



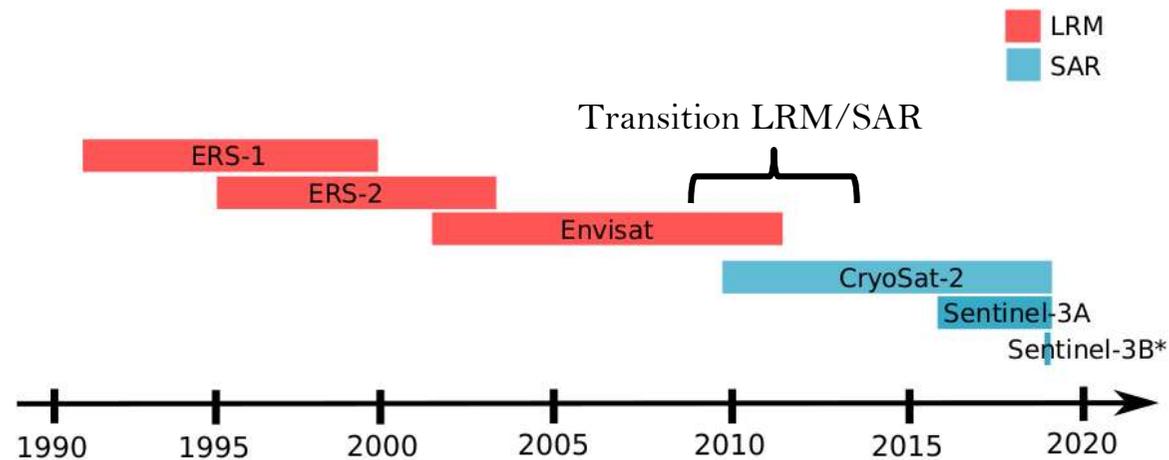
Estimation de l'épaisseur de la banquise Arctique sur la période 2002-2016 à partir des missions Envisat et CryoSat-2

CCT Altimétrie et glaciologie - 15 Juin 2017



Continuité de la mesure du freeboard

- Pour obtenir de longues estimations d'épaisseur de glace (> 20 ans) il est nécessaire de combiner les données de freeboard de plusieurs missions.
- La combinaison de mesure de franc-bord nécessite la correction de biais intermissions lié aux différentes technologie d'altimétrie.



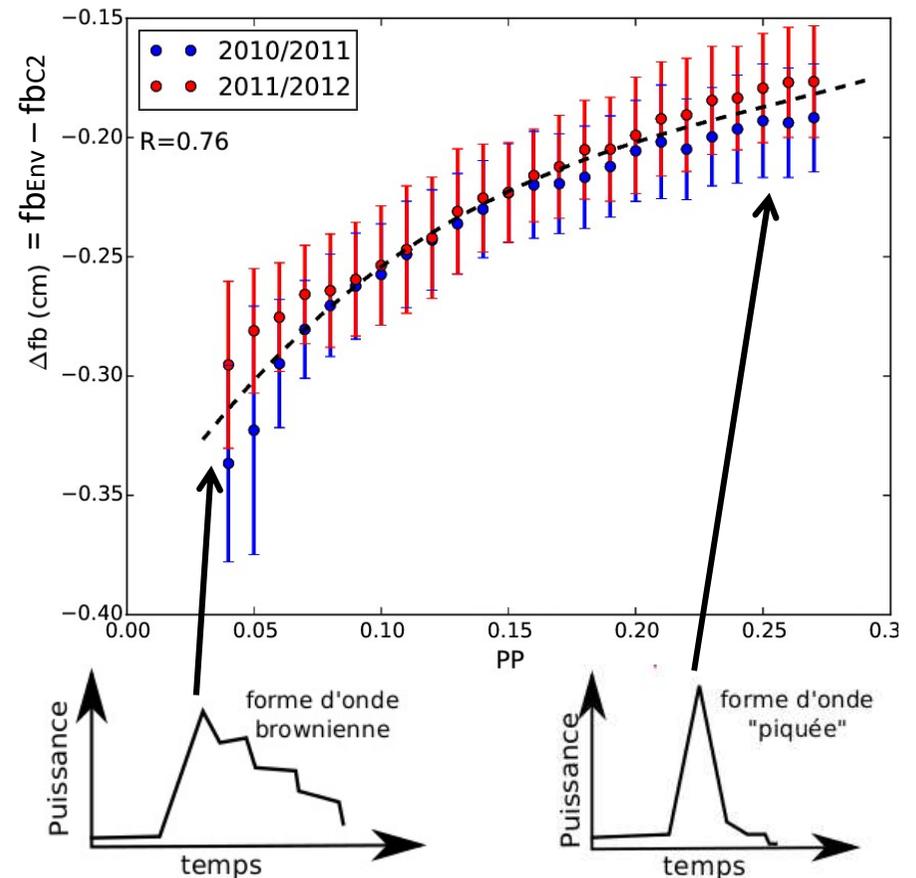
Comparaison du freeboard Envisat et CryoSat-2 sur la période de vol commune (2010-2012)

Comparaison du freeboard Envisat et CryoSat-2 sur la période de vol commune (2010-2012)

- Le freeboard d'Envisat présente un biais (Δfb) causé par la variabilité de rugosité de surface.

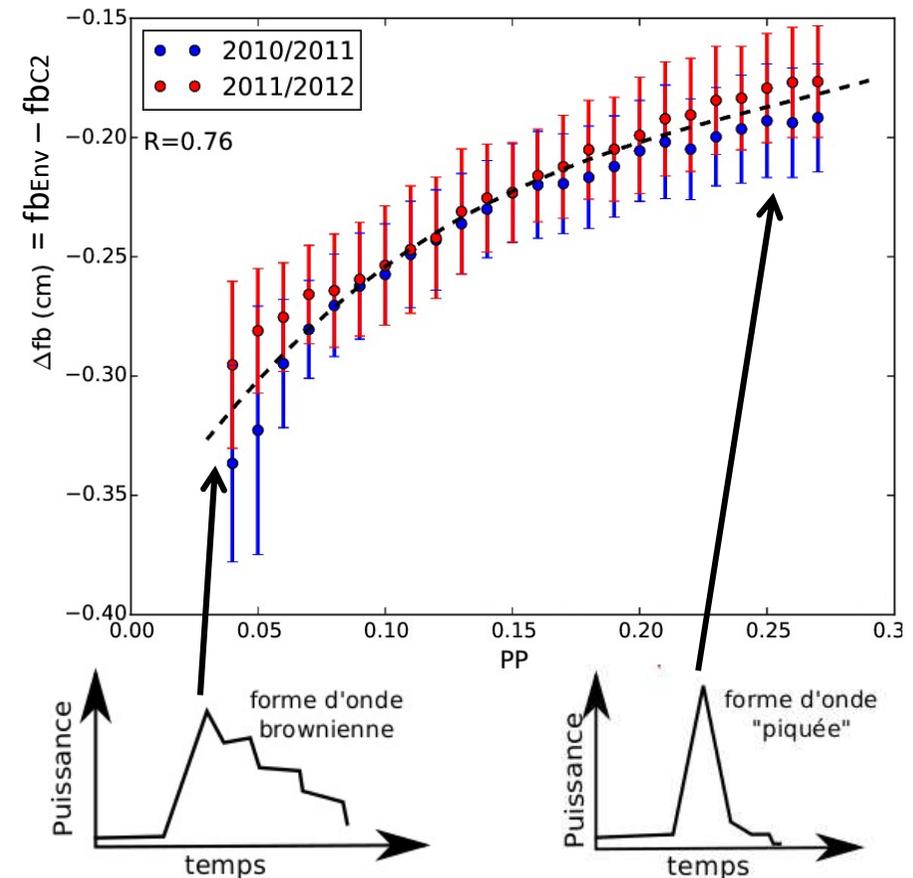
Comparaison du freeboard Envisat et CryoSat-2 sur la période de vol commune (2010-2012)

- Le freeboard d'Envisat présente un biais (Δfb) causé par la variabilité de rugosité de surface.
- Le biais de freeboard peut être paramétré en fonction de la différence de franc bord entre Envisat (biaisé) CryoSat-2 (« vérité ») et du Pulse Peakiness (PP).

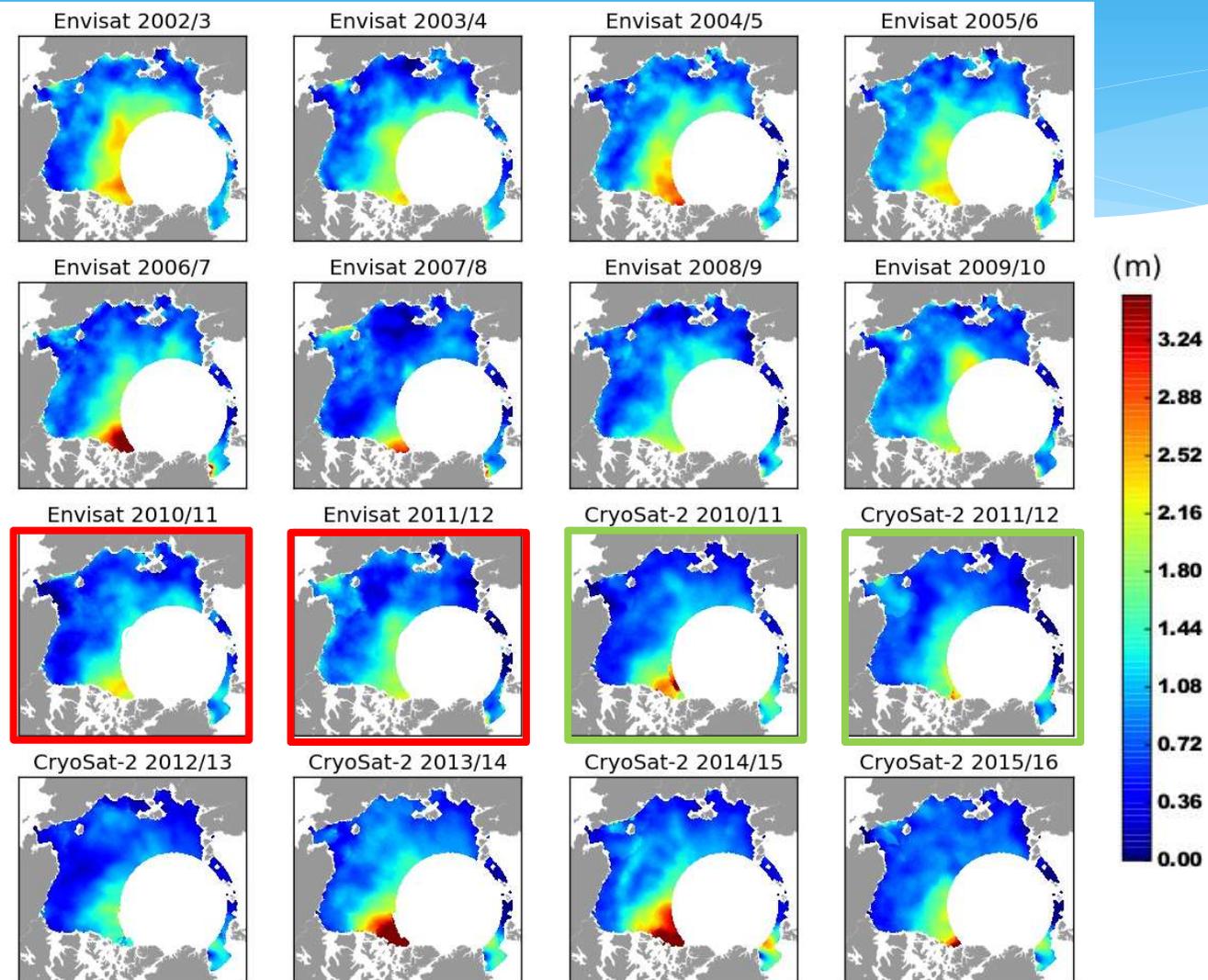


Comparaison du freeboard Envisat et CryoSat-2 sur la période de vol commune (2010-2012)

- Le freeboard d'Envisat présente un biais (Δfb) causé par la variabilité de rugosité de surface.
- Le biais de freeboard peut être paramétré en fonction de la différence de franc bord entre Envisat (biaisé) CryoSat-2 (« vérité ») et du Pulse Peakiness (PP).
- **Cette paramétrisation permet ainsi de corriger le freeboard d'Envisat et d'assurer la continuité de la mesure du franc-bord entre Envisat et CryoSat-2**



Epaisseur de la banquise Arctique sur la période 2002-2016

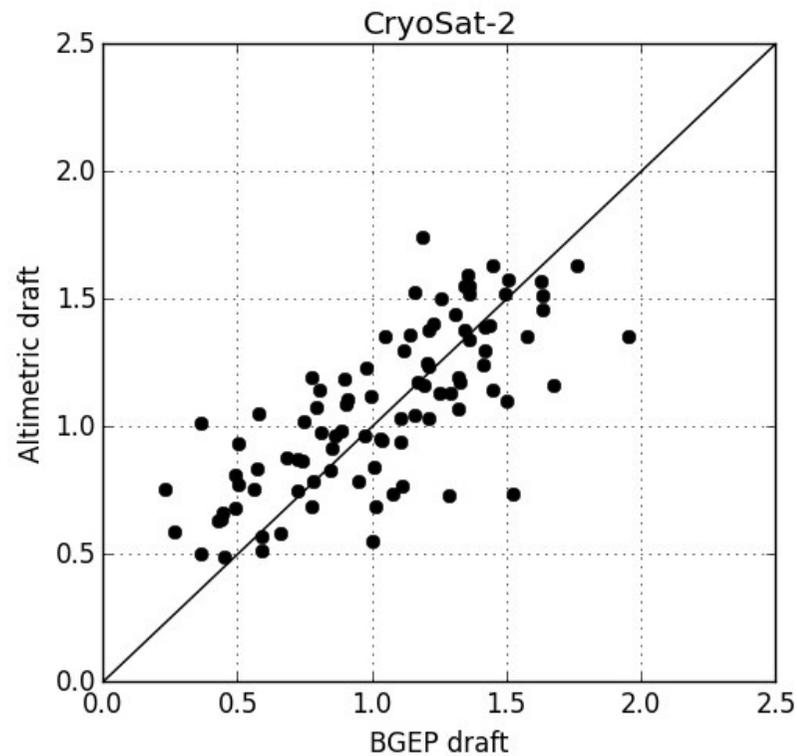
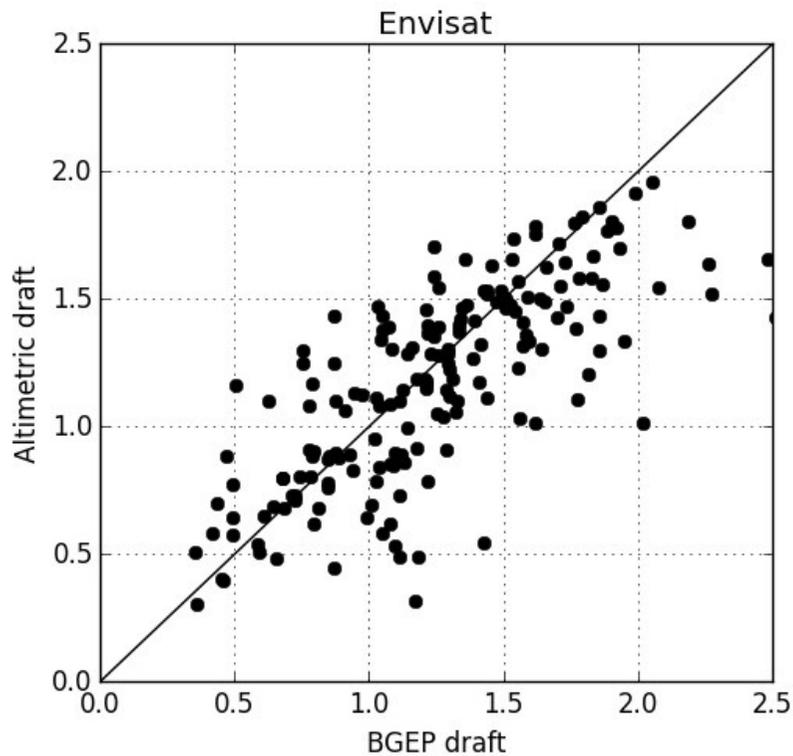
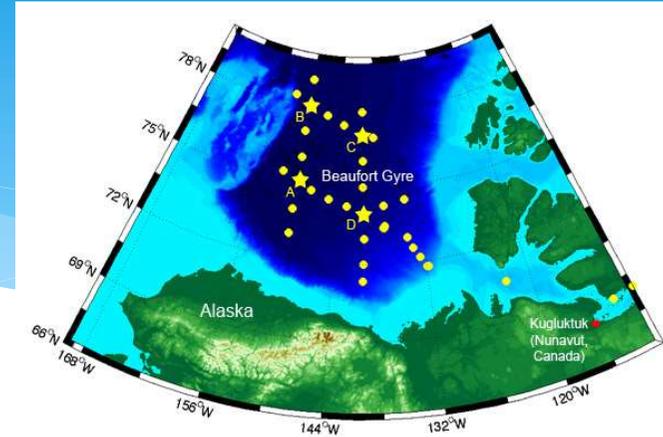


Plan de la présentation

- **Validation par comparaison aux données *in situ***
- Tendances sur la période 2002-2016
- Tentative d'explication des tendances
- Comparaison à d'autres observations globales
- Importance de la couverture spatiale.

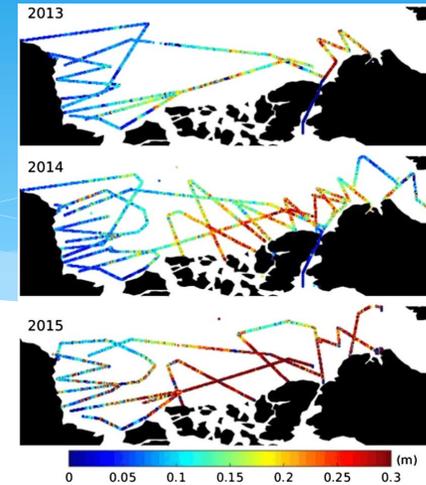
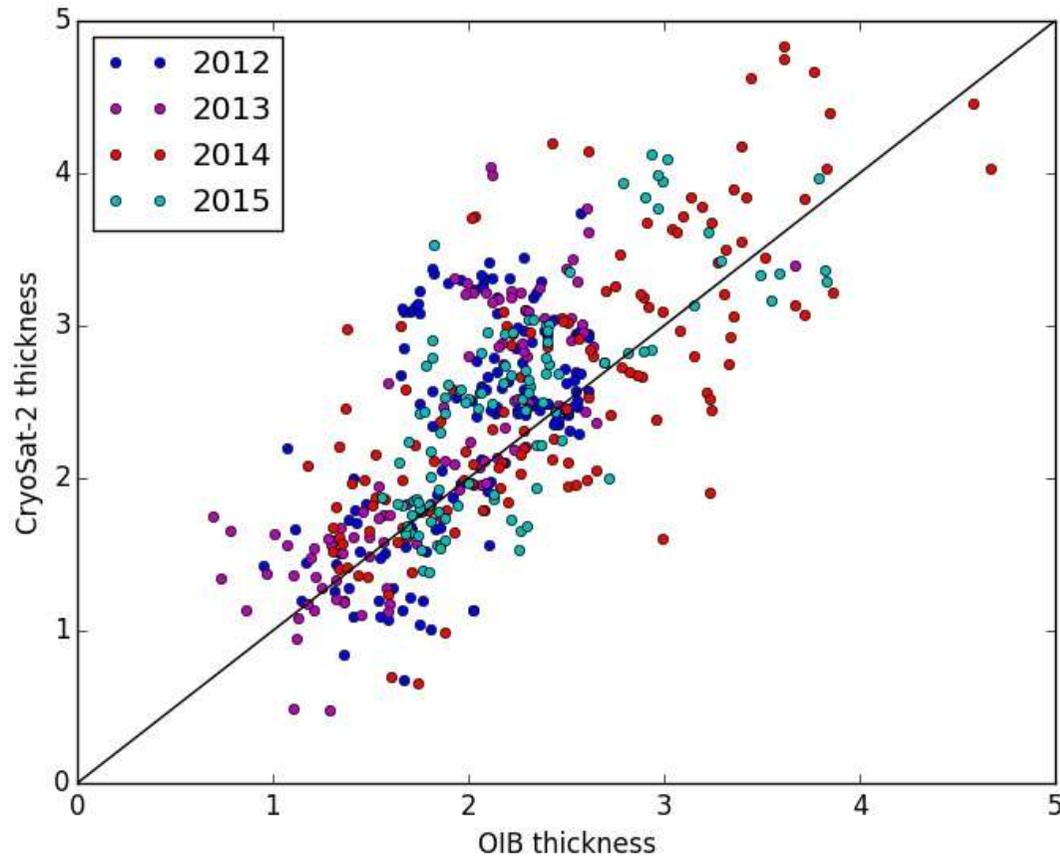
Validation par comparaison aux données *in situ*

a) Mouillages (BGEP)



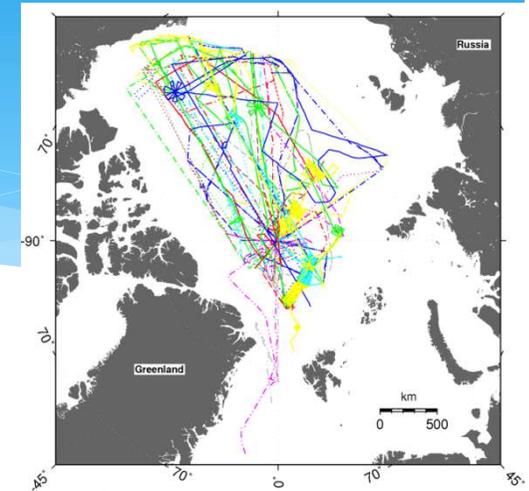
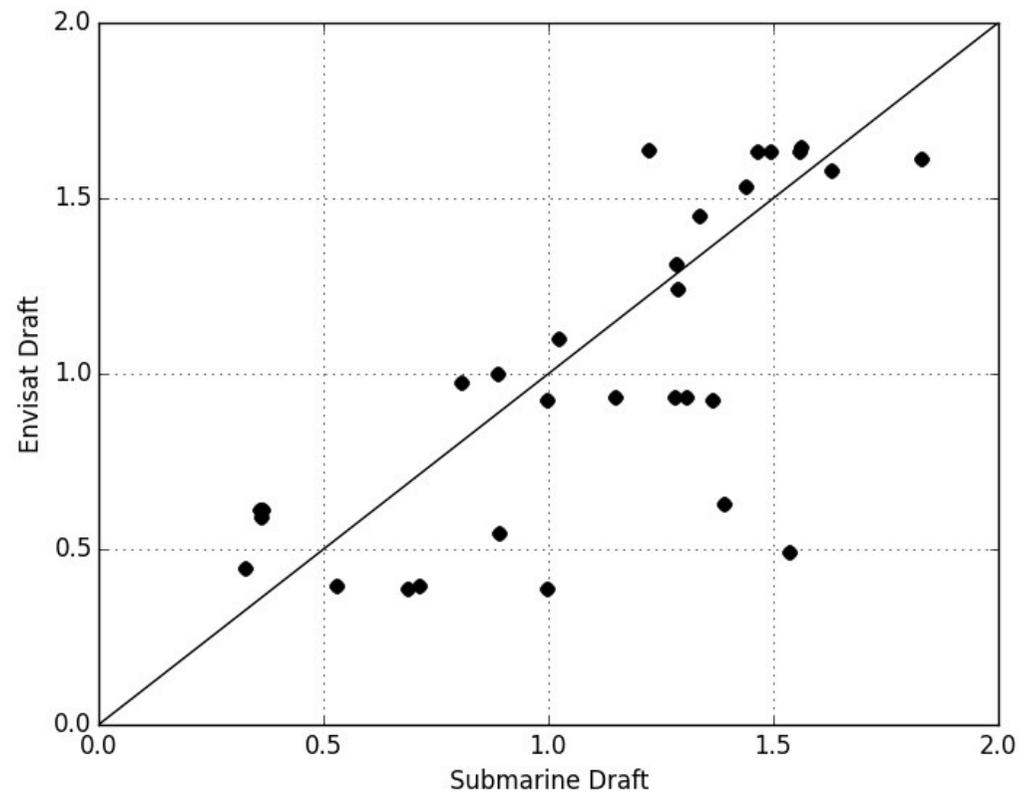
Validation par comparaison aux données *in situ*

b) Mesures aéroportées (OIB)



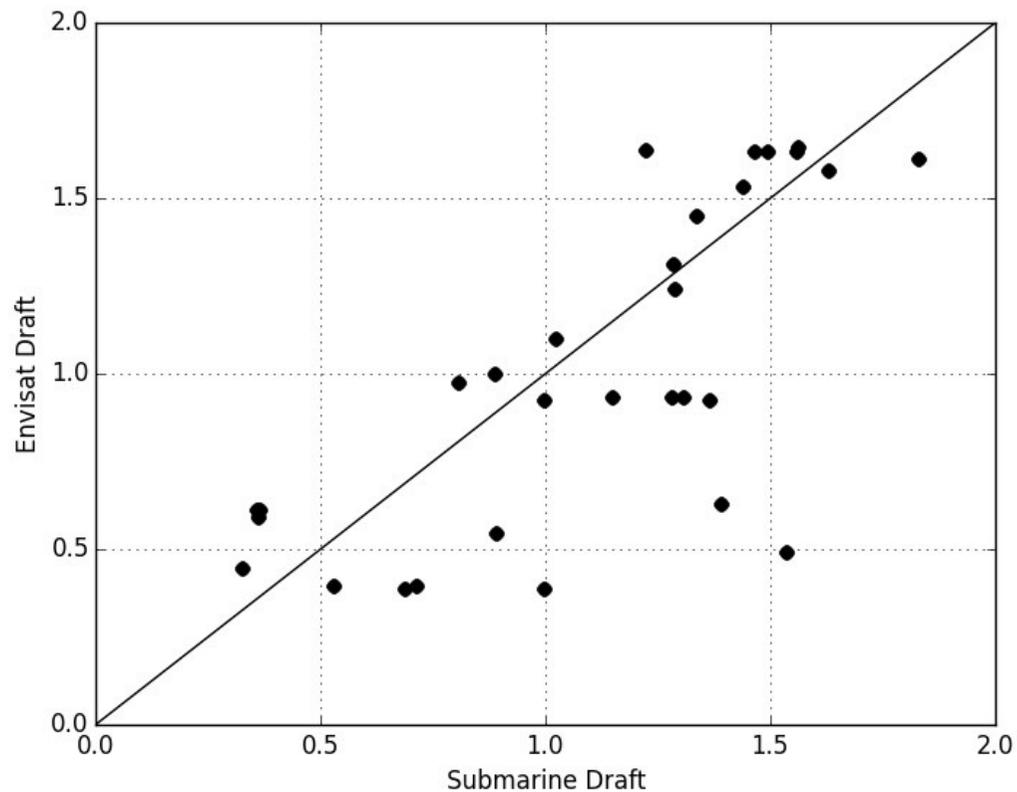
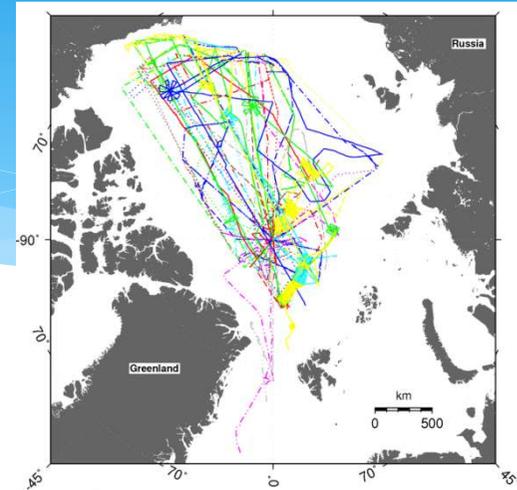
Validation par comparaison aux données *in situ*

c) Draft acquis par les sous-marins militaires



Validation par comparaison aux données *in situ*

c) Draft acquis par les sous-marins militaires

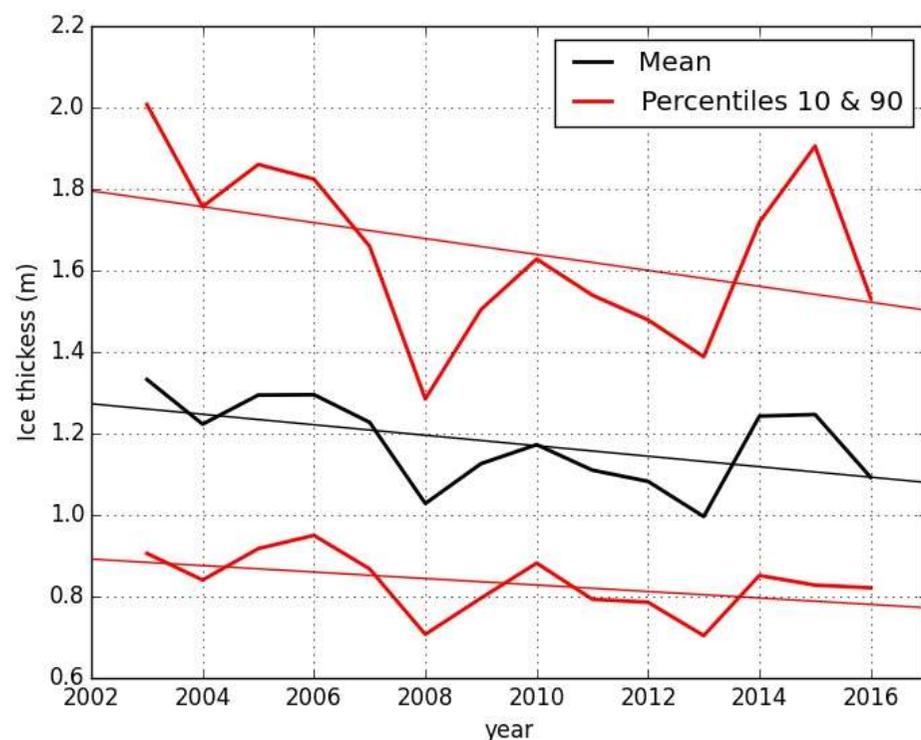


=> Les données de validation dont nous disposons pour la période d'étude (2002-2016) valident les estimations d'épaisseur de glace réalisées à partir de la combinaison des missions Envisat et CryoSat-2.

Plan de la présentation

- Validation par comparaison aux données *in situ*
- **Tendances sur la période 2002-2016**
- Tentative d'explication des tendances
- Comparaison à d'autres observations globales
- Importance de la couverture spatiale.

Tendances sur la période 2002-2016



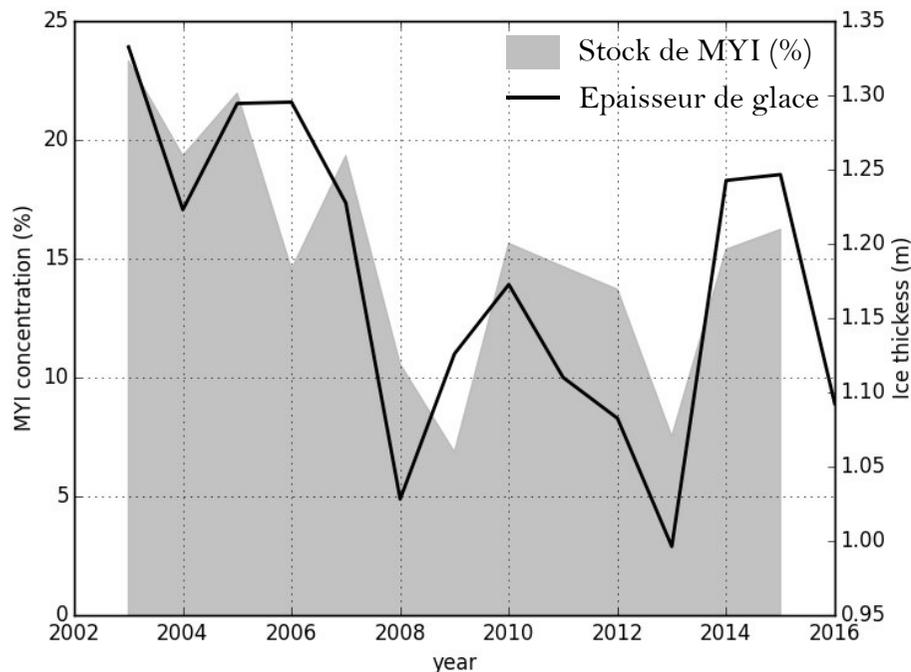
- Tendence moyenne de l'ordre de -1.3 cm/an
- Tendence plus forte pour la glace épaisse mais la glace fine s'amincit également.
- Forte variabilité interannuelle :
 - 2007/08: Forte fonte estival (*Kwok et al. 2009*)
 - 2013/2014: Important regain (*Tilling et al. 2015*)
 - 2015/2016: Chute à nouveau (*Ricker et al. 2017*)

Variations interannuelles des épaisseurs hivernales (Novembre-Mars) de glace de mer Arctique jusqu'à 81.5°N sur la période 2002-2016.

Plan de la présentation

- Validation par comparaison aux données *in situ*
- Tendances sur la période 2002-2016
- **Tentative d'explication des tendances**
- Comparaison à d'autres observations globales
- Importance de la couverture spatiale.

Tentative d'explication des tendances



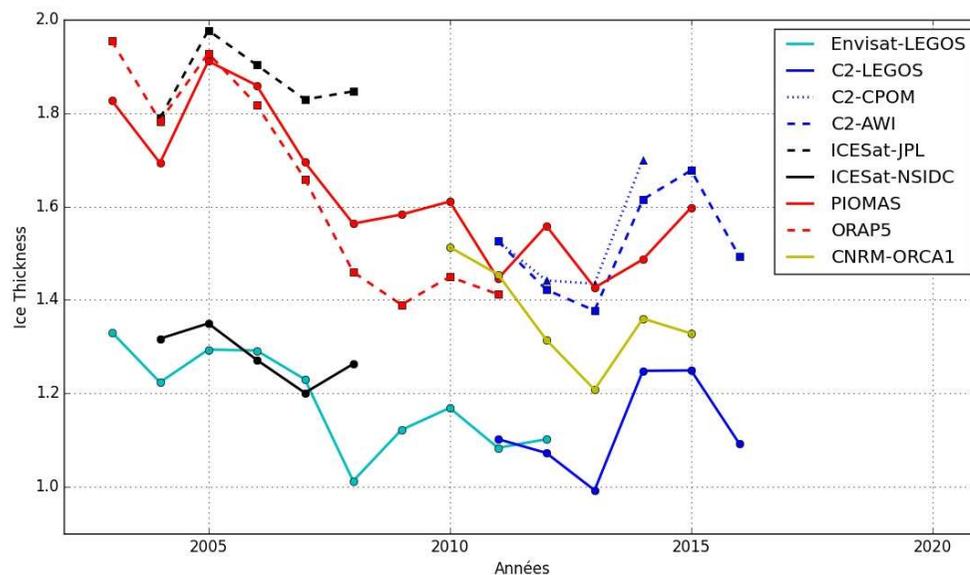
Variations interannuelles des épaisseurs hivernales (Novembre-Mars) de glace de mer Arctique jusqu'à 81.5°N sur la période 2002-2016 et variation de la concentration moyenne de glace MY sur le même domaine.

- Les tendances d'épaisseur de glace sont fortement liées à la variabilité du stock de glace MY.
- **ATTENTION!** Les 2 jeux d'observation ne sont pas indépendants puisque la concentration de glace MY est utilisée pour estimer l'épaisseur de neige et la densité de glace nécessaires pour convertir le franc-bord en épaisseur de glace.

Plan de la présentation

- Validation par comparaison aux données *in situ*
- Tendances sur la période 2002-2016
- Tentative d'explication des tendances
- **Comparaison à d'autres observations globales**
- Importance de la couverture spatiale.

Comparaison aux autres données globale d'épaisseur de glace



Variations interannuelles des épaisseurs hivernales (Novembre-Mars) de glace de mer Arctique jusqu'à 81.5°N sur la période 2002-2016.

- Les épaisseurs de glace LEGOS sont beaucoup plus fines (30 - 70 cm) que la plupart des autres estimations
- La tendance à la baisse est également plus faible pour les estimations LEGOS
- En revanche, la dynamique est semblable pour l'ensemble des données

⇒ Validation des autres données d'épaisseur de glace ?

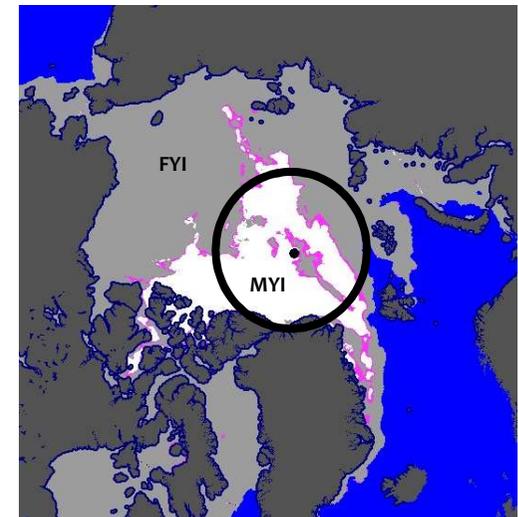
Plan de la présentation

- Validation par comparaison aux données *in situ*
- Tendances sur la période 2002-2016
- Tentative d'explication des tendances
- Comparaison à d'autres observations globales
- **Importance de la couverture spatiale.**

Importance de la couverture spatiale.



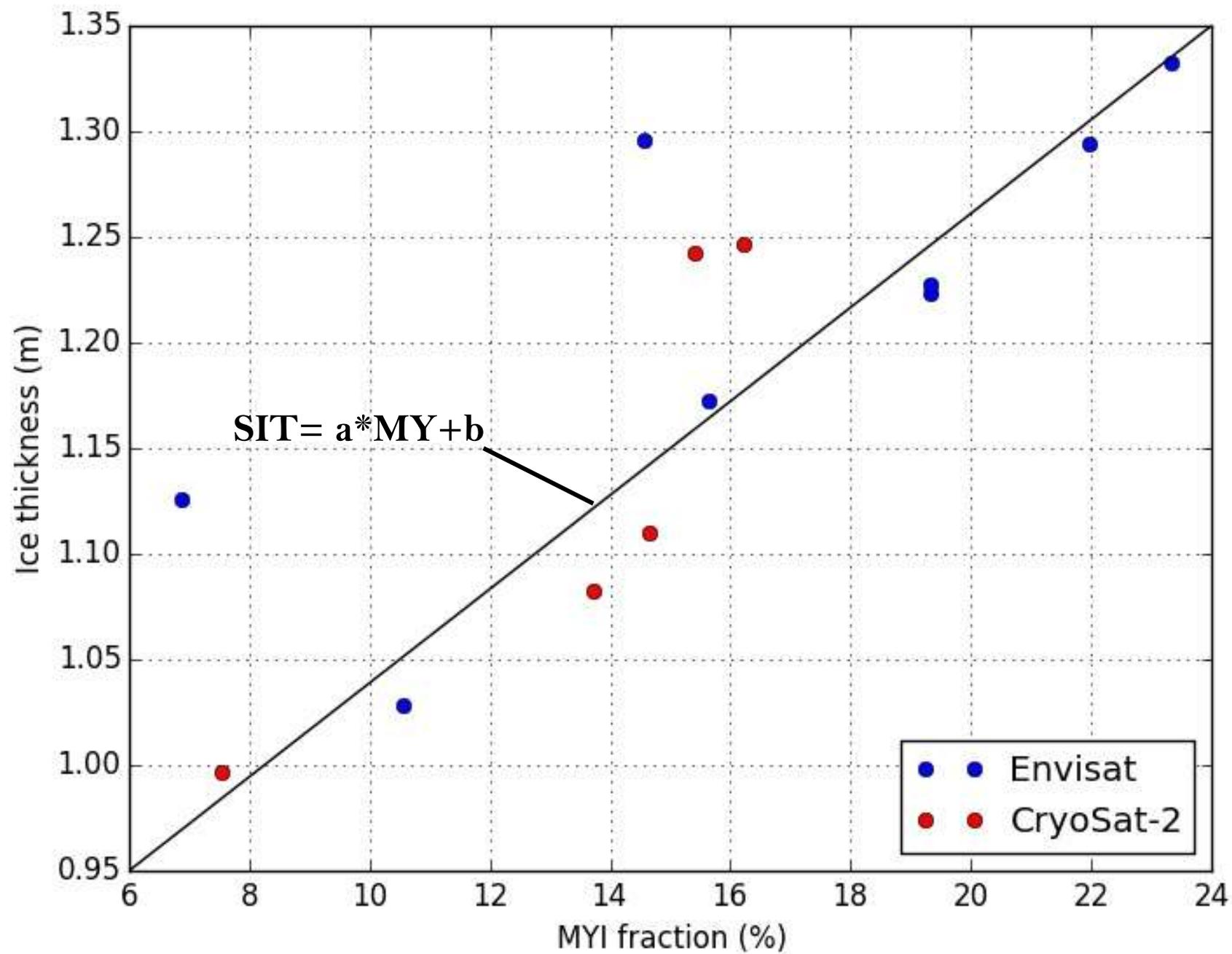
- La plupart de la variation du stock de glace MY a eu lieu au dessus de 81.5° et ne sera donc pas mesurable par altimétrie avant 2010.
- Comment peut on estimer l'épaisseur de glace dans la partie 81.5-88°N?



Conclusions et perspectives

- Nous disposons maintenant de la plus **longue série d'épaisseur de glace de mer (2002-2016)** jamais étudiée. Ces estimations ont été validées par comparaison à des mesures *in situ*
- Les premiers résultats montrent une **tendance de -1,3cm /an**
- Cette série peut-elle être allongée (ERS pour le passé, Sentinel-3 pour le futur)?
- Comment expliquer les différences avec les autres jeux d'observation?
- Comment combler l'absence d'observation au-delà de 81.5°N?

Back up



Incertitudes

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

Incertitudes

Franc-bord **Ralentissement de l'onde radar dans la neige**

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

Incertitudes

Franc-bord **Ralentissement de l'onde radar dans la neige**

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

Loi de propagation gaussienne des incertitudes

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

Incertitudes

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

Incertitudes

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

Incertitudes

Paramètres	Valeurs typiques	Incertitude	Référence
Épaisseur neige	0-40 m	0.094 m	(WARREN et al., 1999)
Densité neige	280-370 $kg.m^{-3}$	3.2 $kg.m^{-3}$	(WARREN et al., 1999)
Densité glace FY	917 $kg.m^{-3}$	35.7 $kg.m^{-3}$	(ALEXANDROV et al., 2010)
Densité glace MY	882 $kg.m^{-3}$	23.0 $kg.m^{-3}$	(ALEXANDROV et al., 2010)
Densité eau de mer	1023-1025 $kg.m^{-3}$	0.5 $kg.m^{-3}$	(WADHAMS et al., 1992)

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

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

Incertitudes

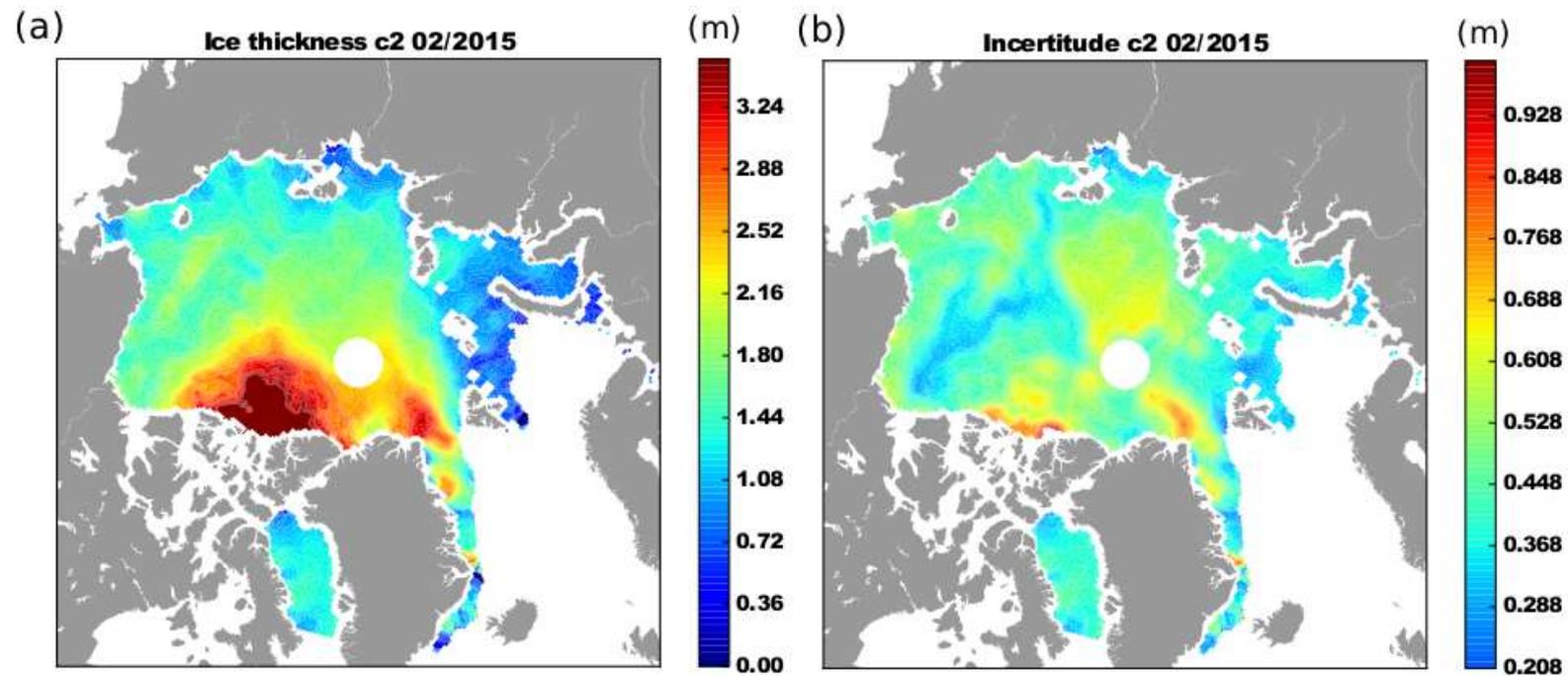
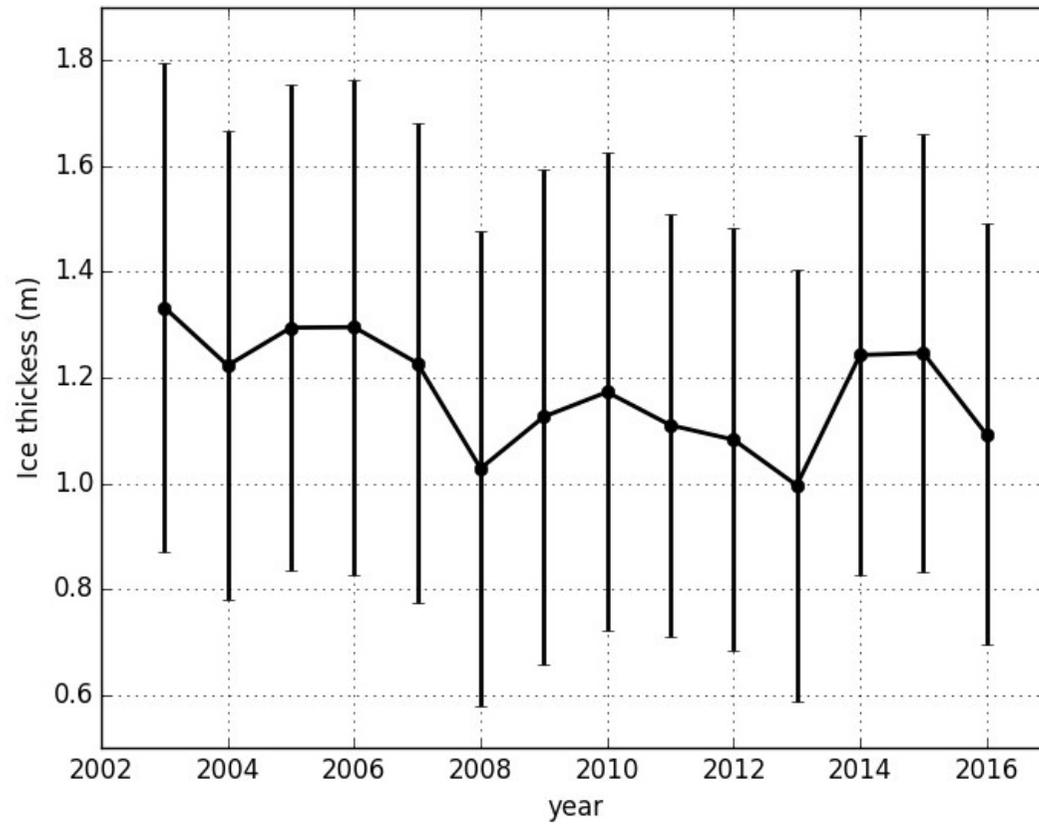
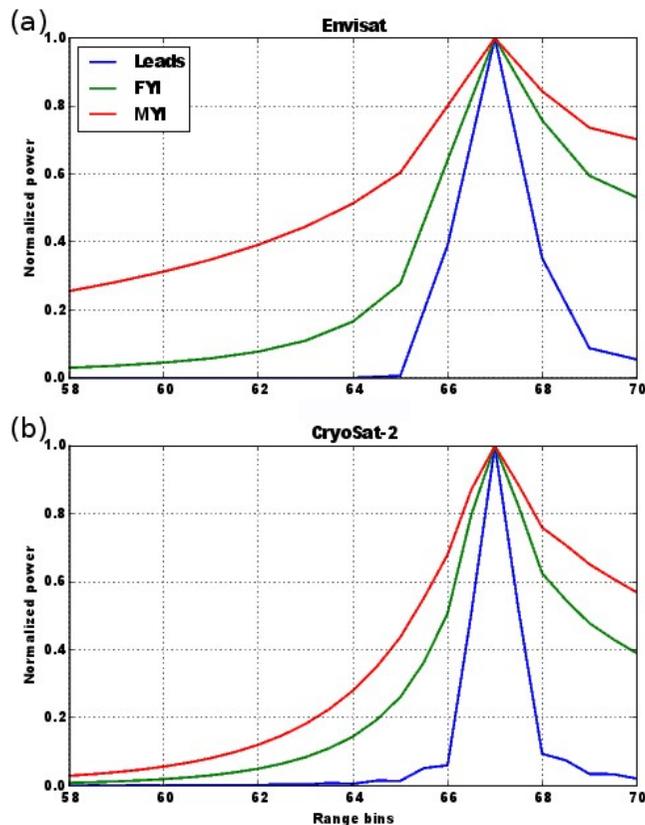


FIGURE 3.8 – (a) Carte d'épaisseur de glace calculée à partir du franc-bord de CryoSat-2 pour le mois de Février 2015 et (b) carte d'incertitude associée.

Incertitudes



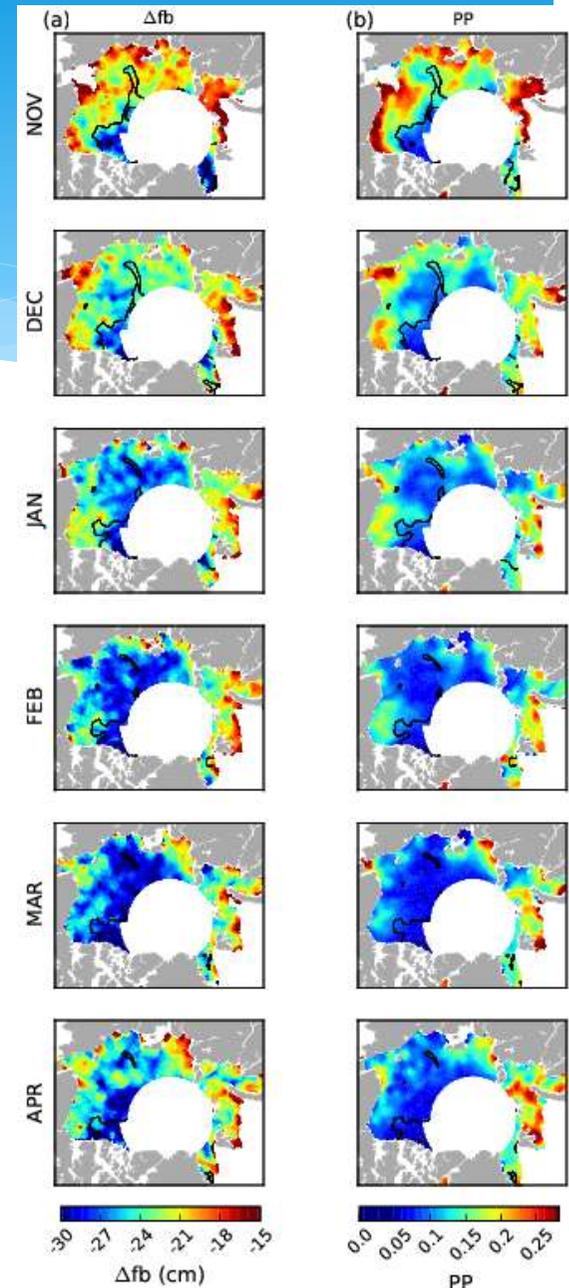
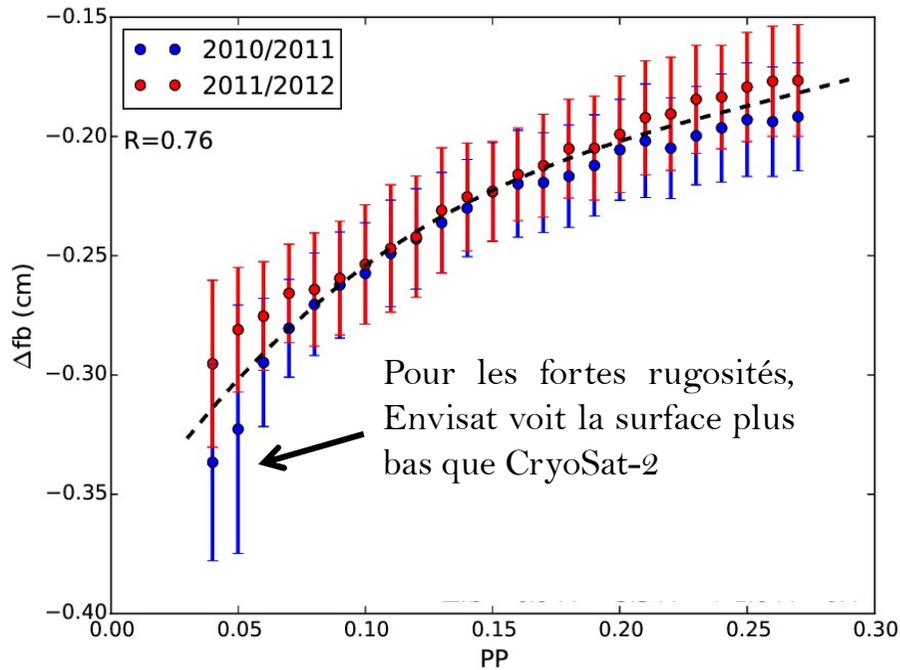
Etude « The Cryosphere »



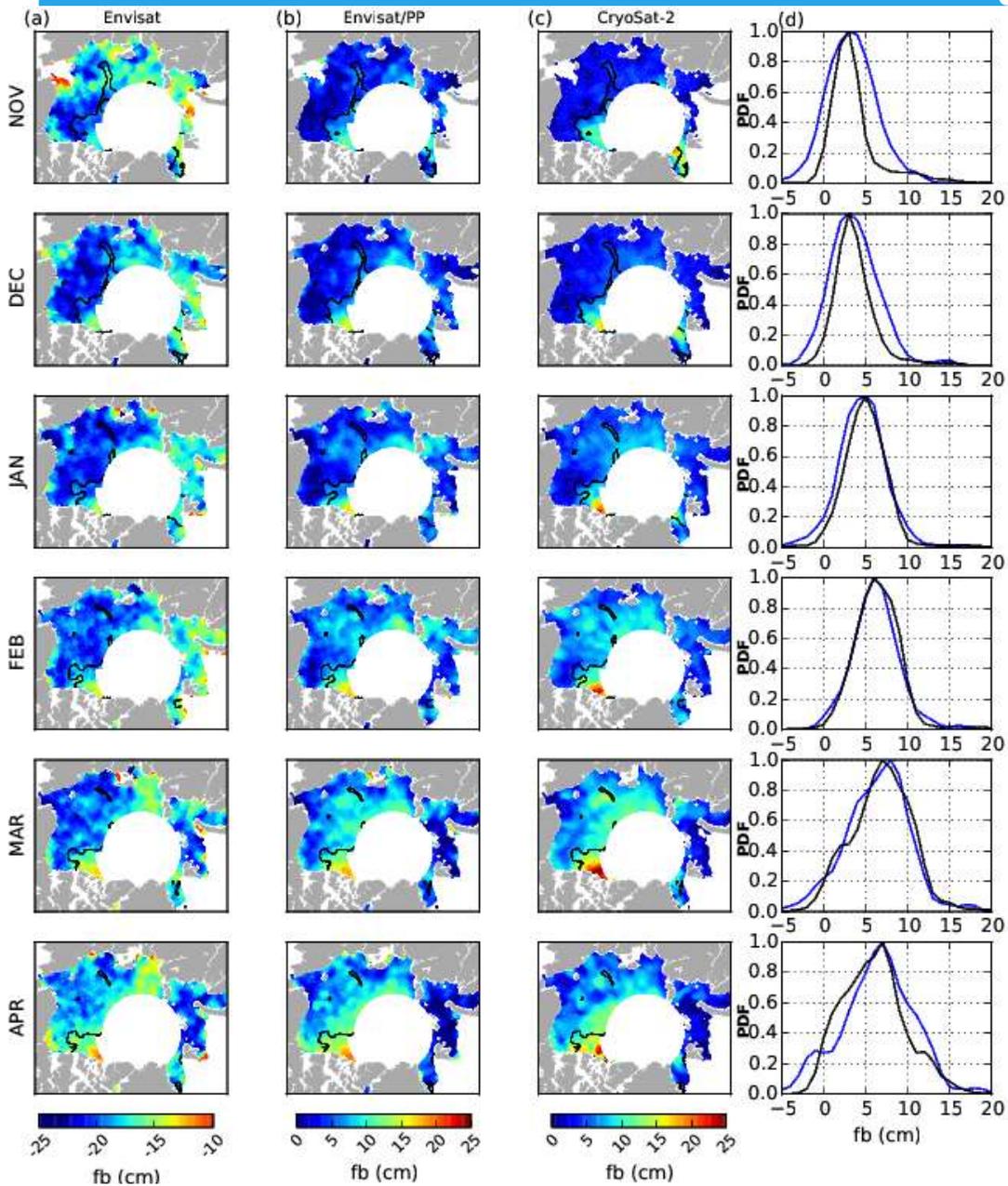
- Les formes d'onde Envisat sont plus sensibles aux variations de propriété de surface (Rugosité, diffusion de volume, etc) que les formes d'onde CryoSat-2
- Cette différence de sensibilité est principalement attribuée à l'empreinte du mode SAR (0.3 km x 18 km) beaucoup plus petite que l'empreinte du mode LRM ($D = 18$ km)
- La variabilité de forme des échos peut être caractérisée par le « pulse peakiness » (PP)

Etude « The Cryosphere »

Relation entre le PP et la différence de franc-bord sur la période commune de vol de CryoSat-2 et Envisat (2010-2012)



Etude « The Cryosphere »



- Paramétrisation du lien entre le PP et le biais de franc-bord pour corriger le franc-bord Envisat
- La combinaison de franc-bord multi-mission (Envisat/CryoSat-2) est rendue possible.
- L'épaisseur de glace peut être étudiée sur la période 2002 à 2016