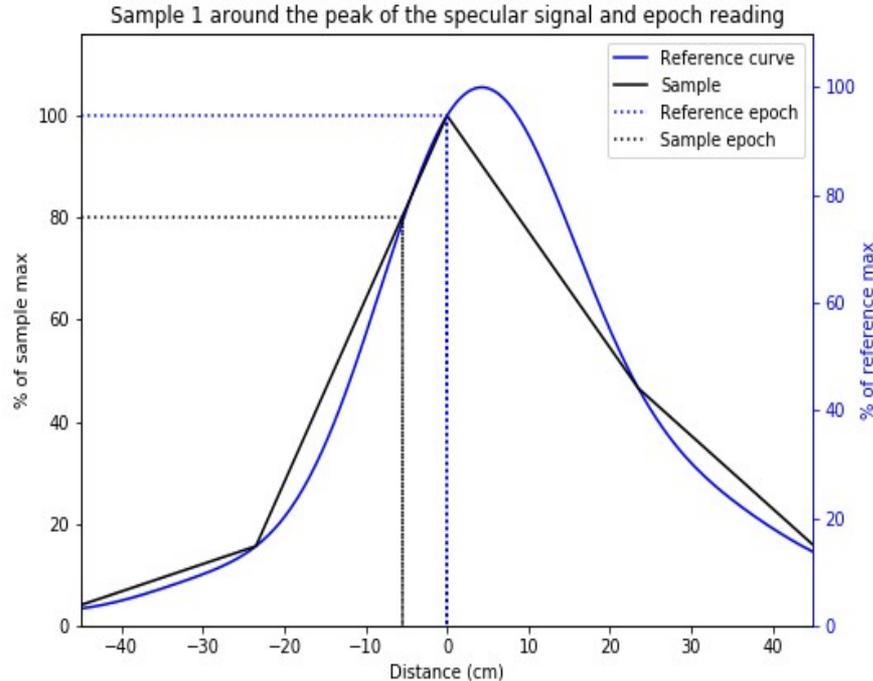
### - Classification lead/floes



Main explication : an insufficient **floe density** in the **CLS** (*Collecte Localisation Satellite*) classification

## 2) Main sources of uncertainties

- **Waveform sampling** : TFMRA → range is a fixed % of the max of the waveform



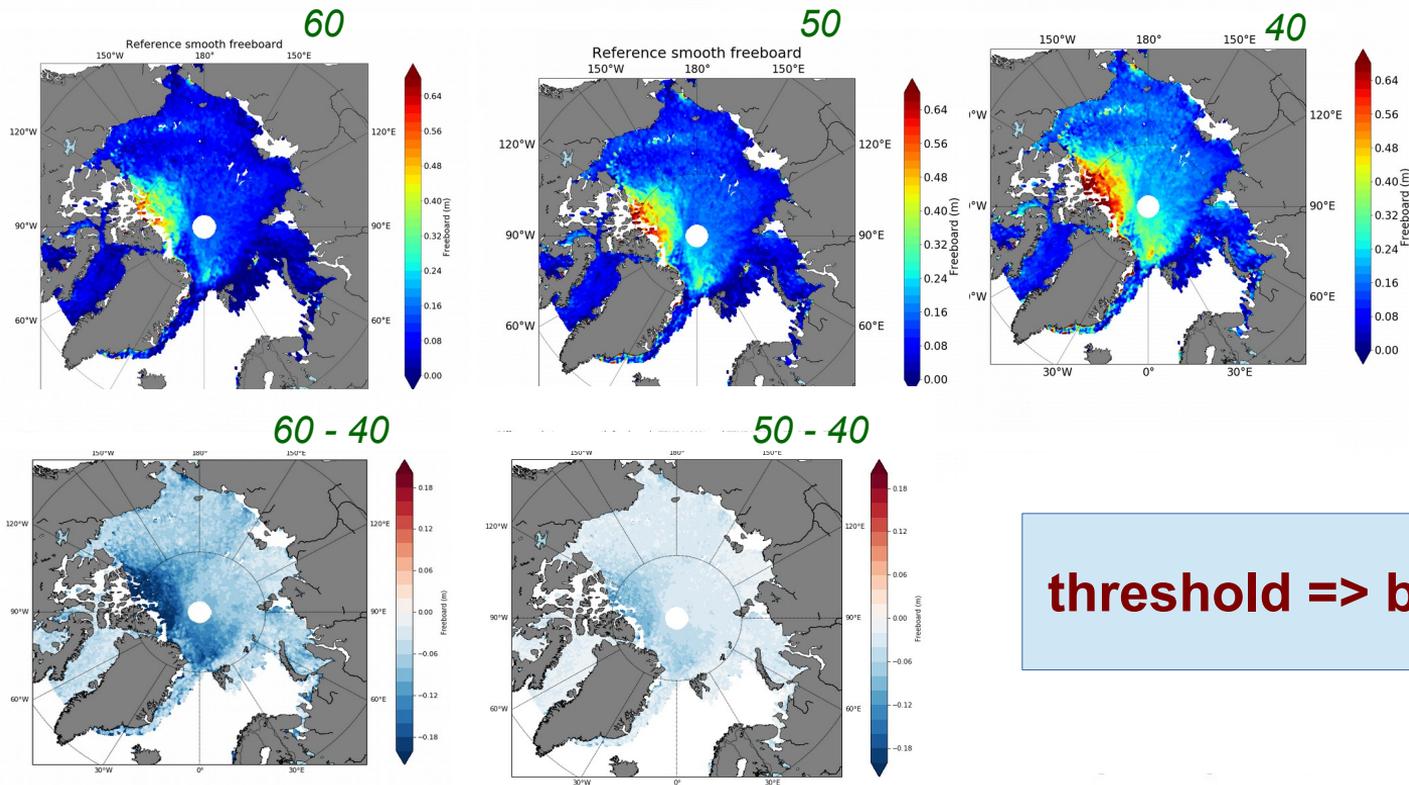
TFMRA 60 %



**Lead :** bias = -15 cm ; std = 4cm  
**Floes:** bias = -30 cm ; std = 7cm

## 2) Main sources of uncertainties

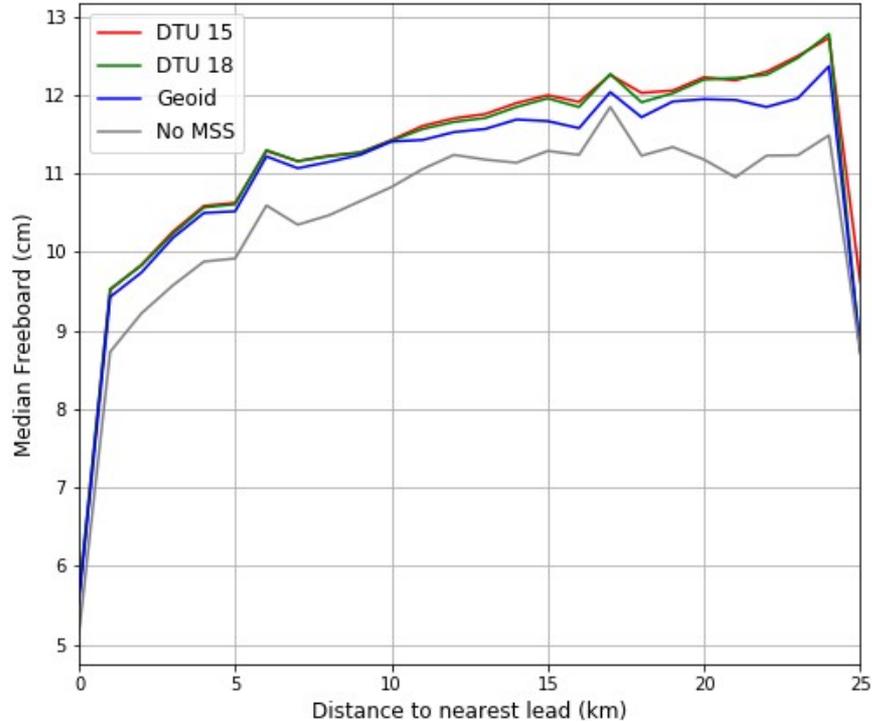
### - TFMRA Threshold



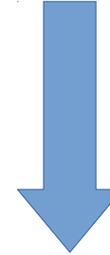
**threshold => bias**

## 2) Main sources of uncertainties (on height)

### - Distance to lead and Mean Sea Surface (MSS)

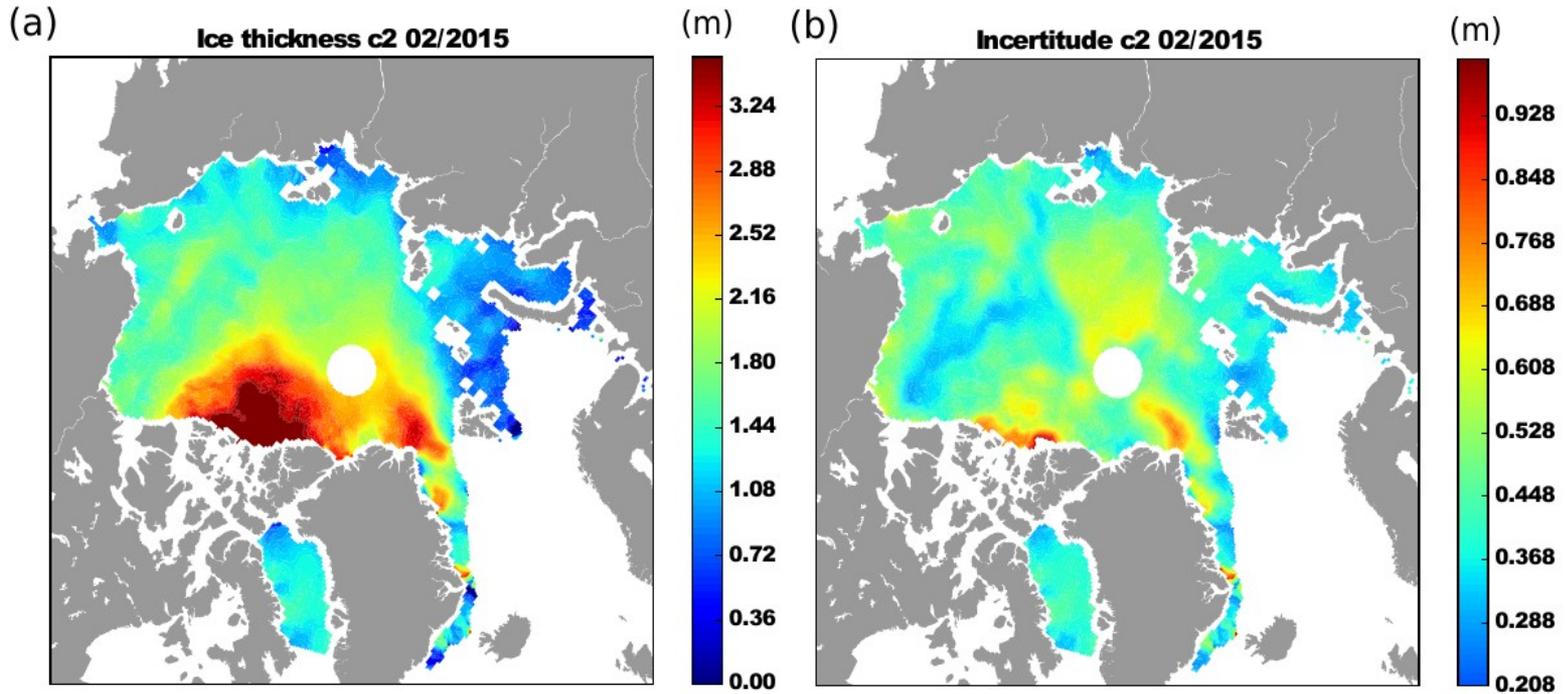


Near leads Sea Ice is thinner



**12,5 km : freeboard underestimation**

### 3) Uncertainties in sea ice products



**Uncertainties are very likely underestimated**