

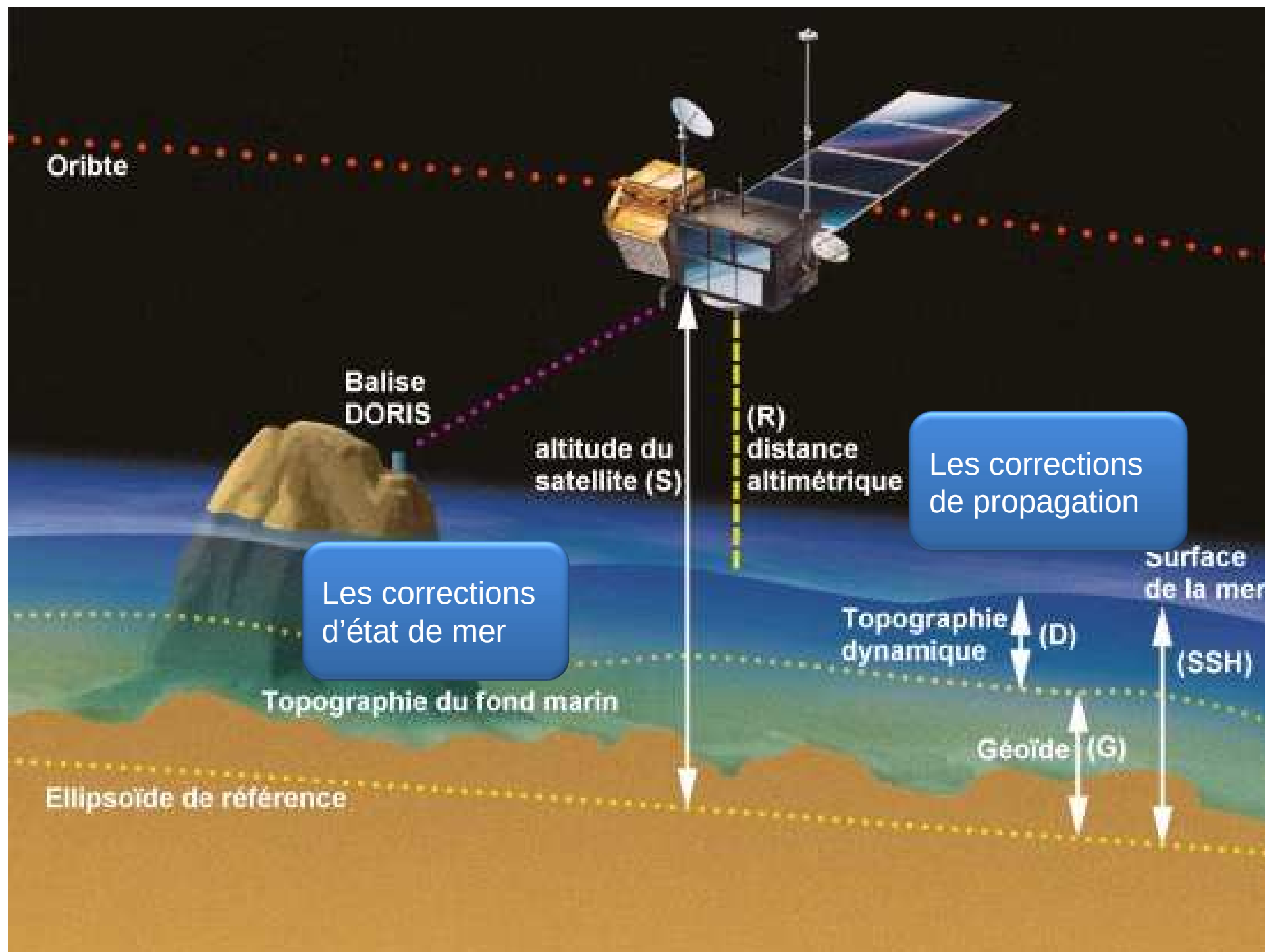
Altimétrie spatiale

Corrections de propagation:

- I. Correction ionosphérique
- II. Correction troposphérique sèche
- III. Correction troposphérique humide

- IV. Correction du biais d'état de mer

E. Obligis, N. Tran (CLS)

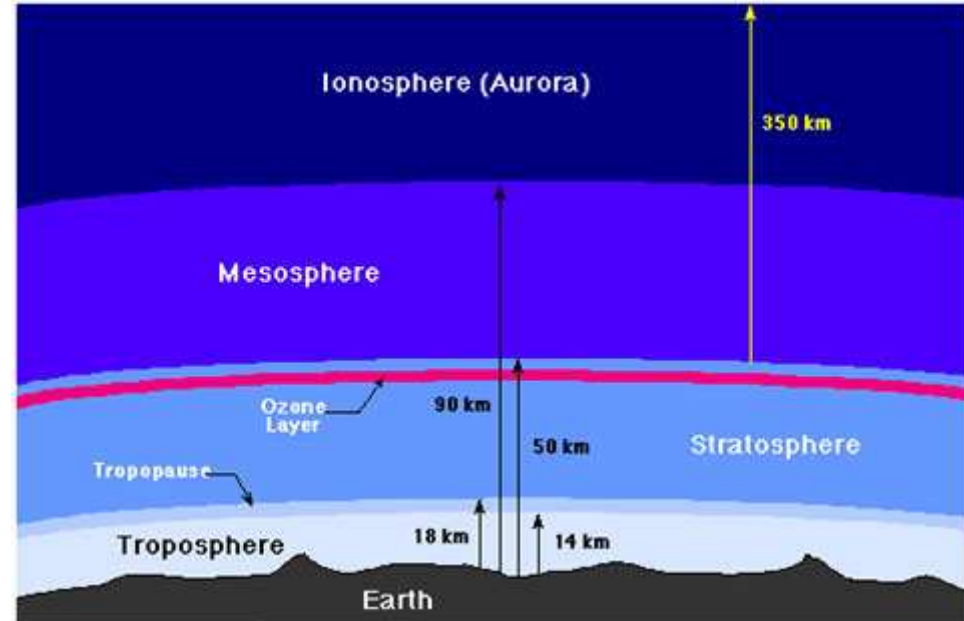


Contexte

• Bruit de mesure	1.7
• Biais électromagnétique	2.0
• Disymétrie des vagues	1.2
• Corr. ionosphérique	0.5
• Corr. troposphérique sèche	0.7
• Corr. troposphérique hum	1.1
Erreur totale sur la distance	3.2 cm

Les corrections de propagation

- Les ondes électromagnétiques émises par les instruments embarqués sont perturbées lors de leur trajet aller-retour (satellite – surface de la terre)
 - Traversée de la ionosphère (atmosphère supérieure > 100km)
 - Traversée de la troposphère (basse atmosphère <10km)
- Les corrections troposphérique et ionosphérique pour l'altimétrie (bandes S, C, Ku, Ka, visée nadir)



- I. Correction ionosphérique
- II. Correction troposphérique sèche
- III. Correction troposphérique humide
- IV. Correction du biais d'état de mer

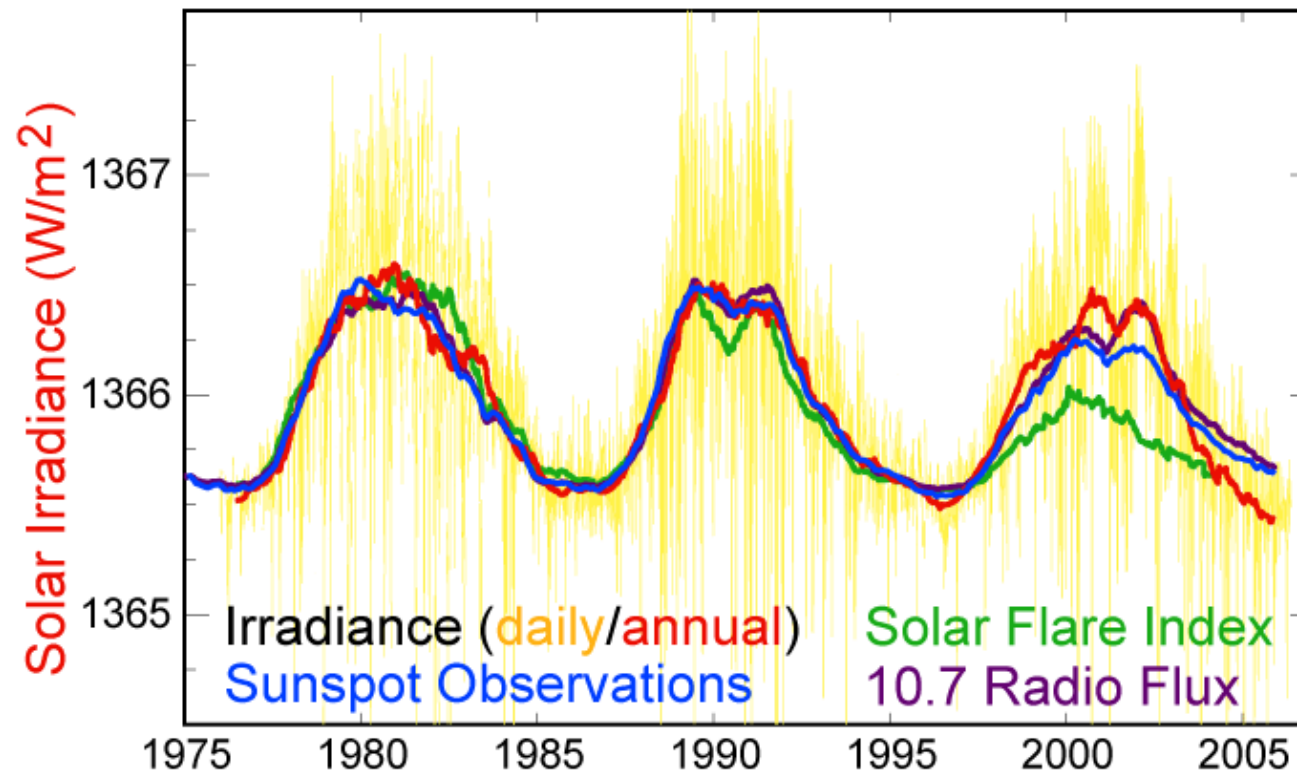
I. Correction ionosphérique

- Le signal radar est ralenti dans l'ionosphère (altitude entre 50 - 2000 km) par la présence d'électrons, produits par l'ionisation de la haute atmosphère par la radiation solaire.
- Signature temporelle:
 - le TEC (Total Electronic Content) est corrélé à l'heure locale; maximum autour de 2:00 pm et minimum autour de 5:00 am
 - le TEC est corrélé à la saison (maximum en hiver, minimum en été)
 - le TEC est corrélé avec les évolutions des indices géomagnétiques et d'activité solaire
- Signature spatiale:
 - le TEC est corrélé principalement au champ géomagnétique; maximum en zone tropicale

I. Correction ionosphérique

- Signature temporelle:

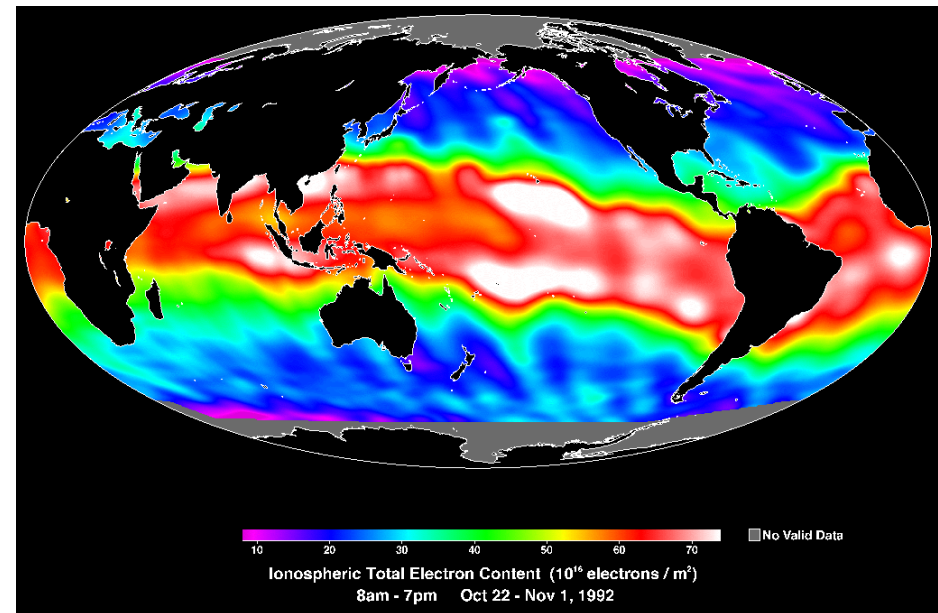
Solar Cycle Variations



<http://spaceodyssey.dmns.org/media/13466/solar-cycle-data.png>

I. Correction ionosphérique

- Signature spatiale:
 - the Total Electronic Content is mainly correlated to the geomagnetic field, maximum in the tropical band
 - the highest electronic perturbation occurs at a 400 km altitude



I. Correction ionosphérique

Dépend de la fréquence

Minimum cycle solaire

Maximum cycle solaire

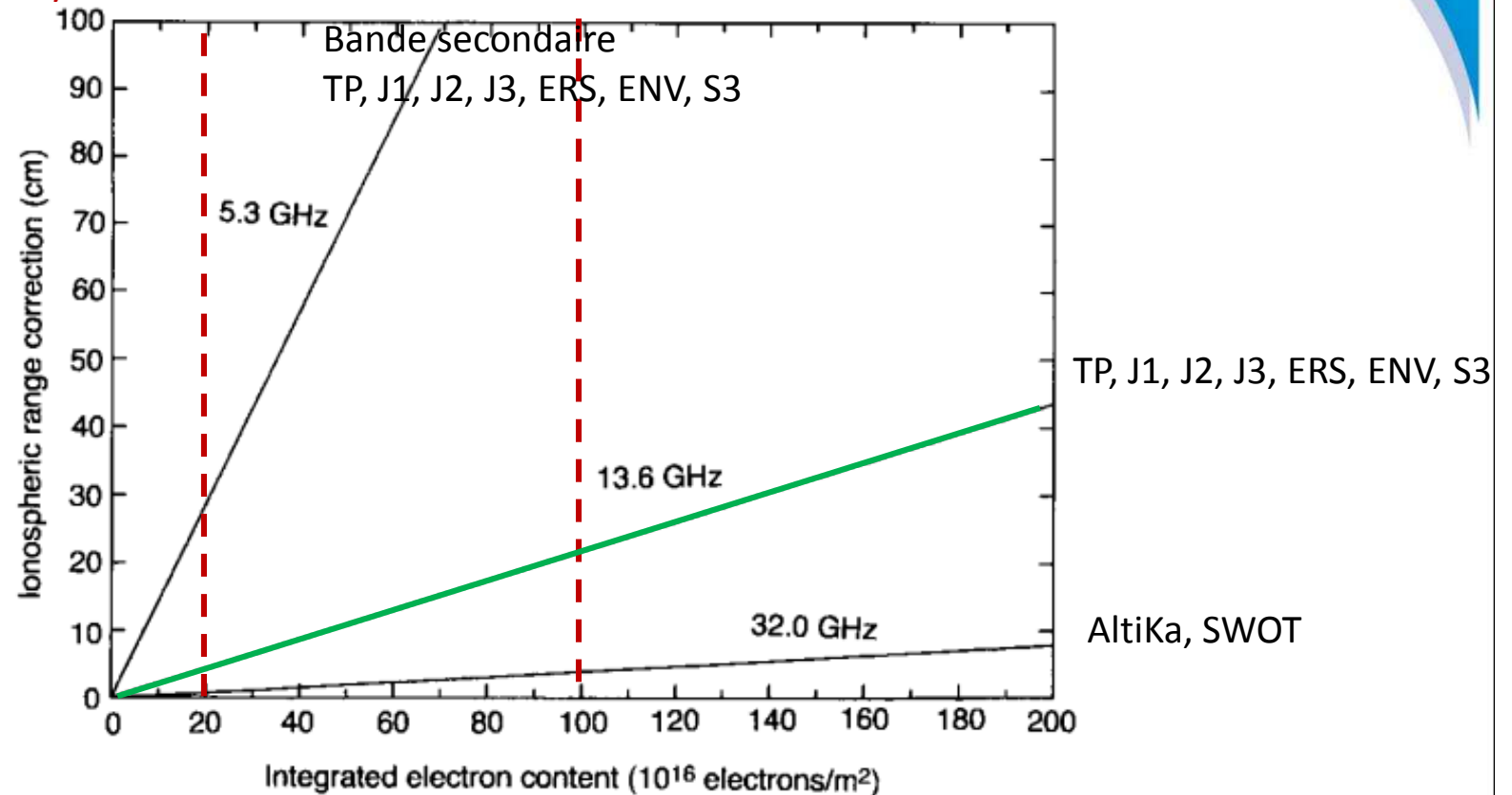


FIGURE 27 Ionospheric range correction as a function of vertically integrated electron content at frequencies of 5.3, 13.6, and 32.0 GHz.

I. Correction ionosphérique

- Estimée à partir de modèles de TEC
- Ou en utilisant un altimètre dans une autre bande de fréquence
Effet entre 1 et 20 cm, valeur moyenne 5 cm et écart-type de 3mm)

ERS-1/2 × Topex ✓ Jason-1/2 ✓ Envisat ✓ (only up to 17/01/08)
GFO × Cryosat × AltiKa ×

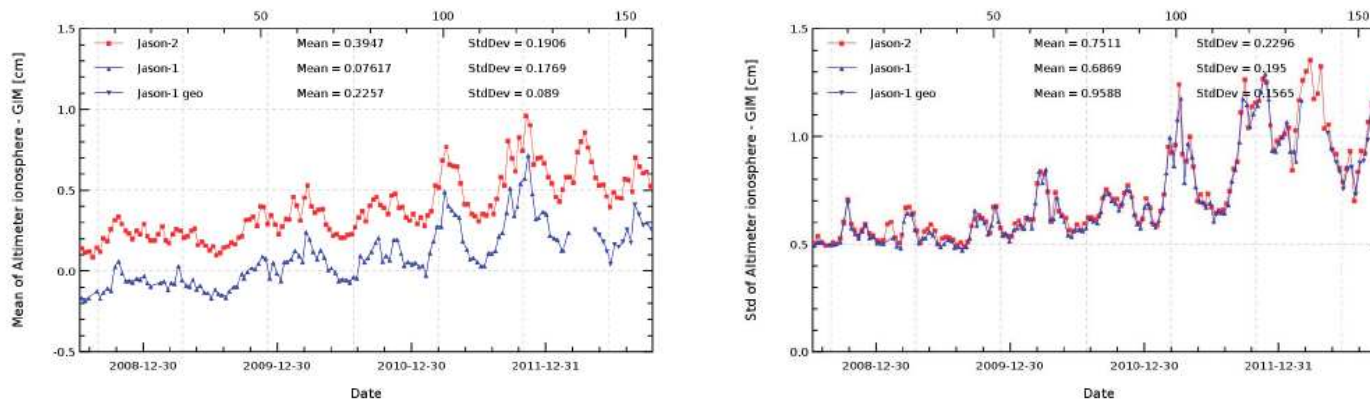


Figure 39: Cycle per cycle monitoring of filtered altimeter ionosphere correction minus GIM ionosphere correction for Jason-1 and Jason-2. Left: Mean, right: standard deviation.

Les corrections de propagation troposphérique

Réfraction atmosphérique

- Correction de longueur dans un milieu non dispersif (indépendant de la fréquence):

$$dh = c / 2 \int_0^{t1/2} \frac{\eta - 1}{\eta} dt$$

Les équations générales de propagation

- $T1/2$: durée du trajet aller-retour (satellite-terre)
- η : partie réelle de l'indice de réfraction ($\neq 1$ pour les milieux non dispersifs)
- $\eta \sim 1$ aux fréquences micro-ondes $\Rightarrow$ on définit la réfractivité:

$$N = 10^6 (\eta - 1)$$

$$dh = \frac{10^{-6}}{2} \int_0^{2R} N(z) dz = 10^{-6} \int_0^R N(z) dz$$

Les corrections de propagation troposphérique

Réfractivité

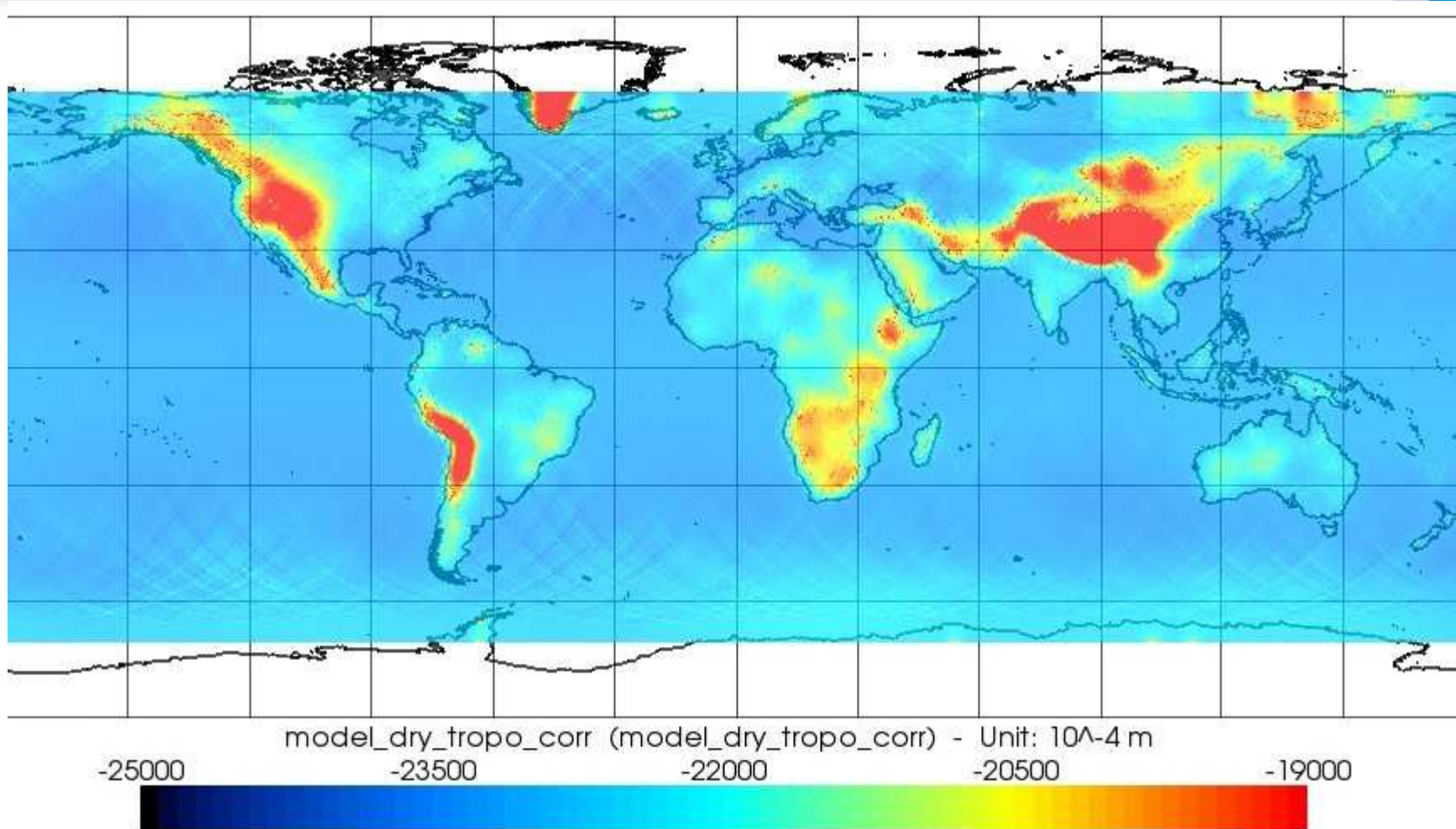
- N dépend de la température, de la pression et des densités en eau vapeur et liquide
- $N = N_{dry}$ (réfractivité de la troposphère sèche)
+ N_{vap} (réfractivité de la vapeur d'eau)
+ N_{liq} (réfractivité des gouttelettes d'eau liquide)
- Effet de la pluie non considéré ici car déformation de la forme d'onde qui devient impossible à retracker => flag

- I. Correction ionosphérique
- II. Correction troposphérique sèche
- III. Correction troposphérique humide
- IV. Correction du biais d'état de mer

II. Correction troposphérique sèche

- La correction de troposphère sèche en cm peut être approximée par la formule de Saastamoinen :
$$\Delta R_{\text{dry}} = -0.02277 P_0 * (1 + 0.0026 \cos^2 \phi)$$
 - P_0 : pression au niveau de la mer en Pascal
 - Φ : latitude
- 2,3 m en moyenne: c'est la correction la plus importante
- Variabilité de quelques cm, mais lente dans le temps et dans l'espace => fournie de façon satisfaisante par des modèles météorologiques

II. Correction troposphérique sèche



Amplitude in metres of the dry troposphere correction computed from the ECMWF atmospheric pressures and model during the Jason-1 cycle 223. This map is drawn using the [Basic Radar Altimetry Toolbox](#) from the Jason-1 GDR products. A Loess filter (value of 31) is applied to obtain a fully coloured plot.

- I. Correction ionosphérique
- II. Correction troposphérique sèche
- III. Correction troposphérique humide
- IV. Correction du biais d'état de mer

III. Correction troposphérique humide

- Définition: allongement du trajet de l'onde radar du à la présence d'eau dans la troposphère
- Vapeur d'eau

$$dh_{vap} = 10^{-6} \int_0^R N_{vap}(z) dz = K \int_0^R \frac{\rho_{vap}(z)}{T(z)} dz$$

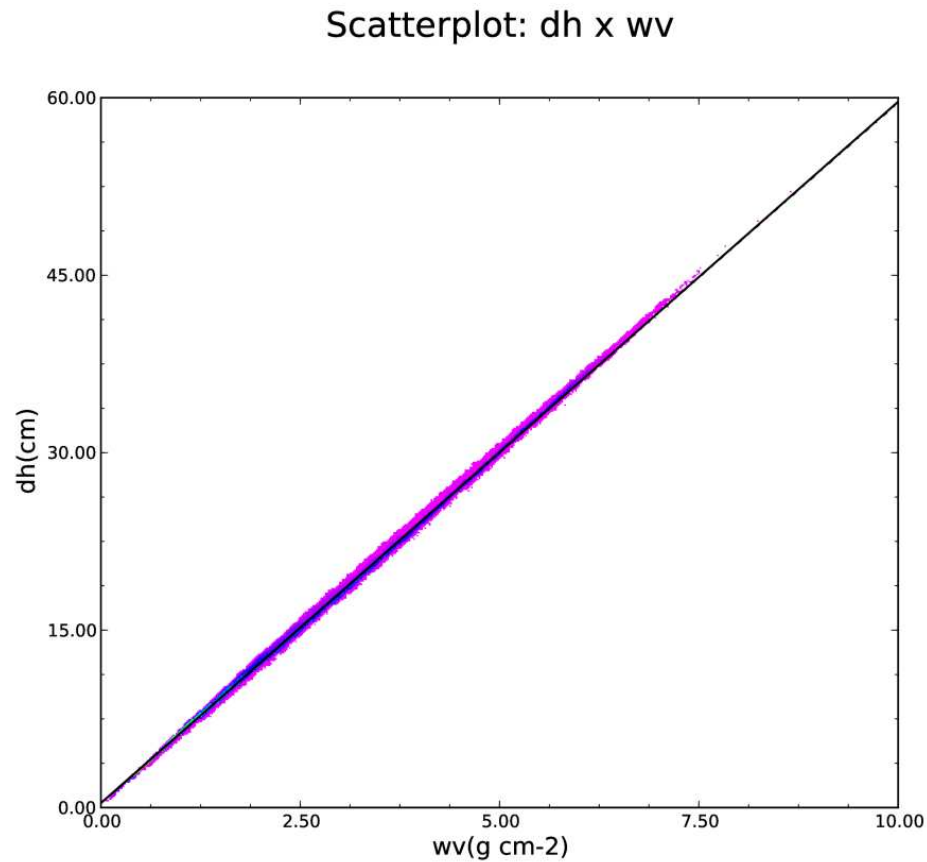
- Eau liquide nuageuse = contribution secondaire (1% du total)

$$dh_{liq} = 10^{-6} \int_0^R N_{liq}(z) dz = 1,6 L_z$$

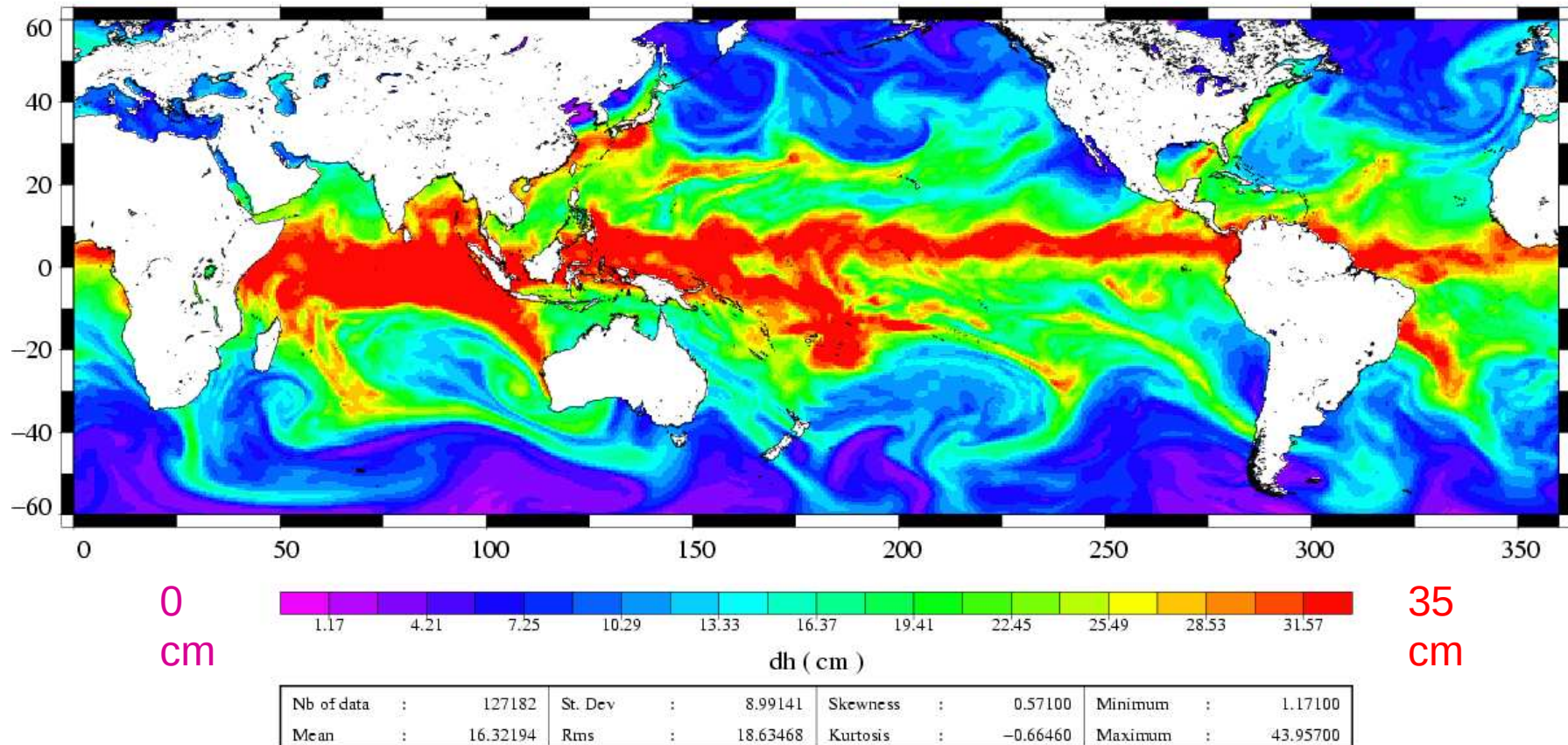
- Elle est comprise en 0 et 50 cm avec une variabilité très importante dans le temps et dans l'espace

III. Correction troposphérique humide

- Quasiment proportionnelle au contenu intégré en vapeur d'eau



III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

- La correction de troposphère humide dépend directement de la vapeur d'eau
- Elle est comprise en 0 et 50 cm avec une variabilité très importante dans le temps et dans l'espace
- Elle est indépendante de la fréquence
- Les estimations faites à partir d'un modèle météorologique sont de qualité insuffisante (résolutions spatiales et temporelles, saut de version)
- **On embarque donc sur les missions altimétriques un radiomètre micro-ondes spécifiquement dédié à cette correction**

III. Correction troposphérique humide

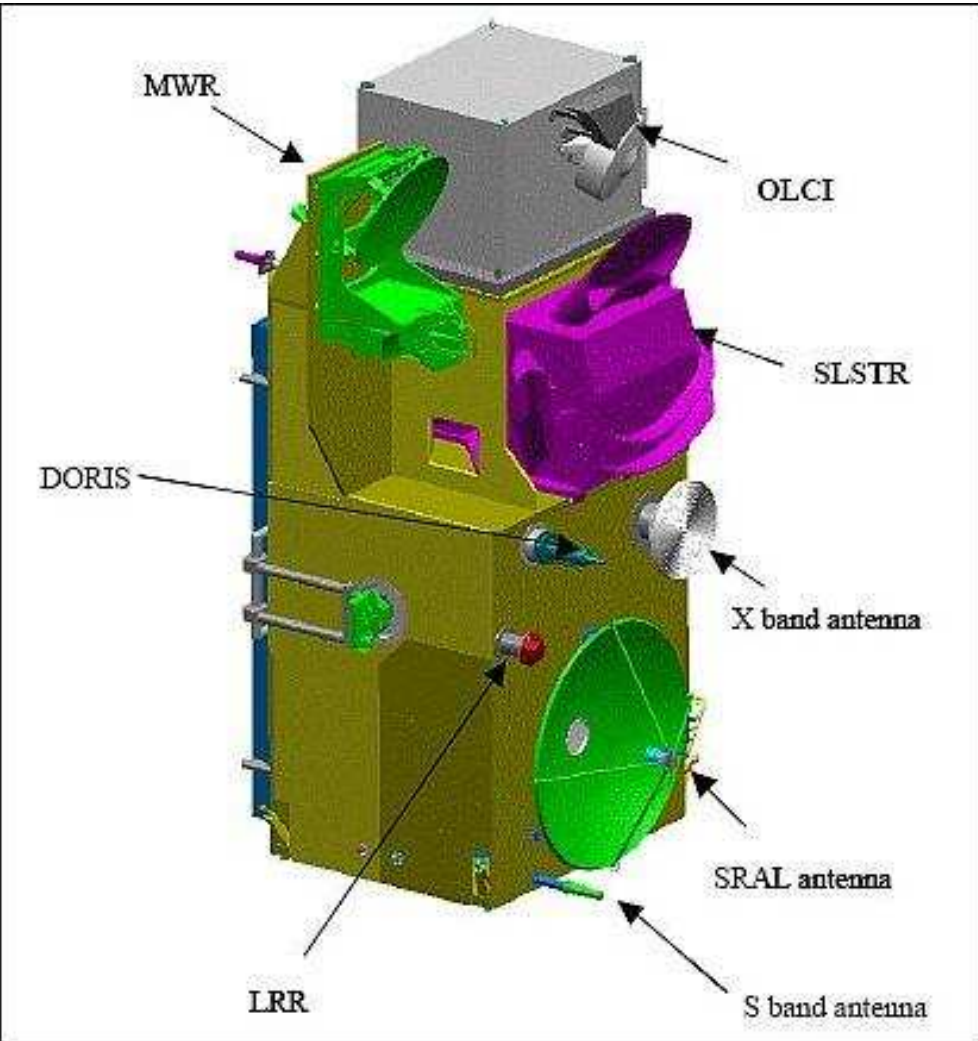
- Les radiomètres embarqués

Mission	Vie dans l'espace	Fréquences altimètre (GHz)	Fréquences Radiomètre (GHz)	Cycle (jours)
Geosat	1985-1990	13.5	-	23
ERS-1	1991-1996	13.8	23.8, 36.5	35
Topex/Poseidon	1992-2006	Topex : 13.6, 5.3 Poseidon : 13.6	18, 21, 37	10
ERS-2	1995-2011	13.8	23.8, 36.5	35
GFO	1998-2008	13.5	22, 37	17
Jason-1	2001-2013	13.575, 5.3	18.7, 23.8, 34	10
Envisat	2002-2012	13.575, 3.2	23.8, 36.5	35
Jason-2	2008-	13.575, 5.3	18.7, 23.8, 34	10
Saral/AltiKa	2012-	35.75	23.8, 37	35
Sentinel-3	2015-	13.575, 5.3	23.8, 36.5	27

humide



-



III. Correction troposphérique humide

- Radiométrie micro-ondes
 - radiometrie => mesures passives
 - Micro-ondes => fréquences entre 1 et 300 GHz = longueur d'onde centimétrique

III. Correction troposphérique humide

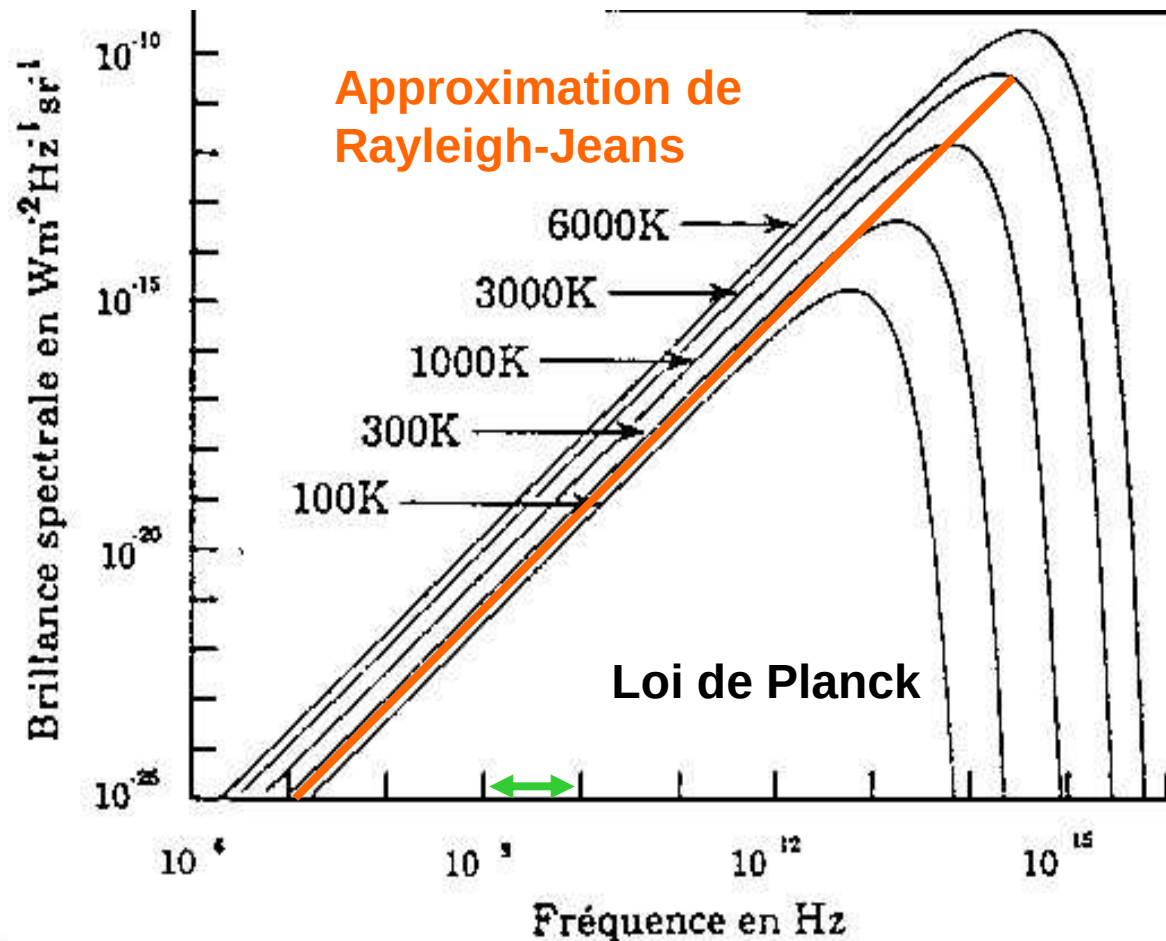
- L'énergie émise par un corps quelconque peut s'exprimer en fonction de l'énergie émise par un corps noir. Un corps noir est un objet théorique qui absorbe toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. La loi de Planck permet de déterminer la luminance d'un corps noir pour une température et une longueur d'onde données selon la relation suivante :

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

III. Correction troposphérique humide

- h constante de Planck
- k constante de Boltzmann
- T température
- c vitesse de la lumière

$$B_\nu = \frac{2\nu^2 k}{c^2} T$$



III. Correction troposphérique humide

- Température de brillance:

Le flux d'énergie émis par un corps peut également s'exprimer en termes de température de brillance. **La température de brillance d'un corps est la température d'un corps noir qui émettrait le même rayonnement que le corps considéré.** La température de brillance dans une direction et une fréquence donnée s'écrit alors:

$$TB(\theta, \Phi) = \varepsilon(\theta, \Phi) \times T$$

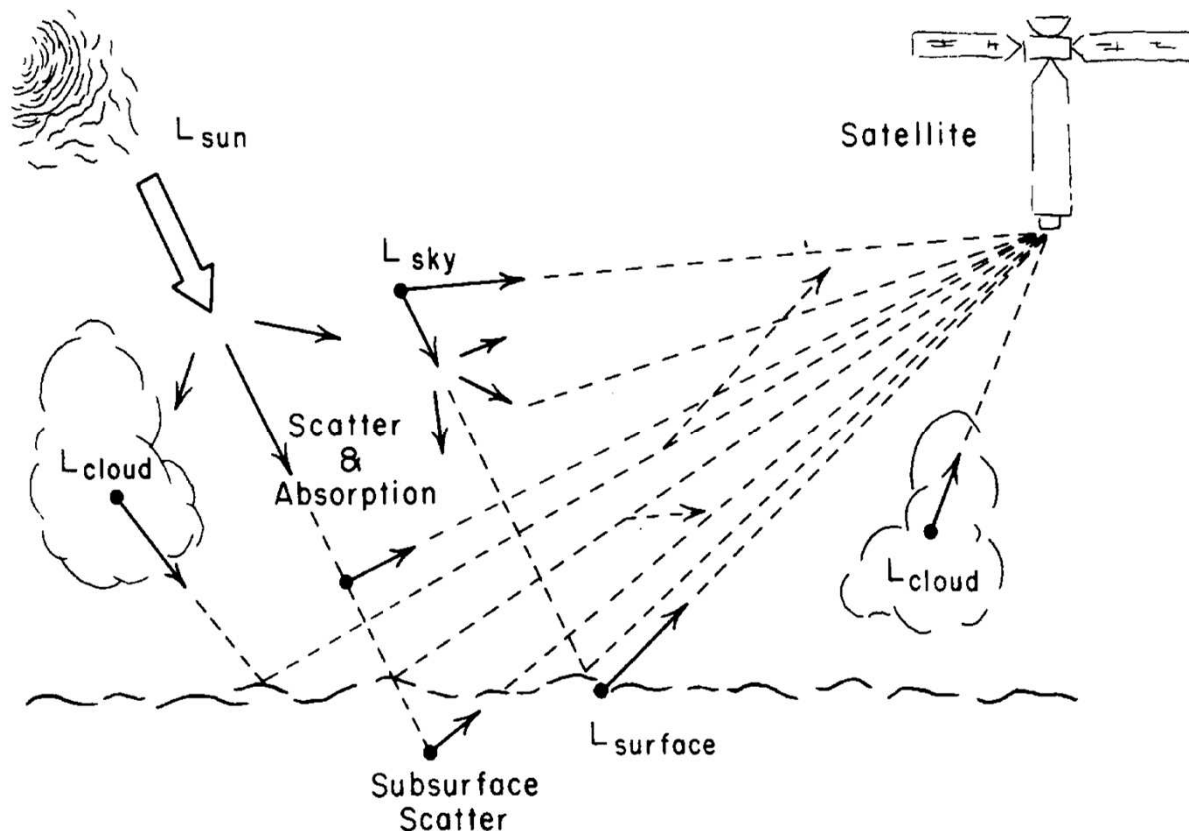
où ε est l'émissivité du corps considéré. En particulier, le corps noir réémet toute l'énergie absorbée:

$$\varepsilon(\theta, \Phi) = \frac{L_{\text{corps_réel}}}{L_{\text{corps_noir}}}$$

L'émissivité du corps noir est donc de 1 et sa température de brillance est donc égale à sa température physique.

III. Correction troposphérique humide

- Le radiomètre ne mesure pas directement la correction troposphérique humide mais la température de brillance liée aux ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par la surface des océans, modifiées lors de leur traversée de l'atmosphère.



Modèle de
transfert radiatif

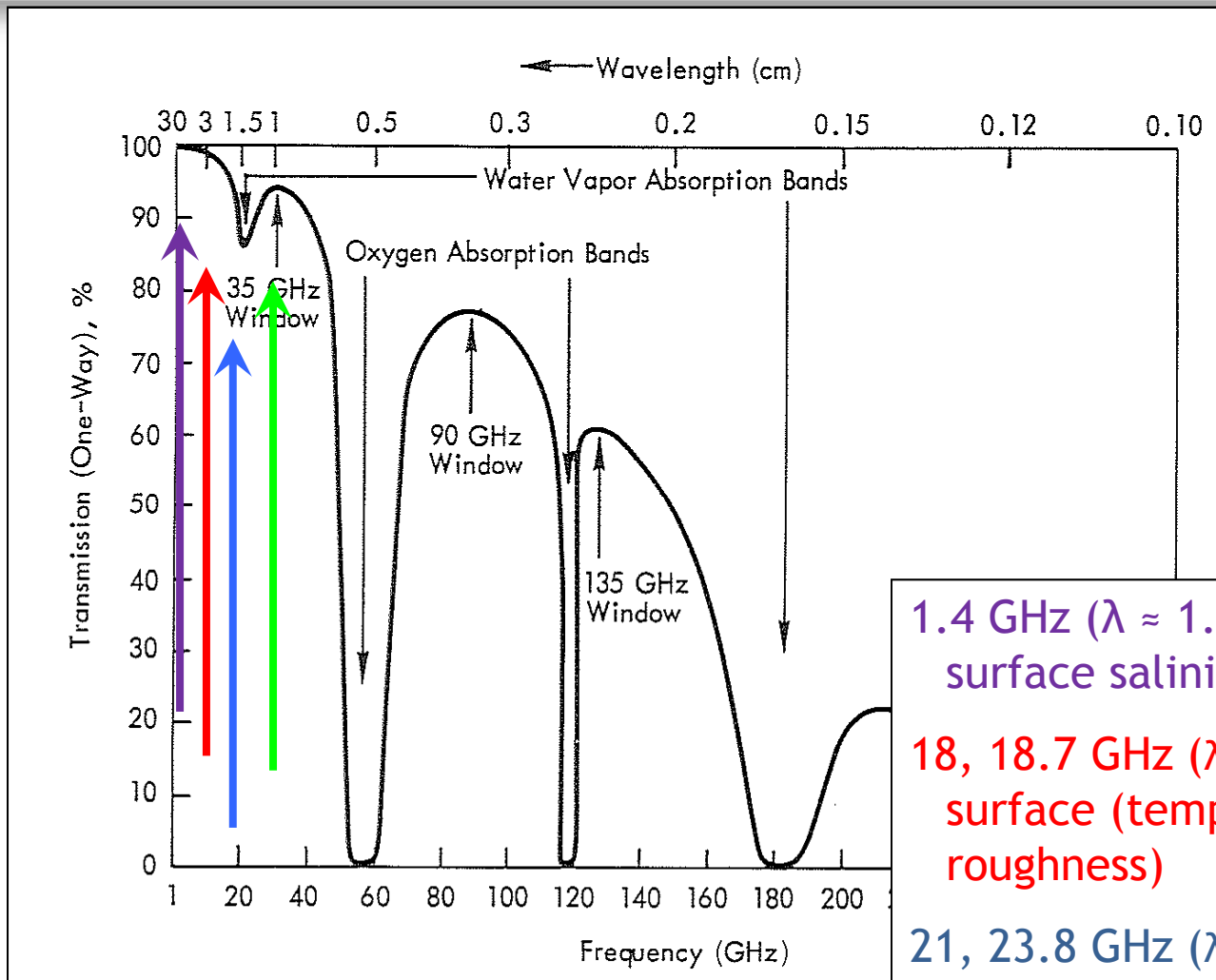
III. Correction troposphérique humide

- Equation du transfert radiatif permettant d'exprimer la relation entre les paramètres géophysiques et la température de brillance mesurée à une fréquence donnée:

$$T_B(i) = T_U(i) + T_E(i) \times e^{-\tau(i)} + T_R(i) \times e^{-\tau(i)}$$

- Chacun de ces termes dépend de variables géophysiques (vent et température de surface, vapeur d'eau, eau liquide nuageuse....)
- Ainsi, pour retrouver N paramètres géophysiques inconnus, il faut au minimum N mesures de températures de brillance à des fréquences différentes, ou pour certains problèmes, mesures de températures de brillance à des incidences ou polarisations différentes.

III. Correction troposphérique humide



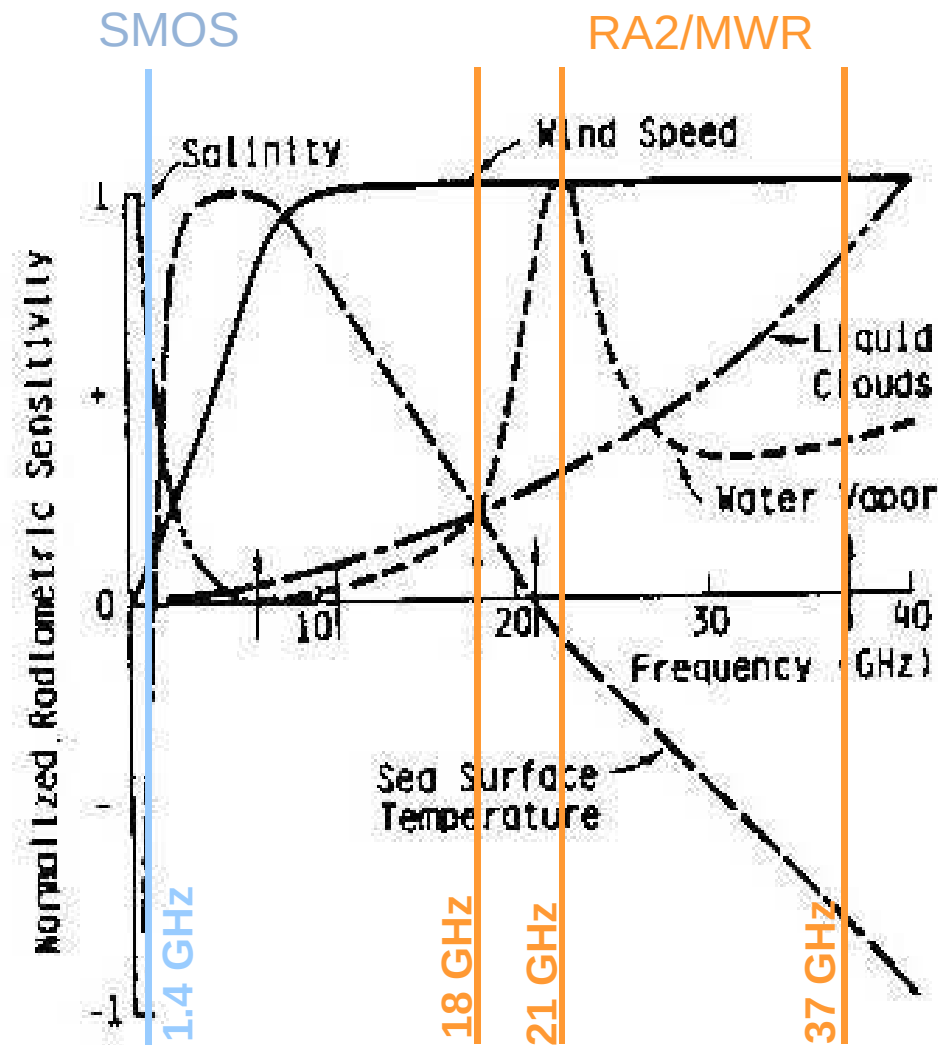
1.4 GHz ($\lambda \approx 1.6$ cm):
surface salinity

18, 18.7 GHz ($\lambda \approx 1.6$ cm) :
surface (temperature,
roughness)

21, 23.8 GHz ($\lambda \approx 1.3$ cm) :
water vapor

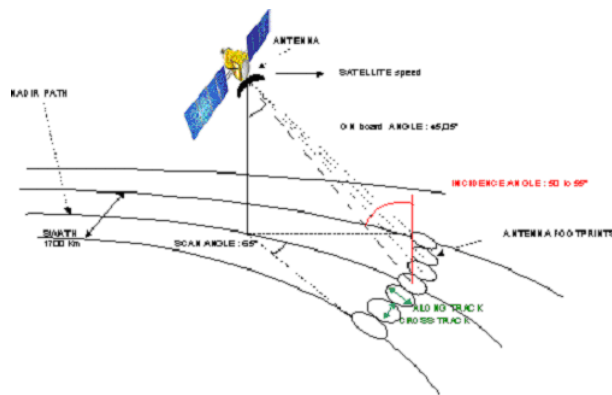
31.4, 34, 37 GHz ($\lambda \approx 0.8$
cm) cloud liquid water

III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

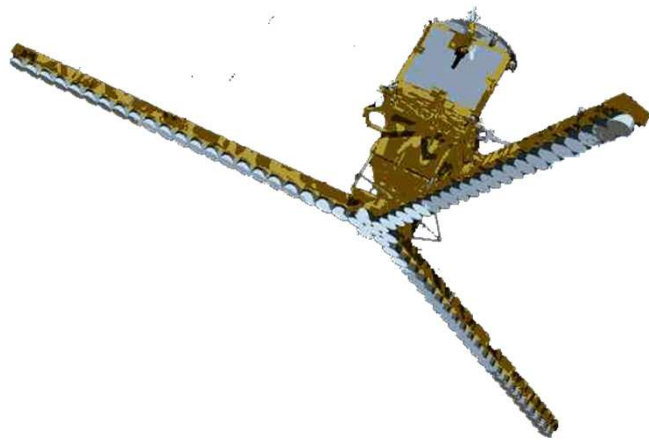
- Quelques exemples de radiomètres utilisés pour l'observation de la terre



MADRAS
Megha-Tropiques
CNES/ISRO mission

- MADRAS is a scanning radiometer
- 9 channels (H+V (except 23.8 GHz)):
 - ✓ 18.7 GHz => surface
 - ✓ 23.8 GHz => water vapor distribution
 - ✓ 36.5 GHz => cloud liquid water, rain over sea
 - ✓ 89 GHz => convective rains, all surfaces
 - ✓ 157 GHz => Ice detection in clouds

III. Correction troposphérique humide



MIRAS
SMOS
ESA mission

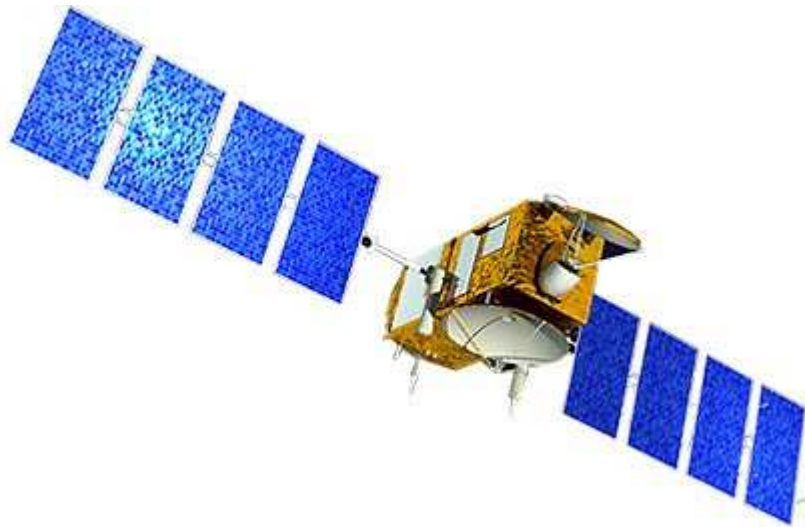
- MIRAS is an interferometric radiometer in L band (1.4 GHz)
- retrieval of soil moisture over land
- retrieval of ocean salinity over sea
- brightness temperatures deduced from correlations between the 69 antennas available

III. Correction troposphérique humide

JMR

Jason-1

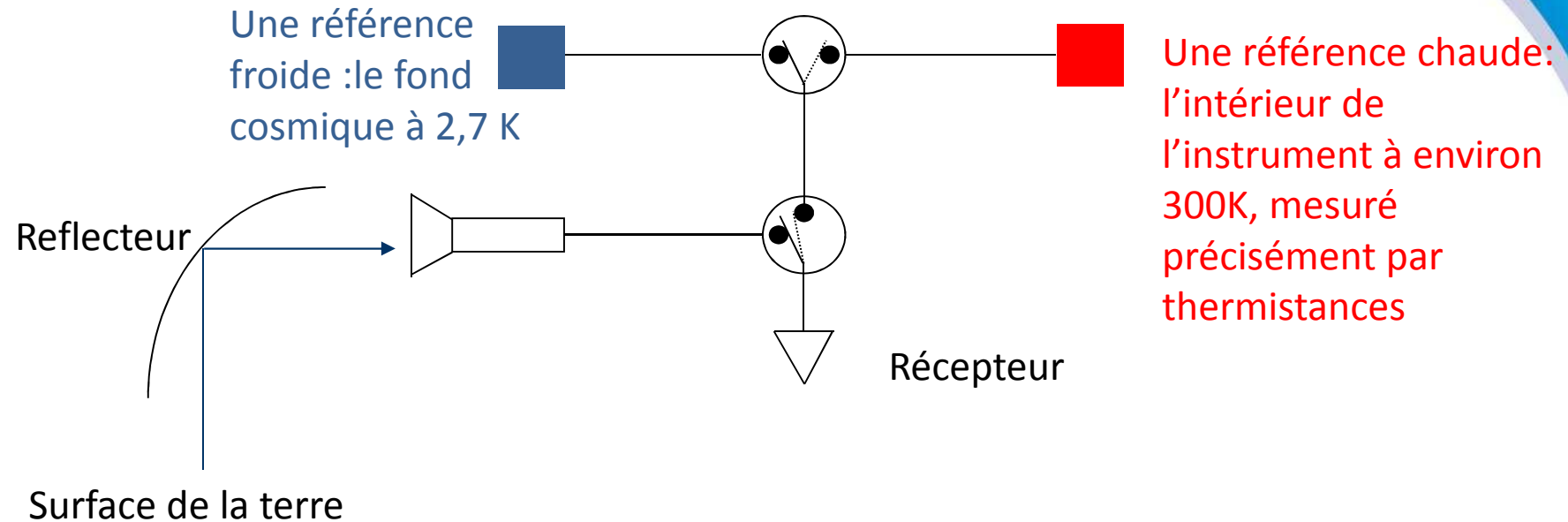
NASA/CNES mission



- Aims at correcting the altimeter range from excess delay due to water vapor in the troposphere
- 3 frequencies:
 - ✓ 18.7 GHz for surface contribution
 - ✓ 23.8 GHz for water vapor
 - ✓ 34 GHz for cloud liquid water content

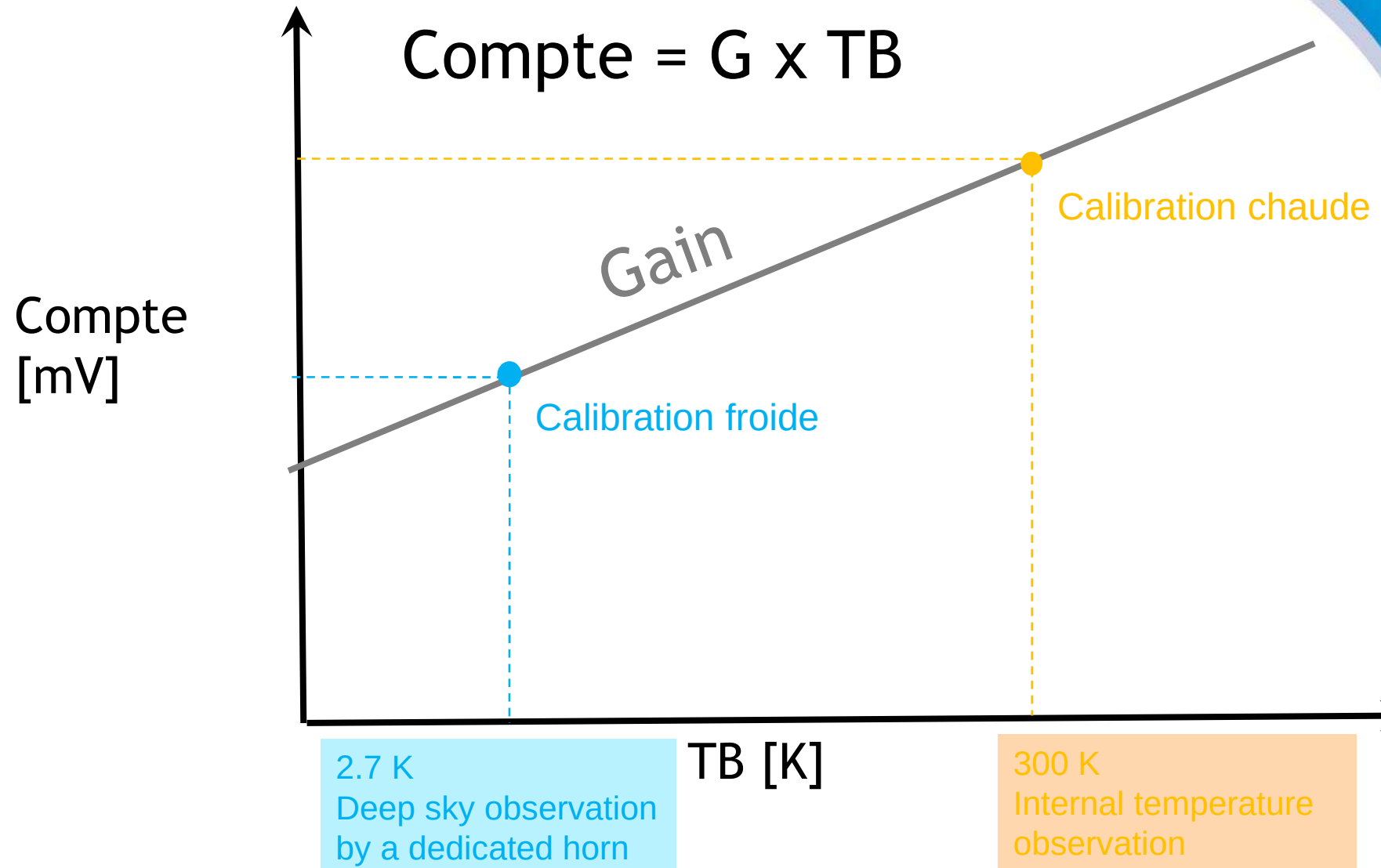
III. Correction troposphérique humide

- Principe de la mesure radiométrique



- Amplification du rayonnement naturel émergeant au sommet de l'atmosphère, signal très faible
- Nécessité d'un récepteur très stable
- Gain du système estimé régulièrement en utilisant des références chaude et froide

III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

Radiometers onboard altimetry missions

NASA/CNES/NOAA/Eumetsat missions

Topex-Poseidon/TMR
Jason-1/JMR
Jason-2/AMR

European missions

ERS-1/MWR
ERS-2/MWR
Envisat/MWR
S3/MWR

CNES/ISRO AltiKa

18 (18.7) GHz



Sea Surface



Altimeter wind
 σ_0 Ku, σ_0 Ka

21 (23.8) GHz



Water Vapor Content = dh



23.8 GHz

37 (34) GHz



Cloud Liquid Water content



36.5 (37) GHz

III. Correction troposphérique humide

- Le modèle de transfert radiatif est complexe (10000 de codes), impossible à inverser analytiquement. Comment passer des TBs mesurées à la correction troposphérique humide ?
- Détermination de la fonction $dh=f(TBs)$

1/ Méthode physique:

Simulation des TBs à l'aide du modèle de transfert radiatif à partir de paramètres géophysiques initiaux. Itérations jusqu'à convergence entre TBs simulées et mesurées. Les derniers paramètres géophysiques utilisés (dont le profil de vapeur d'eau) constituent la solution

- La plus efficace mais la plus coûteuse en CPU pour des traitements opérationnels temps réel

III. Correction troposphérique humide

- Comment passe t'on des TBs mesurées à la correction troposphérique humide ?
- Détermination de la fonction $dh=f(TBs)$

2/ Méthodes statistiques:

Une fois le radiomètre en vol, collocalisation entre les TBs mesurées et des produits de correction tropo (prévision météorologique ou radiosondages). Puis régression statistique

- Rapide et robuste mais peu précise

III. Correction troposphérique humide

3/ Méthode physico-statistique:

Une base de données géophysiques provenant de modèles ou radiosondages

- Fournie par le modèle ECMWF
- Contenant tous les paramètres de surface (vent, température, pression...) et d'atmosphère (profils de température, de pression, de vapeur d'eau et d'eau liquide nuageuse) From ECMWF analyses for ERS1/MWR, ERS2/MWR, Envisat/MWR, AltiKa, Sentinel3
- Plusieurs millions de situations géophysiques

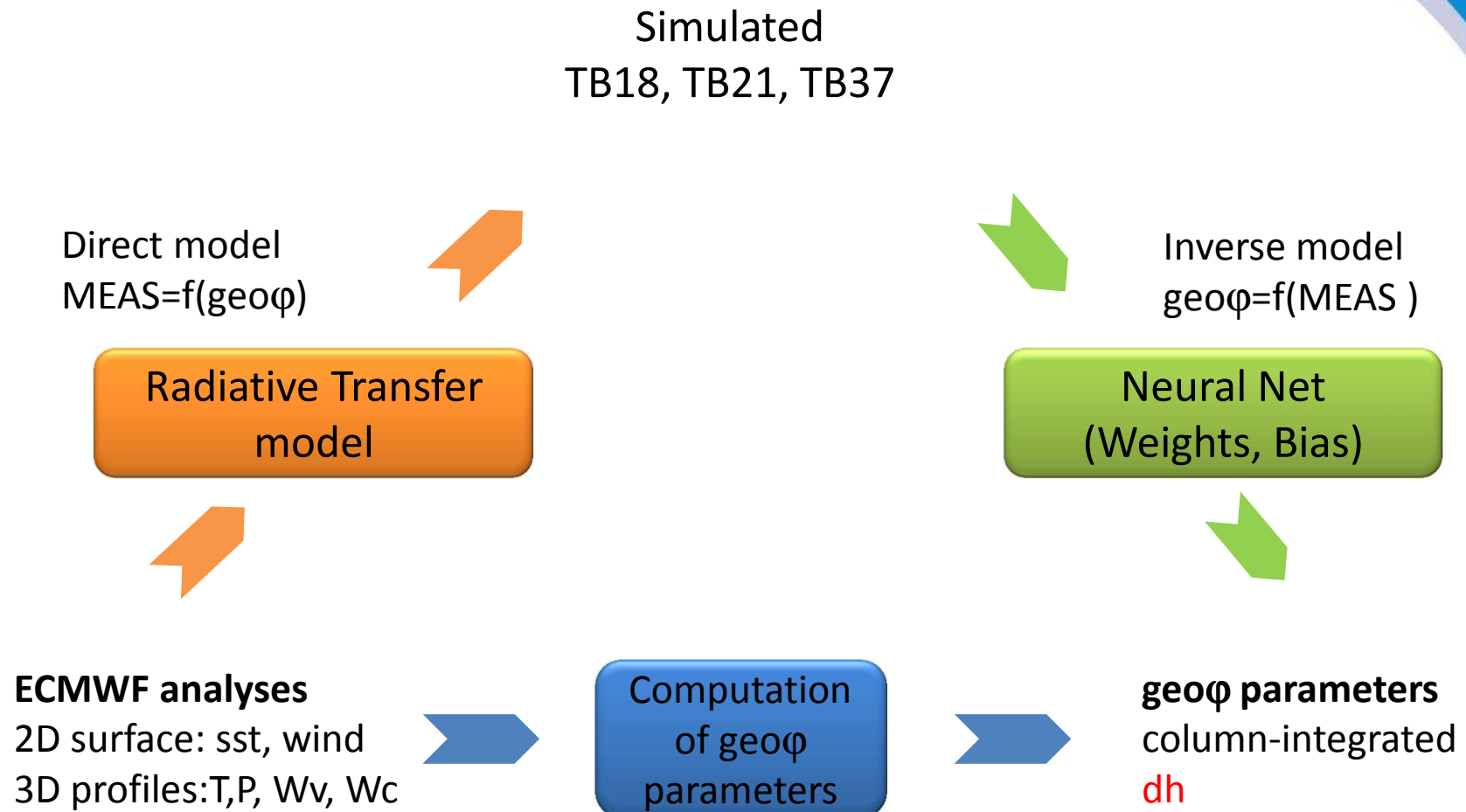
Un modèle de transfert radiatif

- Représentant toutes les interactions ondes électromagnétiques / environnement (vagues, températures, nuages, pluie, gaz atmosphériques...)
- Permettant de simuler les TBs aux fréquences/incidence voulues

Un outil de régression

- Formalisme neuronal fournissant la relation $dh = NN(TBs)$

III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

Les différentes étapes pour la formulation neuronale

- Constitution de la base d'apprentissage et de validation.
Elle doit être la plus représentative possible

- Fixer l'architecture du réseau de neurones.

On teste différentes architectures et on conserve celle qui fournit l'erreur quadratique moyenne la plus faible sur les ensembles d'apprentissage et de validation. La base de validation sert à éviter le surapprentissage et à tester la capacité du réseau à généraliser.

- Apprentissage du réseau de neurones

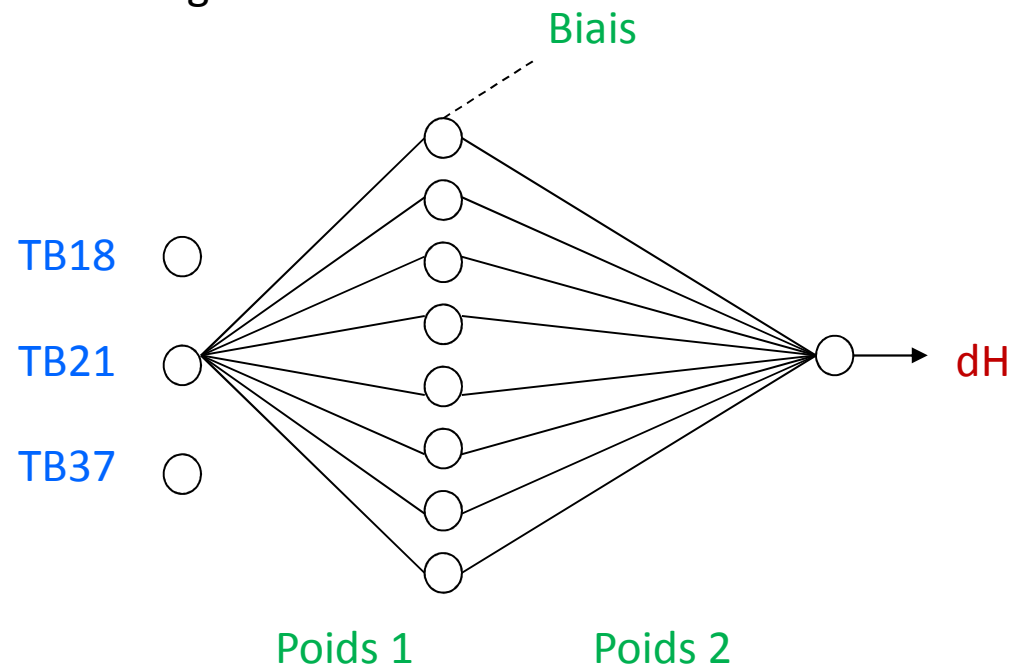
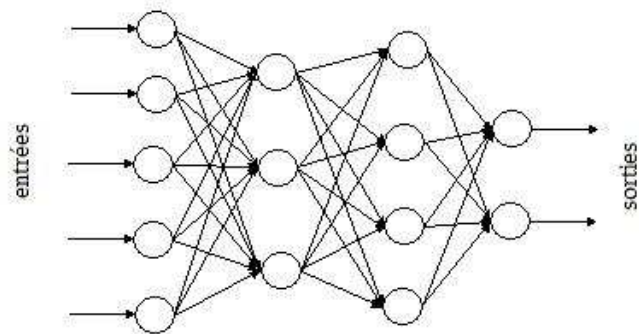
L'apprentissage est réalisé avec l'algorithme de Levenberg Marquardt (rapidité de convergence)

- Validation sur un jeu de données indépendant

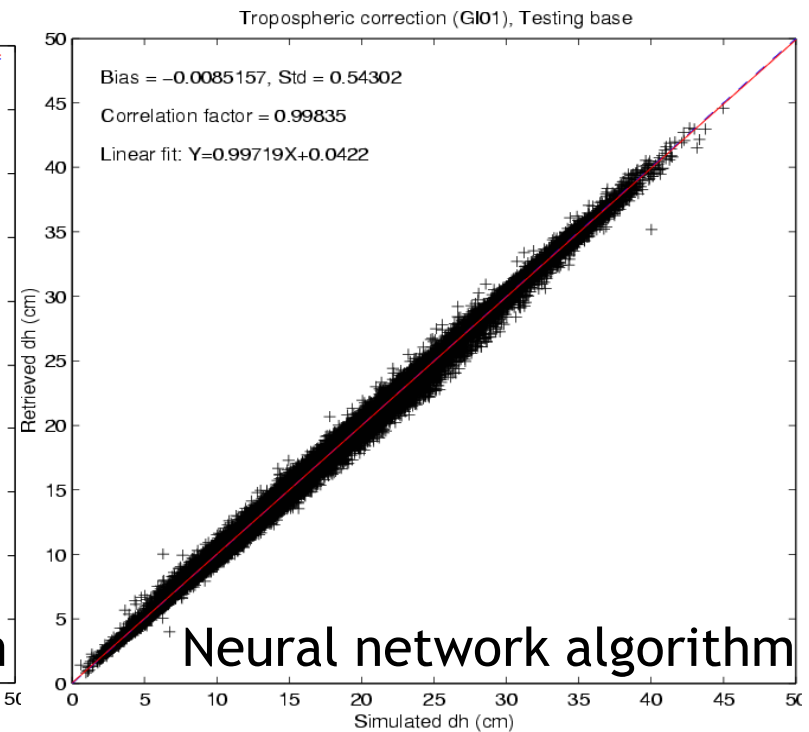
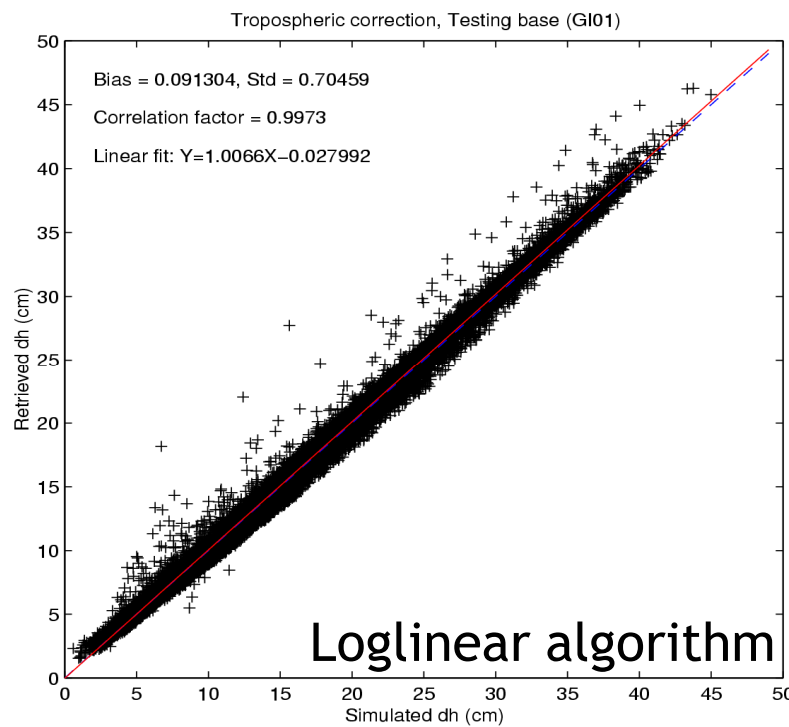
III. Correction troposphérique humide

Une architecture simple suffit pour restituer la correction troposphérique car les relations entre les paramètres ne sont pas trop complexes.

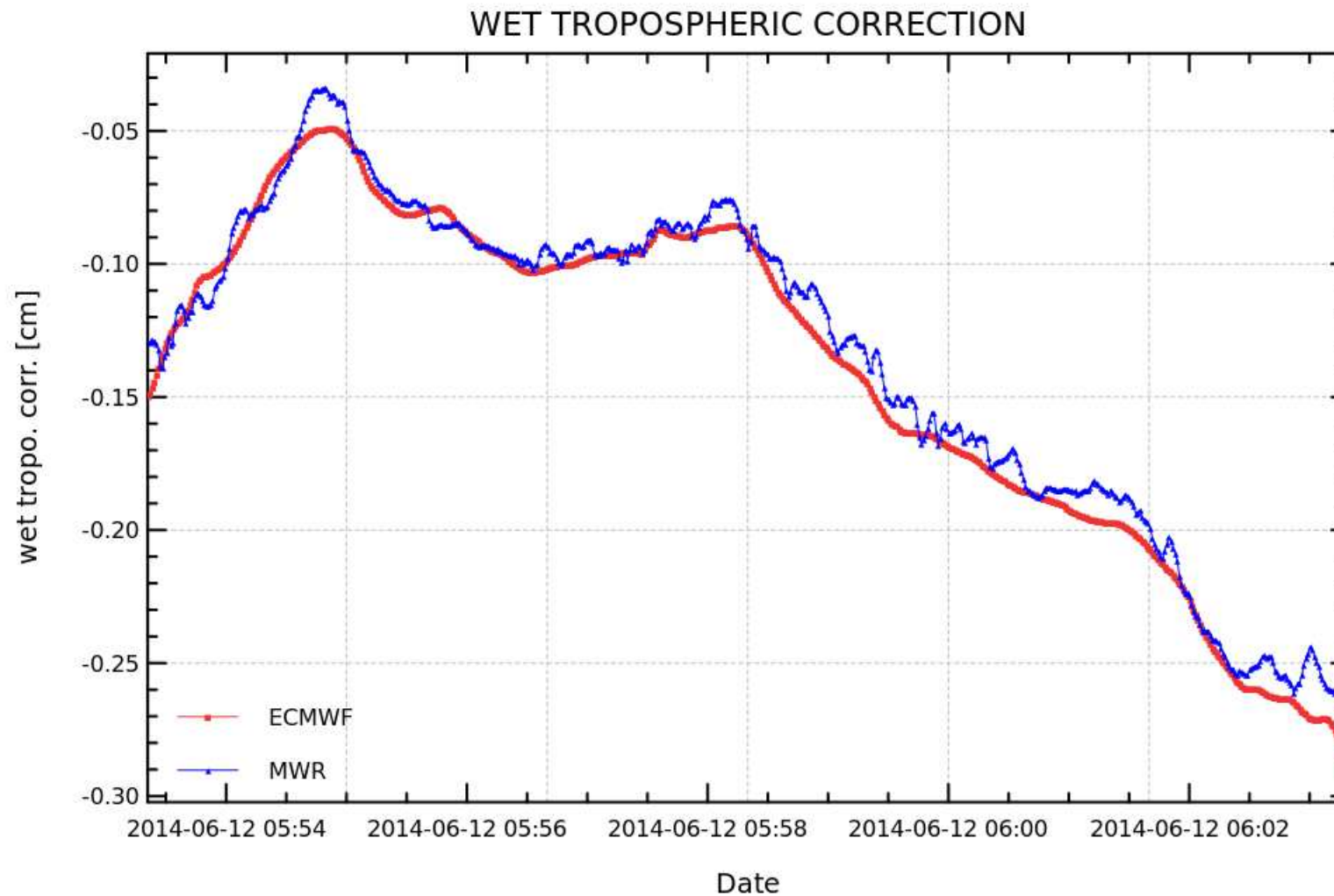
- Une seule couche cachée de 8 neurones.
- Les fonctions de transfert sont des fonctions sigmoïdes.
- Les entrées sont normalisées.



III. Correction troposphérique humide



II. Correction troposphérique sèche



III. Correction troposphérique humide

Les enjeux actuels liés à l'estimation de la correction troposphérique humide:

- 1/ La qualité des modèles de transfert radiatif
 - Incertitudes sur la forme de la raie d'absorption de la vapeur d'eau
 - Complexité de la modélisation des nuages (concentration, taille, forme des gouttes ou des cristaux)
 - Emissivité de la surface océanique: effet de la houle, modélisation des effets de l'écume
 - Emissivité des autres surfaces (surfaces continentales, glace de mer, glace continentale, surfaces mixtes, côtier...)

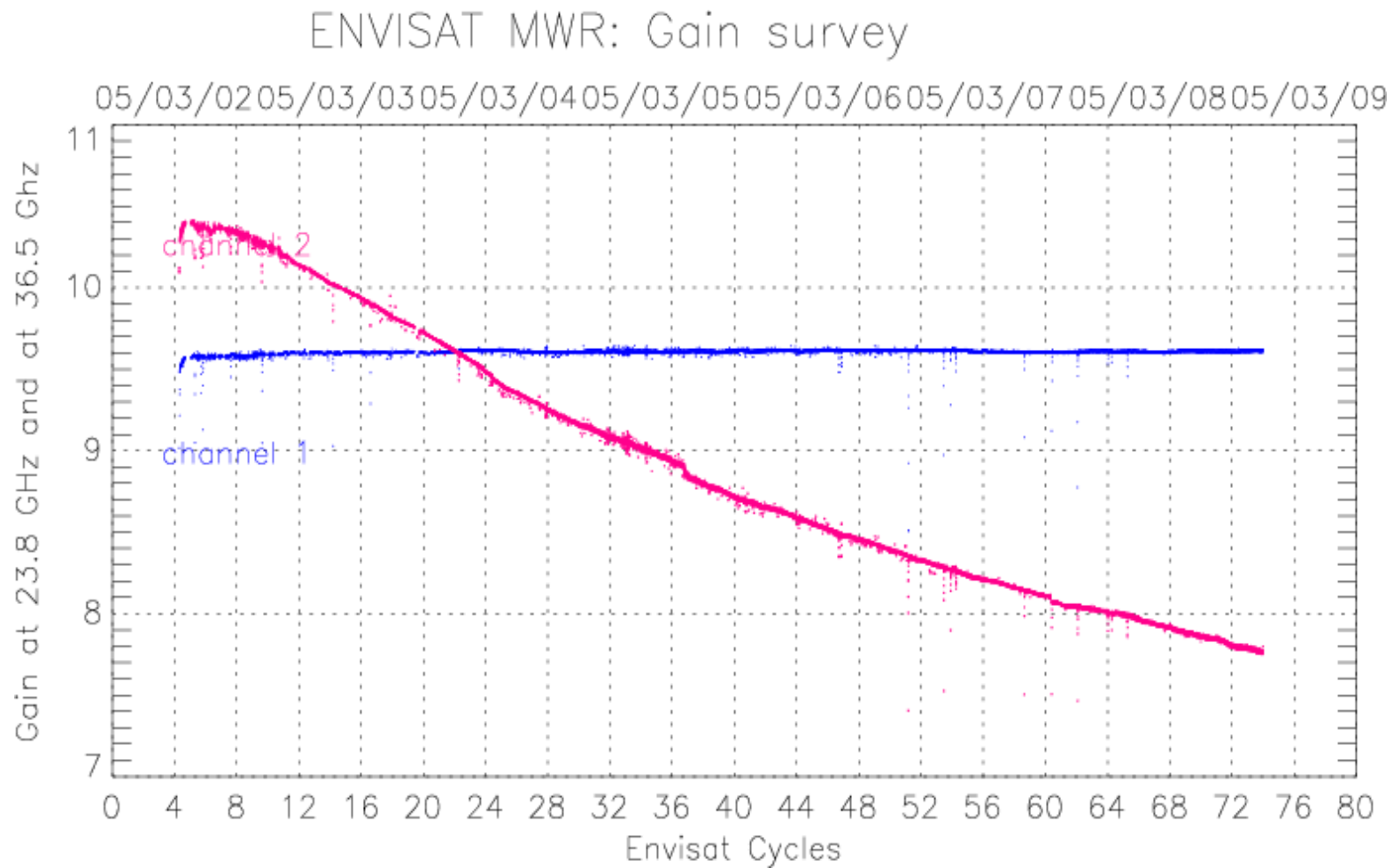
III. Correction troposphérique humide

Les enjeux actuels liés à l'estimation de la correction troposphérique humide:

- 2/ Les problèmes instrumentaux liés principalement au vieillissement des composants électroniques
 - Sur ERS2/MWR: perte d'un amplificateur 4 ans après le lancement => chute du gain de 10 dB
 - Les effets thermiques provoqués par les manœuvres satellite
 - Les dérives lentes de certains instruments (missions Topex et Envisat)

Effets parfois difficiles à détecter/quantifier/corriger

III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

Les enjeux actuels liés à l'estimation de la correction troposphérique humide:

- 3/ La calibration absolue des radiomètres
 - Il n'existe pas de référence absolue en radiométrie micro-ondes

III. Correction troposphérique humide

TBs comparison on a selected area of the Amazon rain forest (Black Body)

Mean TB (K)									
Freq	18.0	18.7	21.0	23.8	31.4	34.0	36.5	37.0	#
AmsuA	-	-	-	285.8	282.7	-	-	-	641
TMR	278.6	-	278.1	-	-	-	-	277.6	2160
JMR	-	283.5	-	283.4	-	280.2	-	-	227
SSM/I	-	284.2	-	283.4	-	280.5	-	-	14564
ERS-2	-	-	-	285.7	-	-	291.9	-	3937

TMR too low
at each frequency

Very good agreement
at 23.8 GHz

ERS2 too high
at 36.5 GHz

(Eymard et al, 2005)

III. Correction troposphérique humide

- 4/ L'estimation de la correction troposphérique humide sur les surfaces autres qu'océaniques
 - Les algorithmes utilisés sont basés sur la modélisation de l'émissivité de la surface de la mer => modèle assez simple fonction du vent fourni par l'altimètre
 - Mais au-dessus des autres surfaces

GLACE / BASSINS HYDROLOGIQUES / COTIER ??

III. Correction troposphérique humide

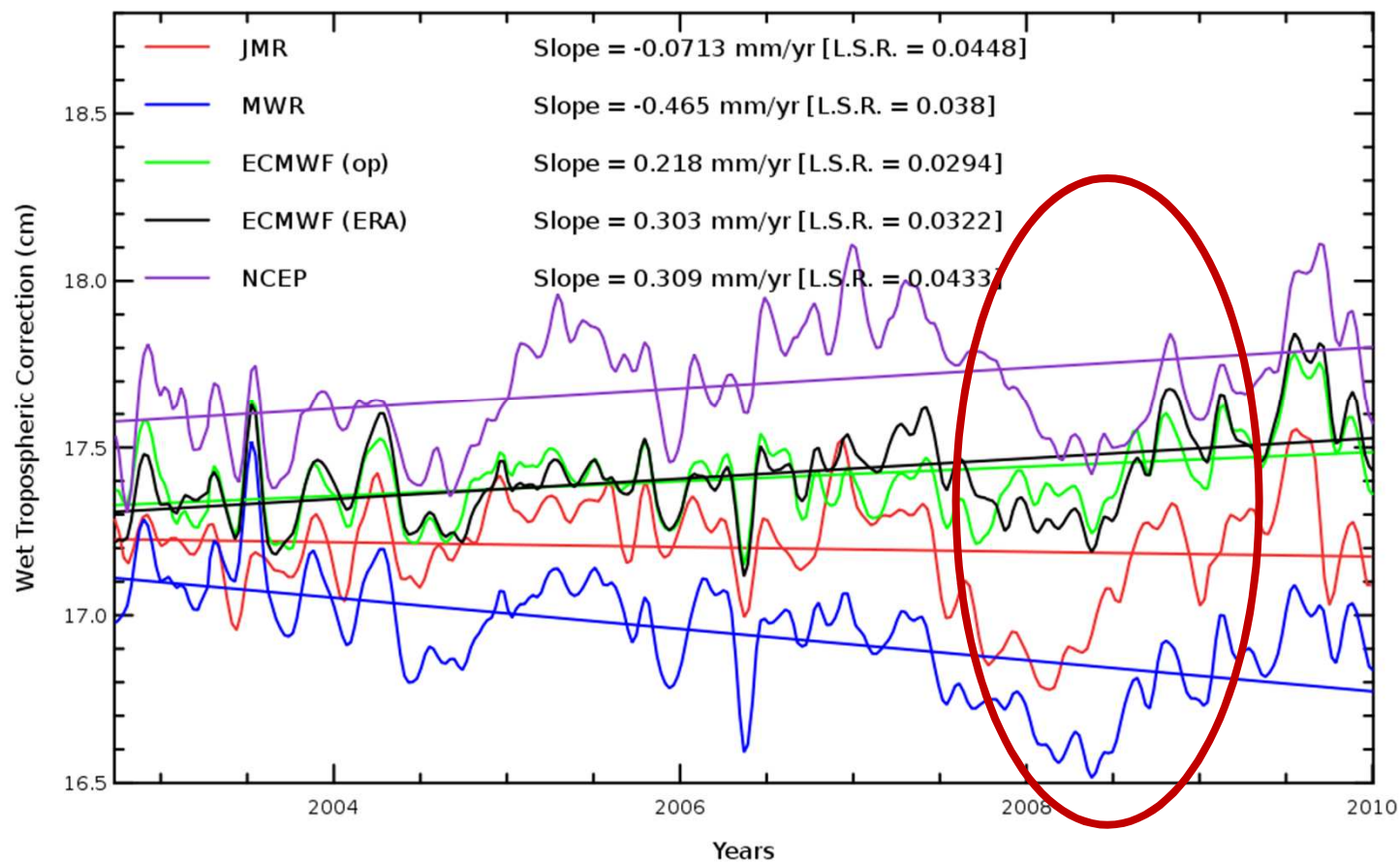
- 5/ l'enjeu lié au climat et au suivi du niveau moyen des mers (thèse en cours)

- première source d'erreur dans l'estimation de l'élévation du niveau des mers : 0.3 mm/an sur une élévation globale de 3mm/an
- stabilité de la correction mise en cause par la stabilité des instruments
- difficulté à détecter et quantifier ces dérives qui peuvent être confondues avec les variations naturelles de la vapeur d'eau atmosphérique (variabilité interannuelle, cycle saisonnier...)
- Risque important d'interpréter des variations naturelles comme des dérives instrumentales qu'on corrigera à tort ou inversement

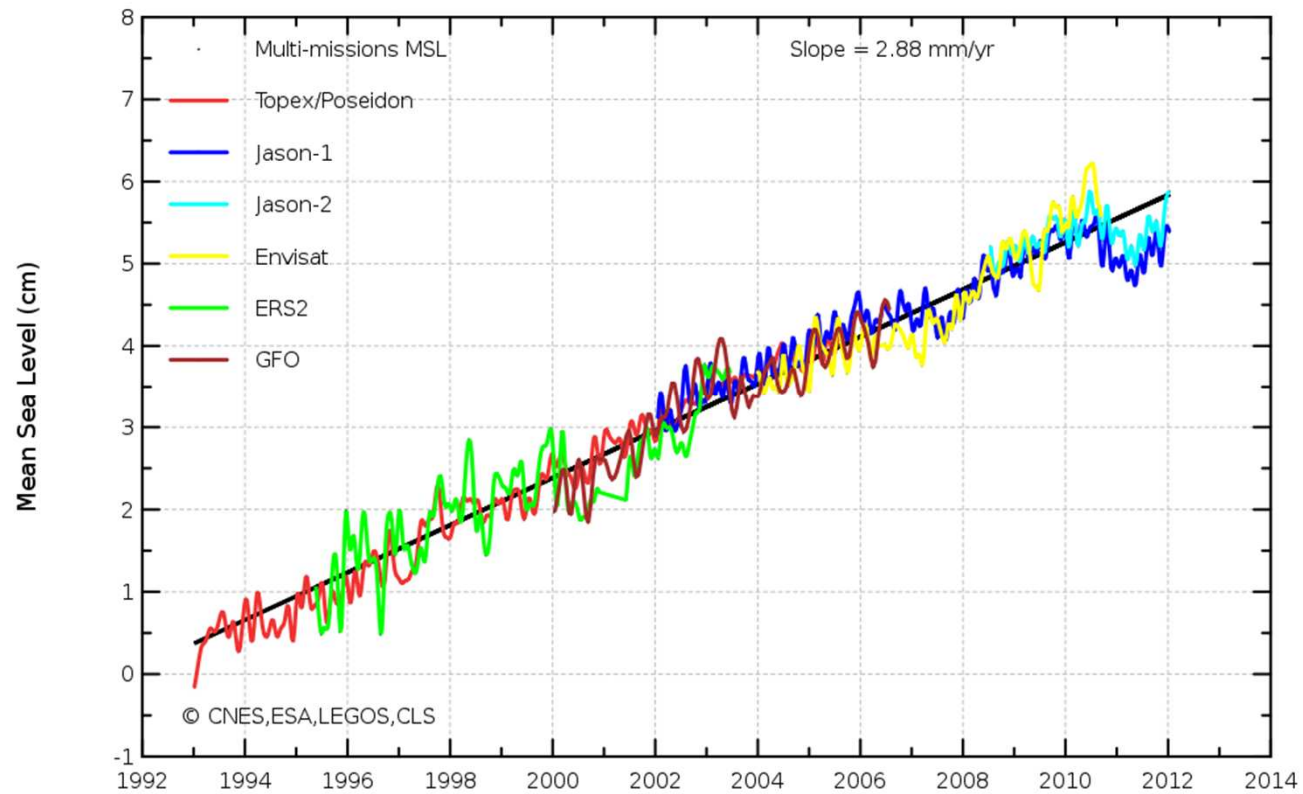
Toute erreur sur la correction troposphérique humide induit la même erreur sur le niveau des mers

III. Correction troposphérique humide

2008 drying-up associated to La Nina not represented with ECMWF/ERA models



III. Correction troposphérique humide



III. Correction troposphérique humide

- 6/ Et les estimations modèle alors ? Ou a-t-on encore besoin des radiomètres ?

- modèle ECMWF: résolution spatiale et temporelle insuffisantes
- Sauts liés à l'assimilation de nouvelles données et à des évolutions dans les schémas d'assimilation

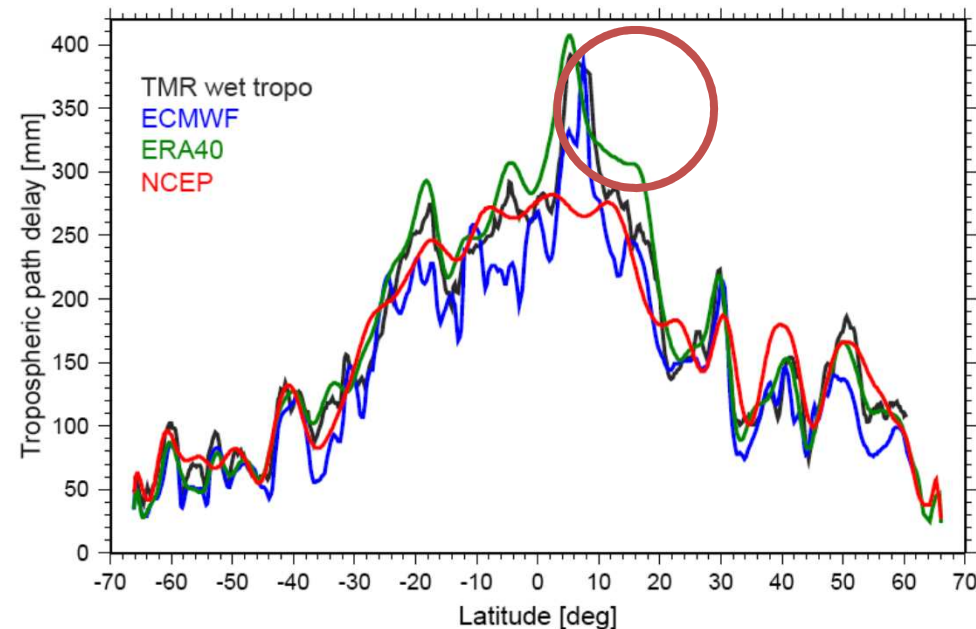


Figure 5. Comparison of the wet tropospheric path delay as measured by TMR (grey) with model results from the ECMWF operational analysis (ECMWF, blue), ECMWF 40-year re-analysis (ERA40, green) and the NCEP/NCAR re-analysis (NCEP, red).

Altimétrie spatiale

IV. Correction du biais d'état de mer

Sea State Bias

*N. Tran, L. Amarouche, P. Dubois, S. Labroue (CLS)
D. Vandemark (UNH)*

Introduction

	Error budget	Specifications			Error (<10 days)			GOAL
		OGDR	IGDR	GDR	OGDR	IGDR	GDR	
Parameters and corrections for raw sea surface height	Altimeter range	>1.7 cm ^{a,b,c}			>1.6 - 1.7 cm			1.5 cm ^{a,b,c}
	Ionosphere	1 cm ^{d,e}	0.5 cm ^{d,c}		>1 cm ^f / >0.2 cm ^g			0.5 cm ^{d,c}
	Sea State Bias	3.5 cm	2 cm		>0.4 cm			1 cm
	Dry troposphere	1 cm	0.7 cm		0.4-0.7 cm	0.3-0.7 cm		0.7 cm
	Wet troposphere	1.2 cm			>0.2 cm			1 cm
	Rms Orbit (radial component)	10 cm ^h	2.5 cm	1.5 cm	>3.7 cm	>1.7 cm	>1.0 cm	1.5 cm
Altimeter parameters	Significant wave height	10% or 50 cm	10% or 50 cm ^f		13 cm			5% or 25 cm ^f
	Wind speed	1.6 m/s	1.5 m/s		1 m/s			1.5 m/s
	Sigma0 (absolute)	0.7 dB			0.11 dB			0.5 dB
Raw sea surface height		11 cm ^h	3.9 cm ^A	3.4 cm ^A	> 4.2 cm ^A / -	> 2.6 cm ^A - 2.8 cm ^B	>2.1 cm ^A - 2.4 cm ^B	2.5 cm ^A
Final sea surface height		?	?	?	< 5.0 cm ⁱ	< 4.1 cm ^C	< 4.0 cm ^C	

a Ku-band after ground retracking
b Averaged over 1 sec
c Assuming 320 MHz C-bandwidth
d filtered over 100 km

e real time doris onboard ephemeris
f whichever is greater
h non filtered value
i filtered over 300 km

A Computed with $\sqrt{2} \sigma$. Assuming that errors in the table are uncorrelated (which is not the case).
B from formation flight phase (jason-1/ Jason-2)
C from cross-over computations of jason-2 data

Global Jason-2 error budget for time-scales < 10 days

From (http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/OSTST/2012/Philipps_jason2_global_error.pdf)

Contents



- ❖ Origin and issues of the modelling of the sea state bias
- ❖ Calibration of the geophysical parameters and empirical models
- ❖ Frequency dependence and ionosphérique correction

What do we mean by “sea state bias” ?

- ❖ Ocean surface waves induce a range bias in altimeter retrieved sea surface height (SSH), because “real” waves have peaky crests and flat troughs along with non-uniform distribution of surface rugosities
- ❖ This error or Sea State Bias (SSB) has to be modeled and removed for accurate altimetry measurement.
- ❖ It includes:

$$\text{SSB} = \text{Electromagnetic Bias} + \text{Skewness Bias} + \text{Processing Bias}$$

Due to:

- **Hydrodynamic modulation** : correlation of short waves slopes with long waves heights
- **Tilt modulation** : correlation of long waves slopes with long waves heights

They lead to:

- wave troughs are better radar reflectors than crests at nadir
- **mean scattering level below mean sea level** (bias towards troughs)

Due to:

- **Long waves height third order moment**

They lead to:

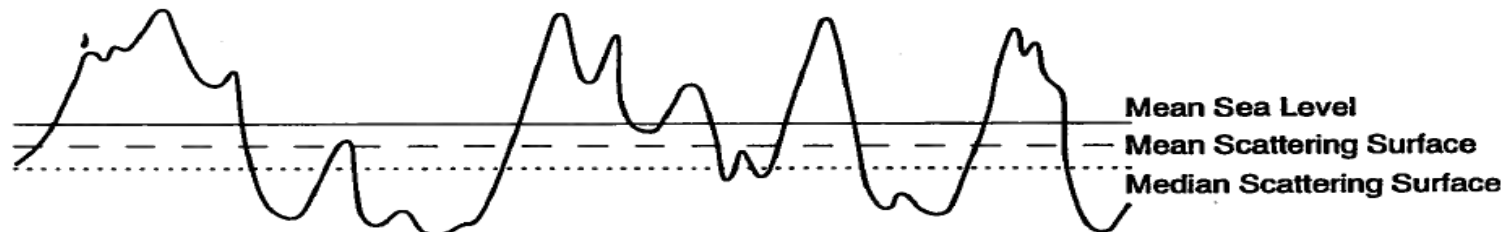
- **median scattering level below mean scattering level** (bias towards troughs again)

Due to:

- **Any other bias not related directly to the surface but displaying geographical correlations with the sea state**

They lead to:

- **Additional errors**



Theoretical evaluation

The SSB can be then expressed as the mean of the sea surface heights ponderated by sigma0.

$$SSB = \frac{\langle \sigma_0 \xi \rangle}{\langle \sigma_0 \rangle}$$

Using a two-scale scheme, the mean backscatter can be expressed as:

$$\langle \xi \sigma_0 \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi \sigma_0(mss_x, mss_y, \xi, \xi_x, \xi_y) pdf(\xi, \xi_x, \xi_y) d\xi d\xi_x d\xi_y$$

σ_0 depends on $\xi \Rightarrow$
Hydrodynamic
modulation

Higher order moment
on ξ ditribution $\Rightarrow$
Skewness Bias

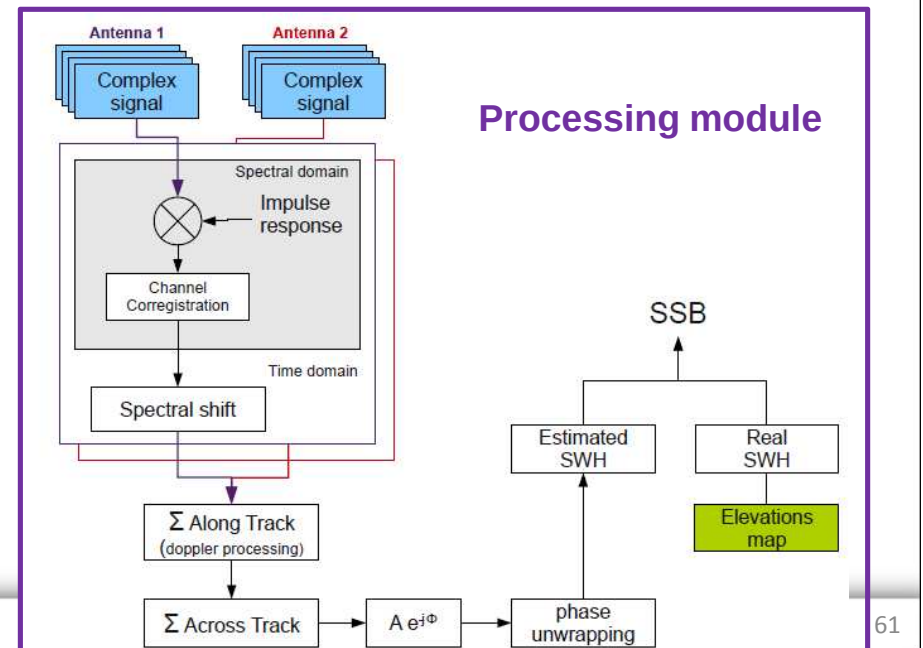
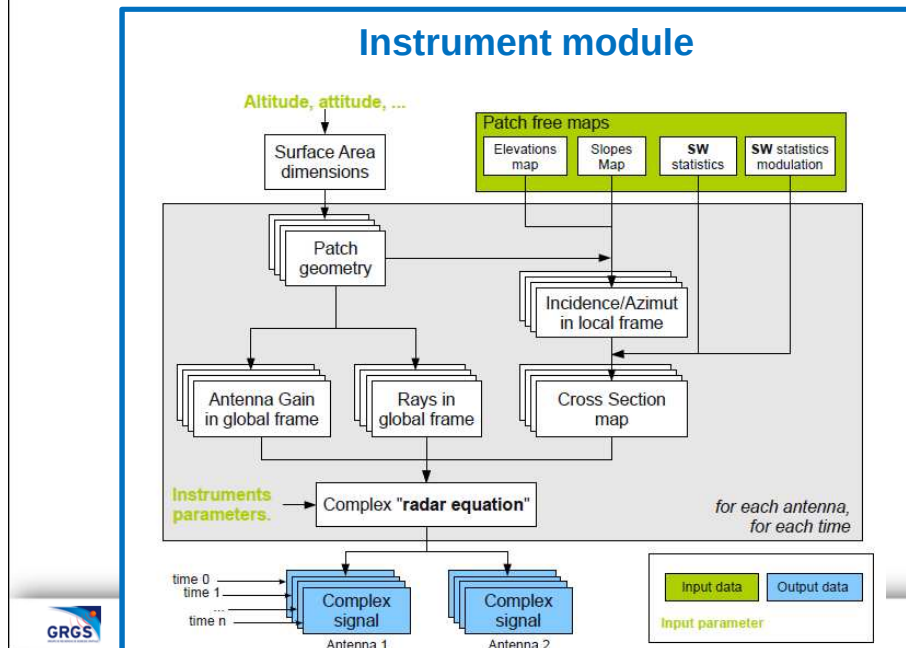
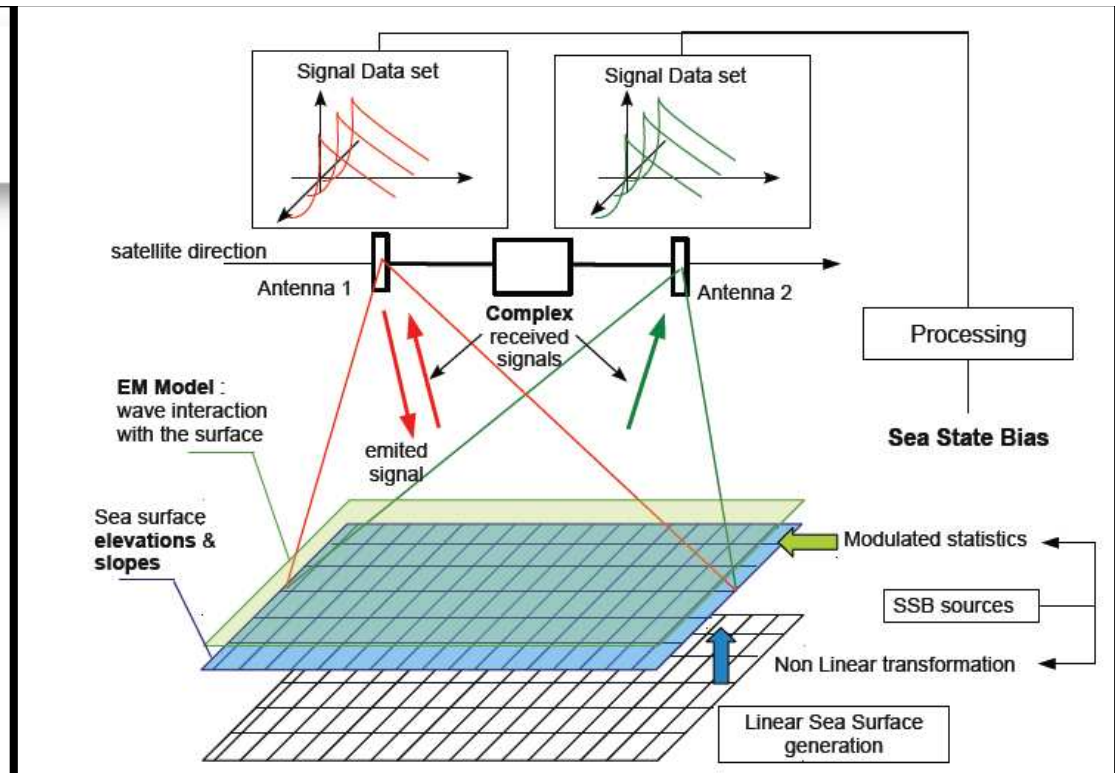
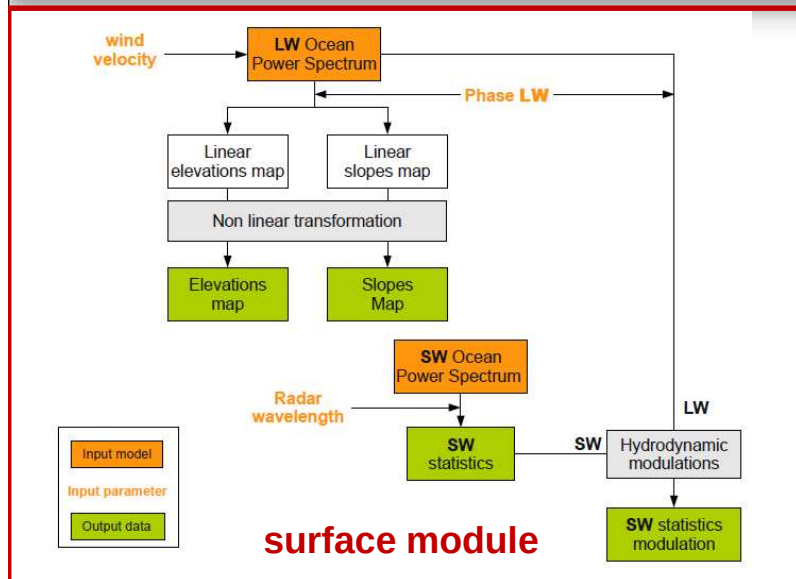
Long waves heights and slopes are
correlated $\Rightarrow$ Tilt Modulation Bias

$$pdf(\xi, \xi_x, \xi_y) \neq pdf(\xi) pdf(\xi_x, \xi_y)$$

Limitations and usefulness of theoretical solutions

- ❖ There is no reliable theoretical model for SSB available for operational use despite numerous efforts because:
 - such model depends on sea surface parameters not measured by altimeter (spectral peak period, spectral width parameter, peak amplitude, fetch, wave age, ...) and unavailable from numerical wave model
 - such parameters are required everywhere to support point-by-point SSB correction
 - there is insufficient observational information on the space and time characteristics of the non-linear sea surface at the wave scales that are involved in the sea state bias
- ❖ However, theoretical activities on SSB using simulation tools are helpful to evaluate new instrument concepts such as for example: SAR Doppler and wide swath interferometric altimeters, in terms of scientific requirements fulfillment from anticipated knowledge of the SSB behavior

Simulations principles for SWOT (for example)



Empirical determination

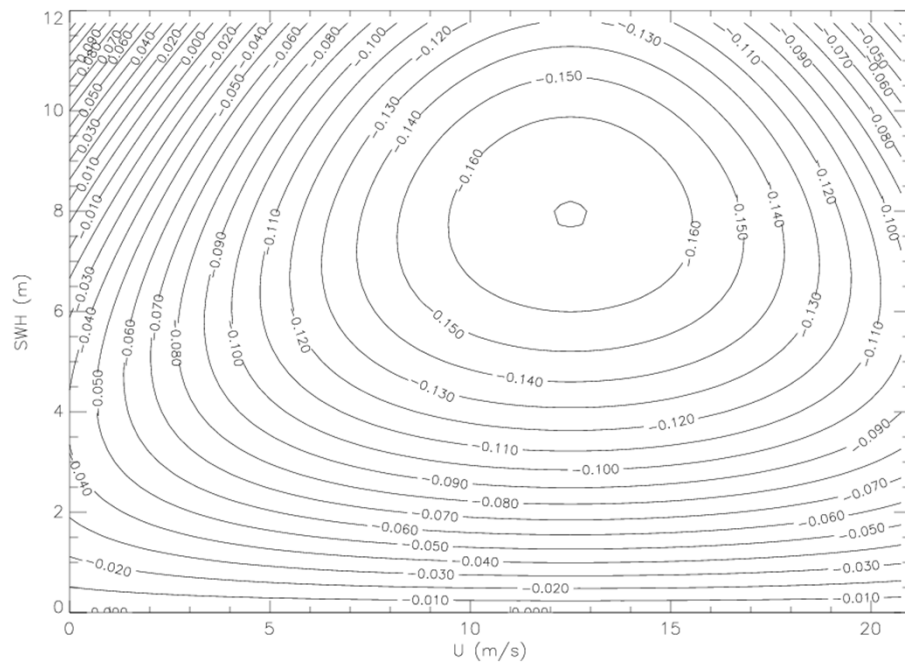
- ❖ Accurate SSB correction is critically important for ocean circulation: it may introduce systematic regional errors in Mean Sea Level linked to wind/wave climate
- ❖ To date, SSB operational correction models are developed using empirical relationships between repeat pass altimeter sea surface height (SSH) measurement differences, wind speed (U), and significant wave height (SWH) measurements
- ❖ Use of time difference (3-10 days) of SSH uncorrected for SSB, SWH and U and a large dataset to cancel/average out all other effects and leave out the SSB residual (signal part correlated with SWH and U variations)

$$\Delta\text{SSH (cm)} = \Delta\text{SSB} + \cancel{\sigma}^0 \longrightarrow \text{SSB (X)} \approx 1\text{-}5\% \text{ SWH}$$
$$\mathbf{X} = (\text{SWH}, U)$$

Issues and error sources in solving for SSB

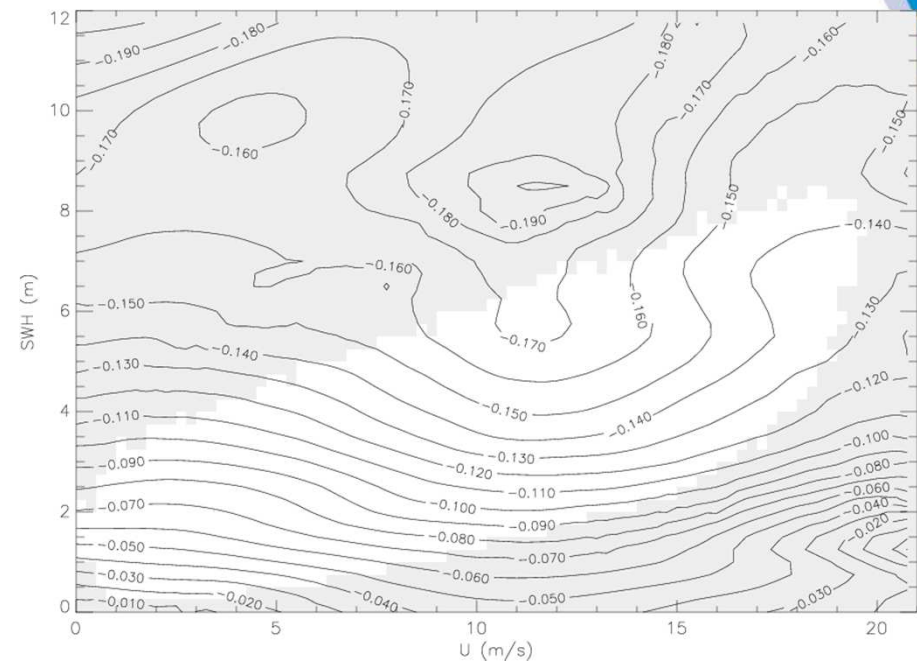
- ❖ Fitting SSB to SWH and U commonly
 - X imposed by pragmatic choice / availability
 - Inherent dependence between range, SWH, U from retracking of waveforms
 - Stability and quality of input SWH and U are first-order issues
- ❖ Statistical methods for solving SSB
 - Polynomials models (3 or 4 terms) – limitation to reproduce the dependences on X
 - Non-parametric solutions (NP: linear local kernel, splines)
- ❖ Geophysical error due to choice of X
 - wave age, long wave slope variance, mean period, swell height, ...
- ❖ Does σ tend to 0?
 - this error term holds correction terms such as orbits, HF barotropic, ionosphere, tides, ...
 - potentially geographically correlated errors with sea state
 - tested when new version available to check impact on SSB solution
- ❖ Lack of independent ground truth for error estimation and validation
 - performances evaluated in term of variance reduction
- ❖ Some illustrations in next slides

Parametric vs Non-Parametric (NP) models



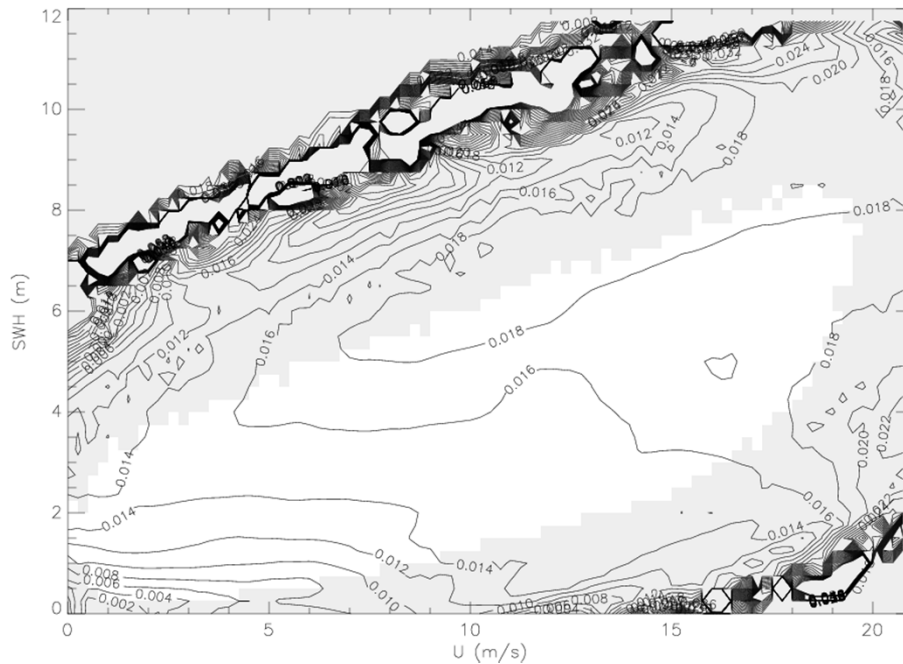
TOPEX BM4 (from Gaspar et al. 1994)

$$a*SWH + b*SWH*U + c*SWH*U^2 = d*SWH^2$$

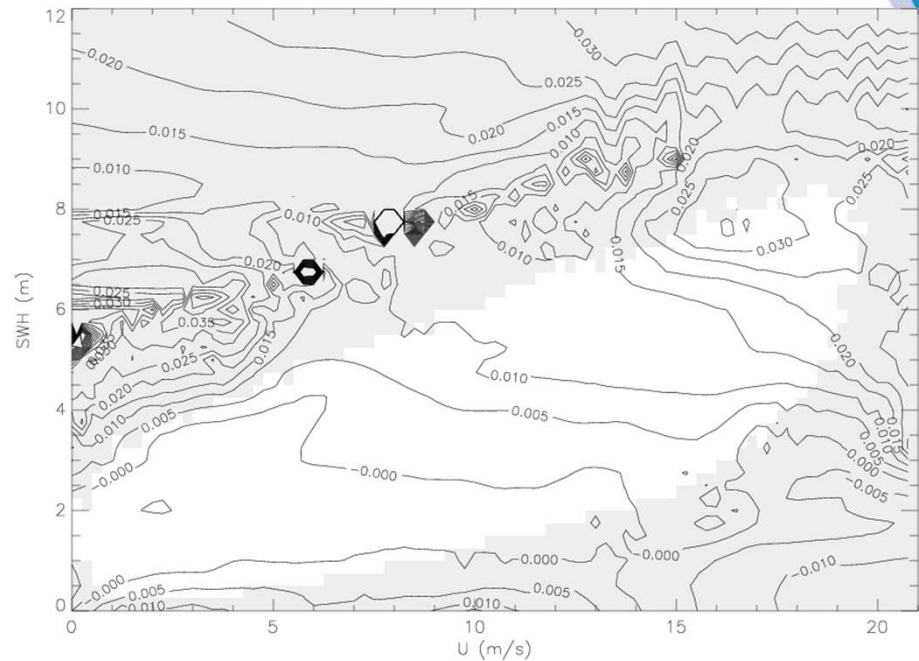


TOPEX NP

SSH data accuracy – Impact on SSB



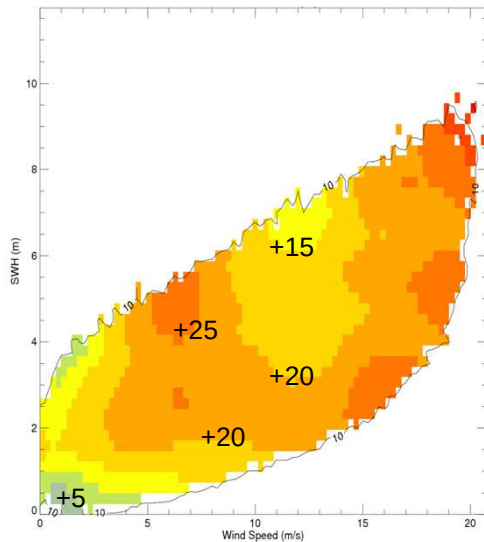
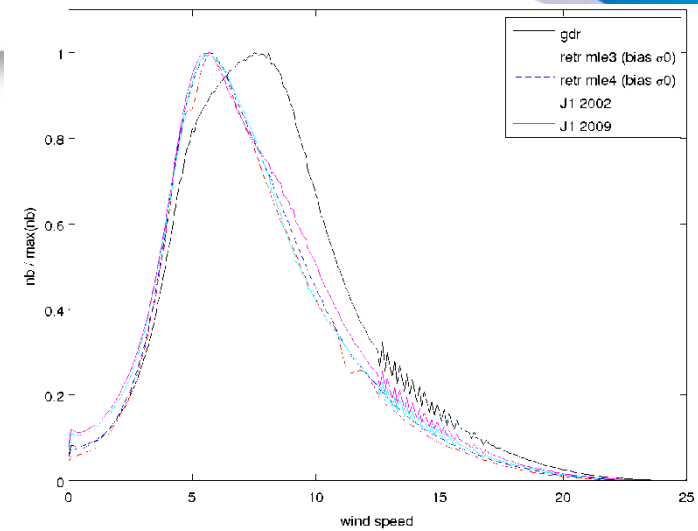
Envisat SSB difference, (ESOC – GDR) orbits



Jason-1 SSB difference, (MOG2D – IB) corrections

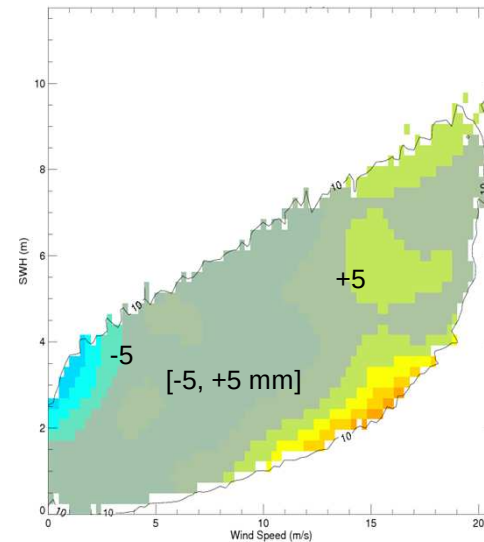
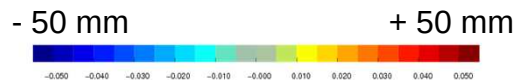
Wind speed calibration

If we want to compare models, we need to work in the same reference frame (SWH, wind speed)



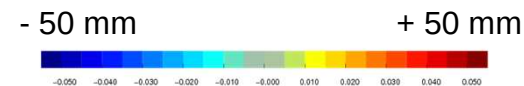
**SSB_J2_Ref –
SSB_J1_Ref**

- Diff of estimation approach
- Diff of data version
- Diff of wind speed distribution



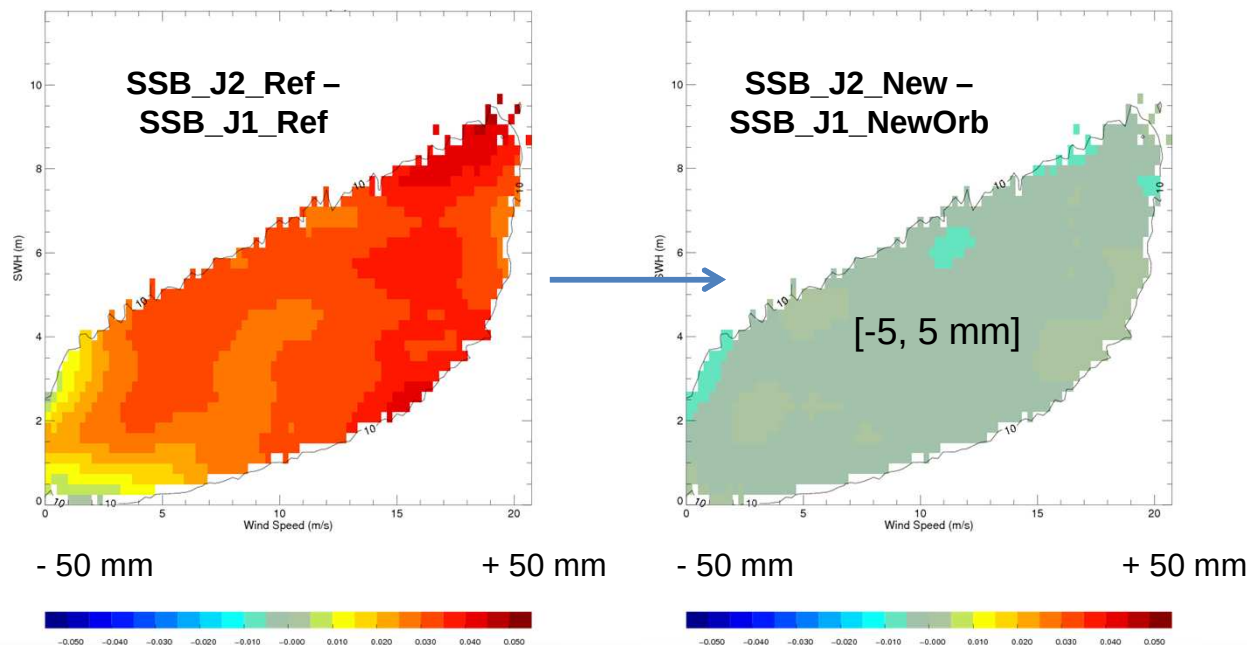
**SSB_J2_U_MLE4 -
SSB_J1_Ref**

- Diff of estimation approach
- Diff of data version
- Similar wind speed histogram



Consistency of SSB models (in term of processing)

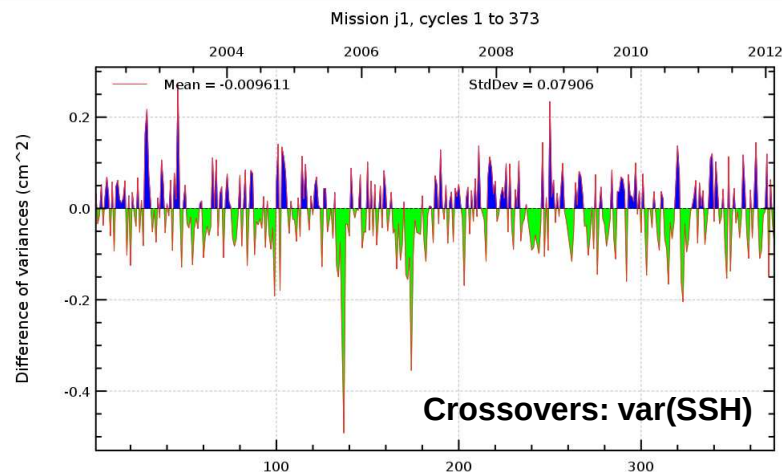
Model name	Period (year)	Cycles	Colinear method	Data source	Range & SWH	Wind	Reference
SSB_J1_Ref (operational)	3	1-111	standard	GDR_B	MLE-4	MLE-4	Labroue, 2008
SSB_J1_NewOrb	3	1-111	modified	GDR_C + GDR_D Orbits	MLE-4	MLE-4	Tran, 2012
SSB_J2_Ref (operational)	1	7-43	modified	GDR_T + GOT4v7 + retracking reprocessed at CLS	MLE-4	MLE-4	Tran, 2011
SSB_J2_New	1	1-36	modified	GDR_D	MLE-4	MLE-4	Tran, 2012



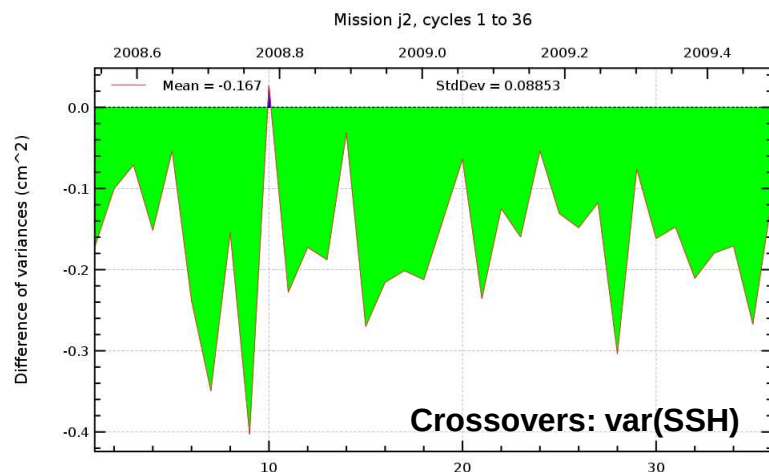
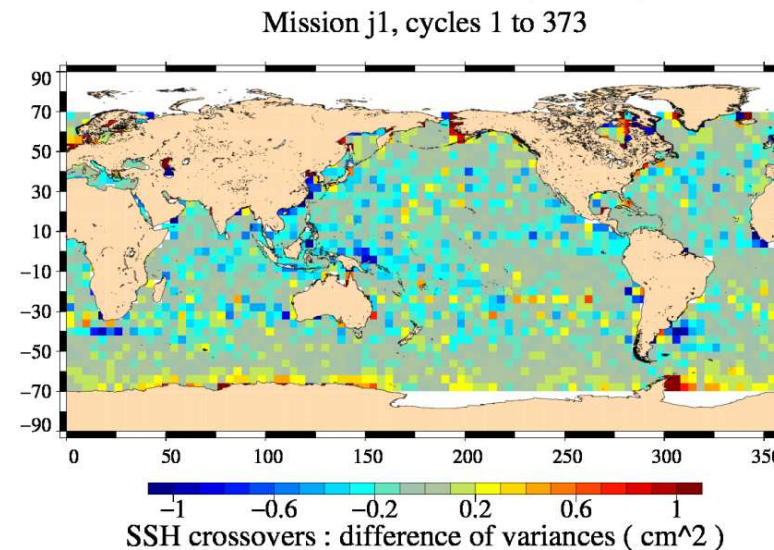
- SSB differences <5 mm between Jason-2 and Jason-1 when solutions are derived from homogeneous datasets and methods. This is expected since the sensors are the same.

Performance diagnoses

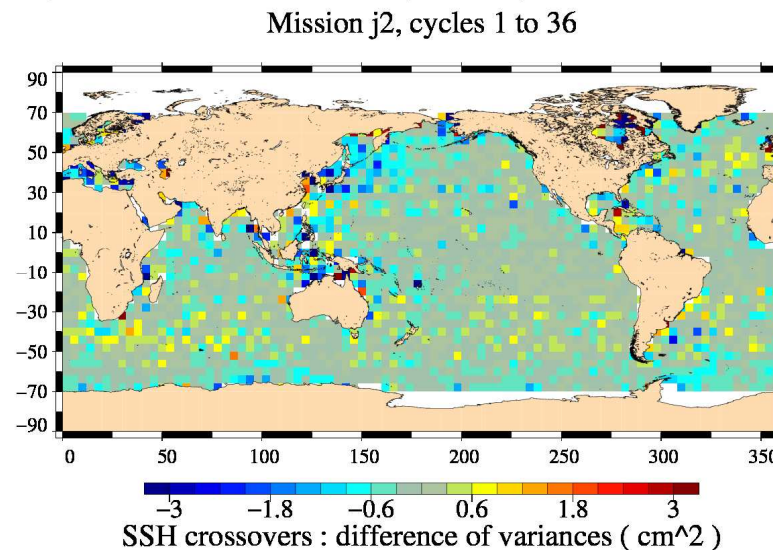
Comparison of SSH variance after applying two different SSB corrections at crossovers.
A reduction of variance for one of them indicates that this SSB performs better than the other



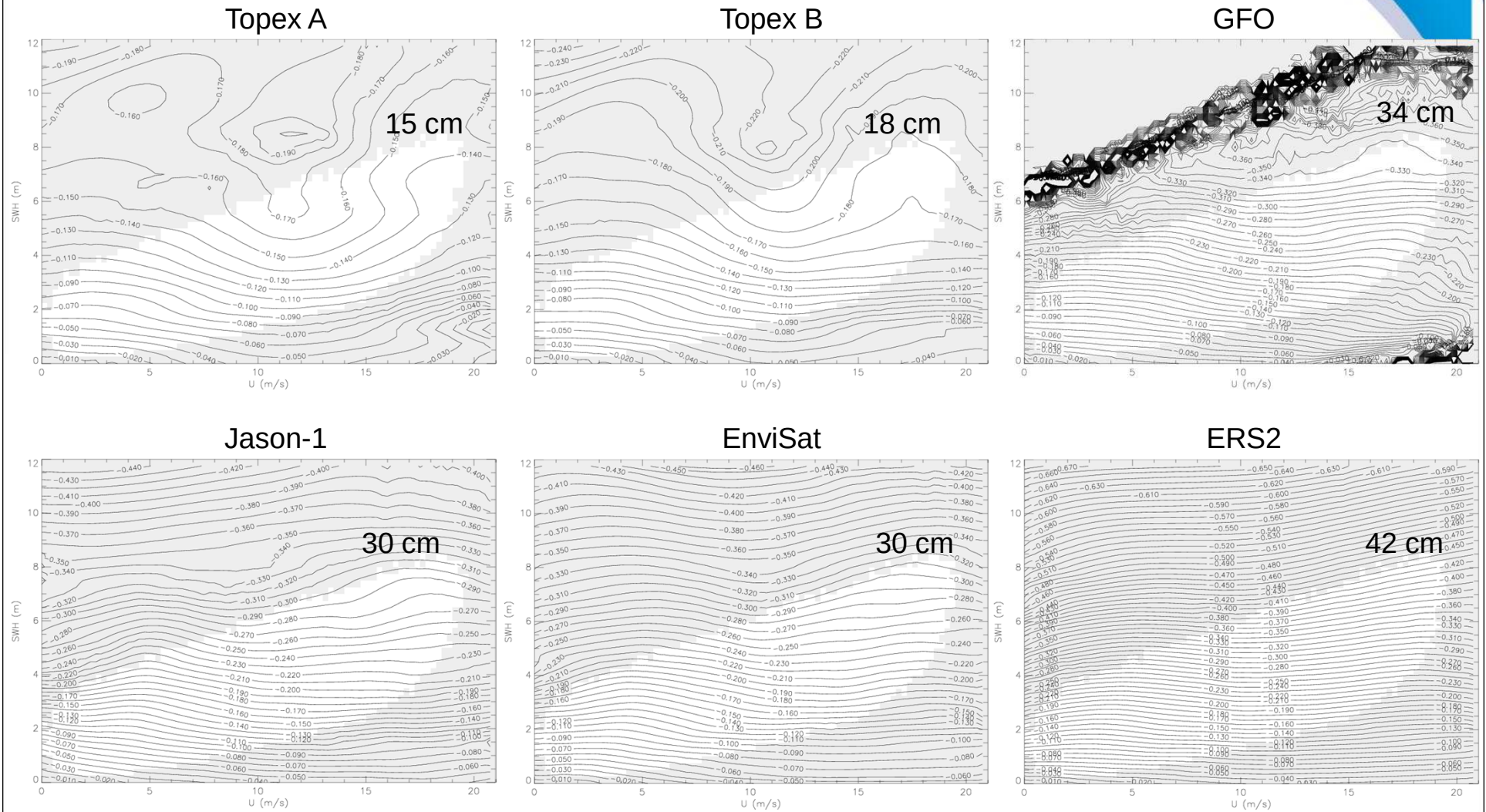
→ No need to change the SSB model



→ Better to update the SSB model,
some improvement observed

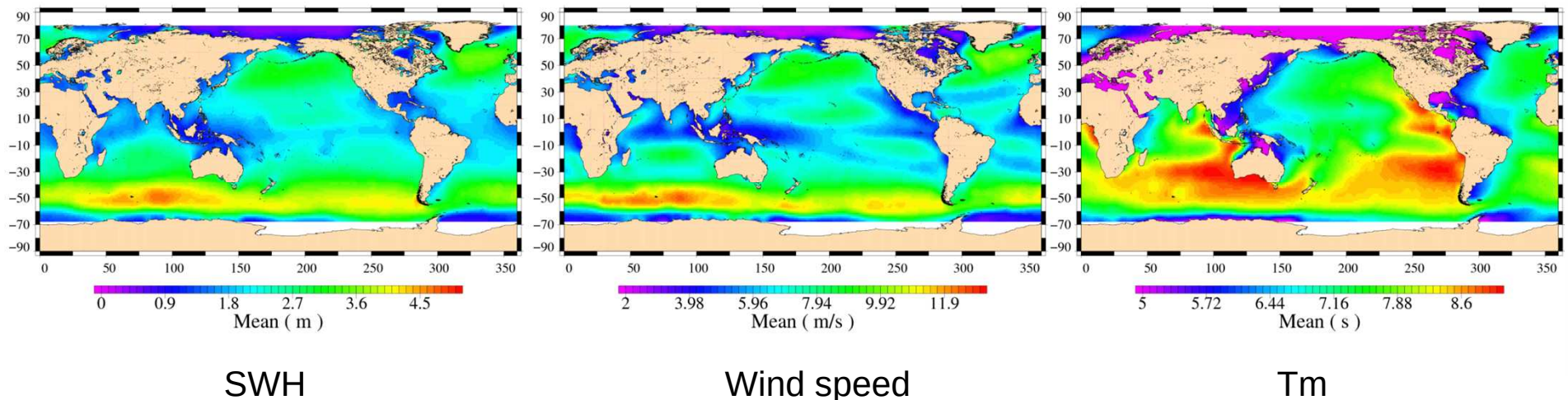


Mission specific models (NP versions)



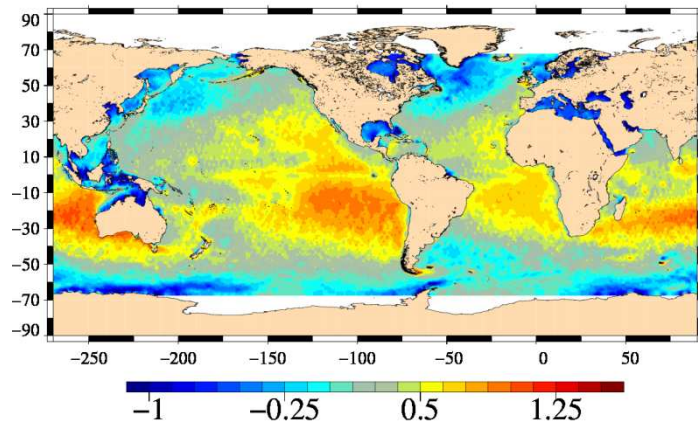
3D SSB (SWH, Wind speed, wave period)

- ❖ Development of 3D SSB (SWH, U_{alt} , T_m) to better model SSB behavior with improved description of the sea state.
- ❖ T_m : mean wave period from a numerical wave model (WAVEWATCH-III, used operationally at NOAA/NCEP)

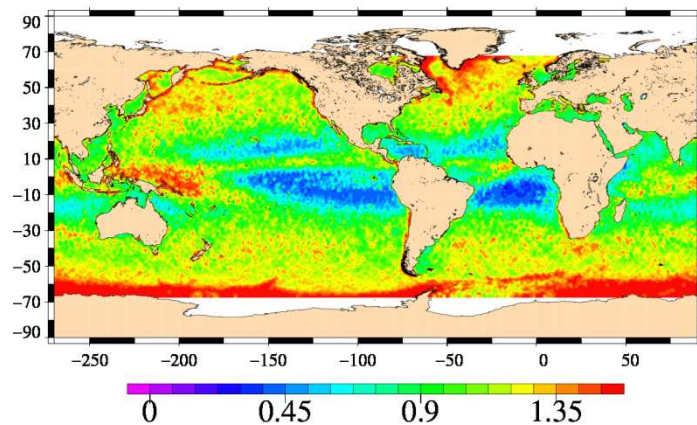


3D SSB vs operational 2D SSB

Mean of 3D SSB – 2D SSB
Mission j1, cycles 1 to 293

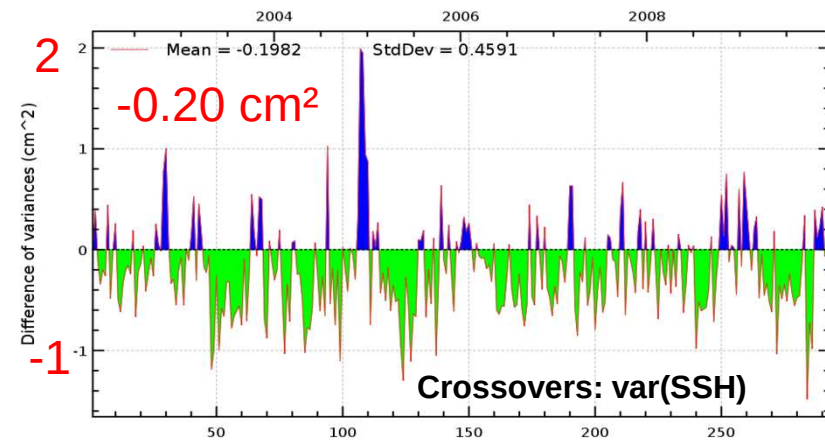


Standard deviation of 3D SSB – 2D SSB
Mission j1, cycles 1 to 293

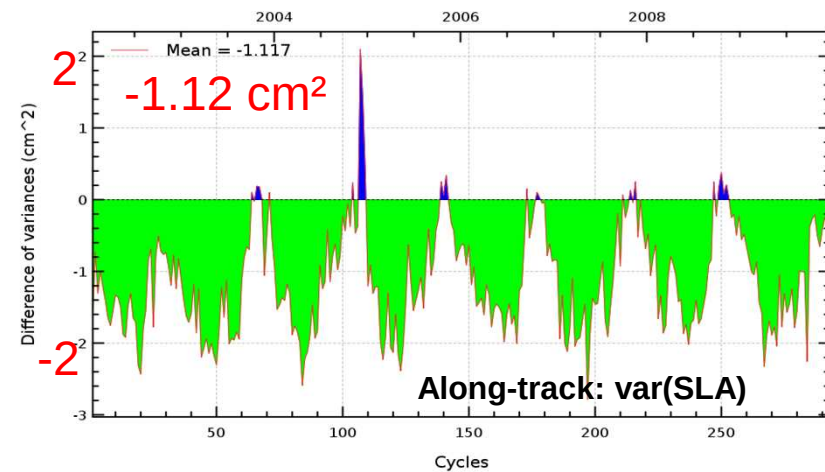


→ Patterns show differences in SSB behavior description

SSH crossovers : VAR(SSh with 3D SSB) - VAR(SSh with 2D SSB)
Mission j1, cycles 1 to 293



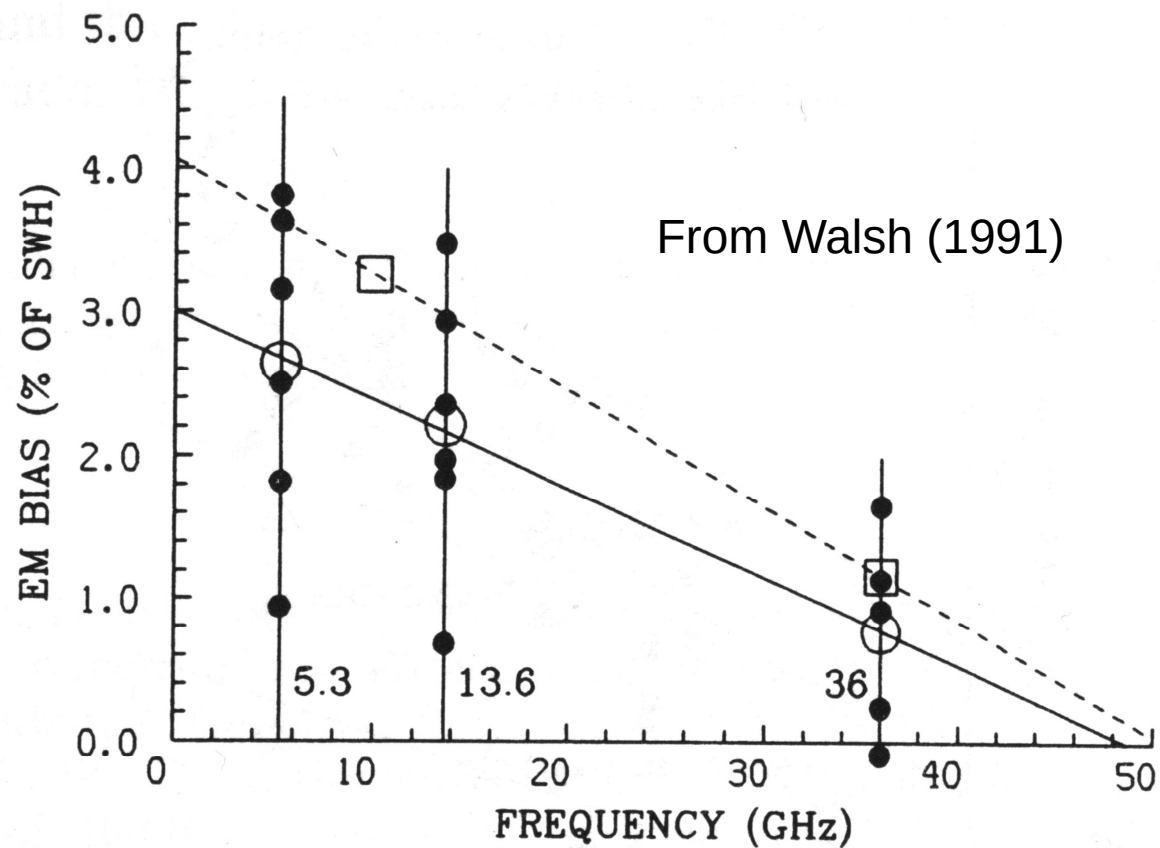
VAR(SLA with 3D SSB) - VAR(SLA with 2D SSB)
Mission j1, cycles 1 to 293



→ A reduction of variance for the 3D model indicates that it performs better than the 2D one

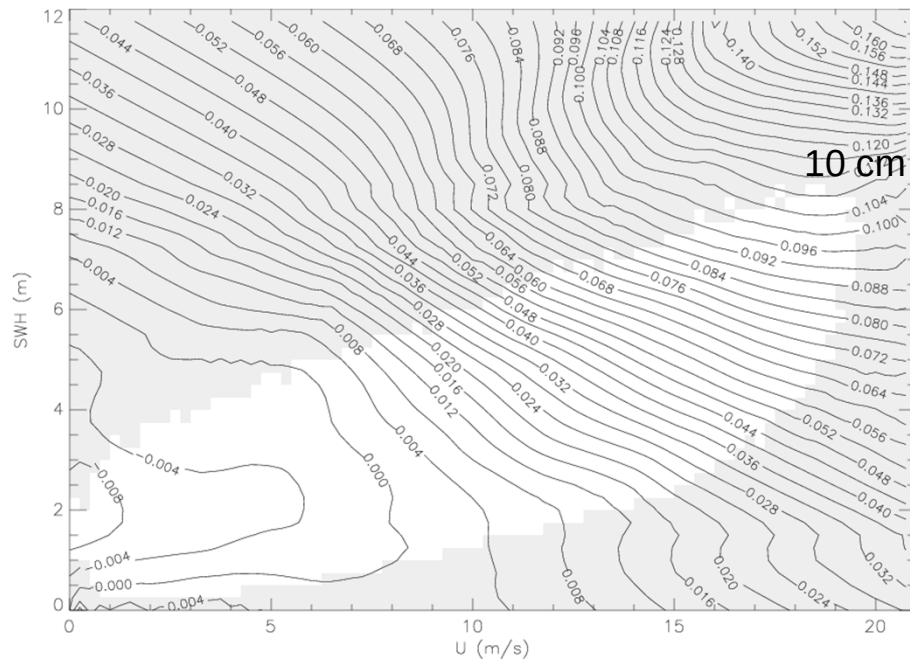
Radar frequency dependence

- ❖ Tower and airborne measurements
 - C, X, Ku, Ka band
 - EMB error is larger at low frequency

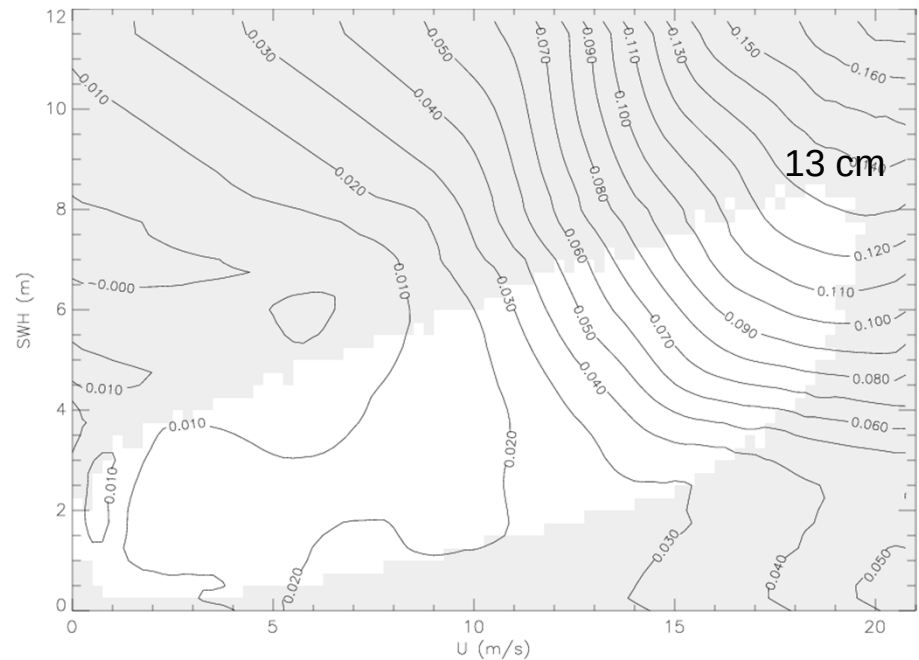


Radar frequency dependence

- ❖ Satellites measurements:
 - S, C, Ku-band
 - variation with sea state



(Ku-band – C-band) SSB, Jason-1



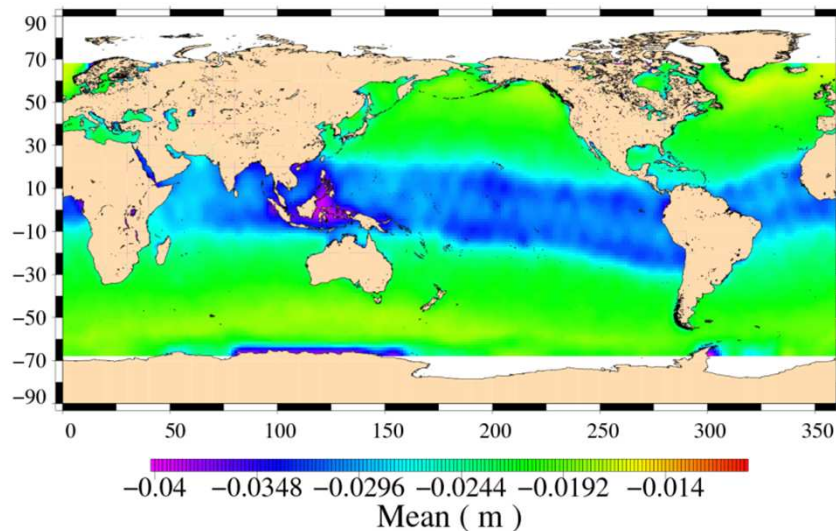
(Ku-band– S-band) SSB, EnviSat

Dual-frequency ionospheric correction (another correction necessary for accurate Ku-band SSH)

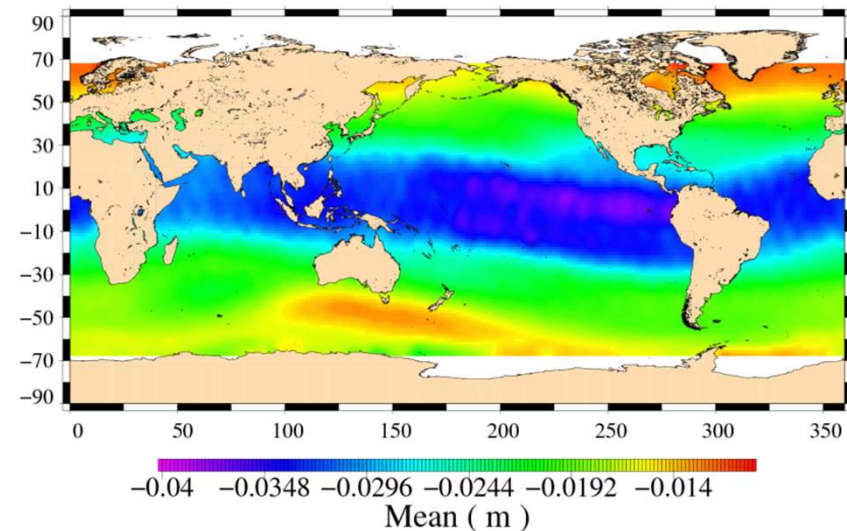
$$\text{Iono_ku} = \delta f_{\text{ku}} [(R_c - \text{SSB}_c) - (R_{\text{ku}} - \text{SSB}_{\text{ku}})]$$

$$\delta f_{\text{ku}} = f_c^2 / (f_{\text{ku}}^2 - f_c^2) \sim 0.179 \quad \text{for Topex, Jason missions}$$

(~ 0.059 for Envisat / S-band)



Jason-2, Dual_Iono



Jason-2, Gim_Iono (from GPS data)

To go further on SSB: some references

- Amarouche, L., « Contribution à l'étude du biais d'état de mer », Thèse de doctorat, Paris 7, Paris, 2001.
- Dubois, P. 2011. "Impact de l'état de mer sur la mesure d'élévation des futurs instruments altimétriques ", thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Fu, L-L. and Cazanave, A. 2001. "Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications". San Diego: Academic Press. 463pp.
- Gaspar, P., S. Labroue, F. Ogor, G. Lafitte, L. Marchal, and M. Rafanel. 2002. « Improving nonparametric estimates of the sea state bias in radar altimetry measurements of sea level », *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 1690-1707.
- Labroue, S., P. Gaspar, J. Dorandeu, F. Mertz, N. Tran, O.-Z. Zanife, P. Vincent, N. Picot, and P. Femenias. 2006. "Overview of the improvements made on the empirical determination of the sea state bias correction », *Proceedings of the 15 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium, Venice, Italy, 13-18 March 2006*. (Available at http://earth.esa.int/workshops/venice06/participants/318/paper_318_labroue.pdf).
- Tran, N., D. Vandemark, S. Labroue, H. Feng, B. Chapron, H. L. Tolman, J. Lambin, and N. Picot: "Sea state bias in altimeter sea level estimates determined by combining wave model and satellite data", *J. Geophys. Res.*, 115, C03020, doi:10.1029/2009JC005534, 2010.
- Vandemark, D., N. Tran, B. D. Beckley, B. Chapron, and P. Gaspar. 2002. Direct estimation of sea state impacts on radar altimeter sea level measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2148. doi:10.1029/2002GL015776.
- Walsh, E. J. , F. C. Jackson, D. E. Hines, C. Piazza, L. G. Hevizi, D. J. Mclaughlin, R. E. McIntosh, R. N. Swift, J. F. Scott, J. K. Yungel, and E. B. Frederick, "Frequency dependence of electromagnetic bias in radar altimeter sea surface range measurements" , *Journal of Geophysical Research*, vol. 96, no. C11, pp. 20571-20583, 1991.

To go further on Propagation errors: some references

- Brown, S., C. Ruf, S. Keihm, and A. M. I. Kitiyakara, 2004: Jason Microwave Radiometer Performance and On-Orbit Calibration. *Marine Geodesy*, 27, 199–220, doi:10.1080/01490410490465643.
- Brown, S. T., S. Desai, and a. B. Tanner, 2007: On the Long-Term Stability of Microwave Radiometers Using Noise Diodes for Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1908–1920, doi:10.1109/TGRS.2006.888098..
- Eymard, L., and E. Obligis, 2006: The altimetric Wet Tropospheric Correction : Progress since the ERS-1 mission.
- Fu, L.-L., and A. Cazenave, 2000: *Satellite Altimetry and Earth Sciences, Volume 69: A Handbook of Techniques and Applications*.
- Guissard, A., and P. Sobieski, 1987: An approximate model for the microwave brightness temperature of the sea. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 1607–1627.
- Keihm, S. J., M. A. Janssen, and C. S. Ruf, 1995: TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR): III/ Wet Troposphere Range Correction Algorithm and Pre-Launch Error Budget. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 138–147.
- Obligis, E., L. Eymard, N. Tran, S. Labroue, and P. Femenias, 2006: First Three Years of the Microwave Radiometer aboard Envisat: In-Flight Calibration, Processing, and Validation of the Geophysical Products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 802–814.
- Obligis, E., a. Rahmani, L. Eymard, S. Labroue, and E. Bronner, 2009: An Improved Retrieval Algorithm for Water Vapor Retrieval: Application to the Envisat Microwave Radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 3057–3064, doi:10.1109/TGRS.2009.2020433.
- Ruf, C. S., 2000: Detection of Calibration Drifts in Spaceborne Microwave Radiometers Using a Vicarious Cold Reference. 38, 44–52.
- Wilheit, T. T., and A. T. C. Chang, 1980: An algorithm for retrieval of ocean surface and atmospheric parameters from the observations of the scanning multichannel microwave radiometer. *Radio Science*, 15, 525–544, doi:10.1029/RS015i003p00525. <http://dx.doi.org/10.1029/RS015i003p00525>.
- Zlotnicki, V., and S. Desai, Assessment of the Jason Microwave Radiometer's measurement of the Wet Tropospheric Path Delay Using Comparisons to SSM/I and TMI. *Marine Geodesy*, 241–253.