Analyse des Mesures Radiométriques en Bande-L Au-Dessus de l'Océan: Campagnes CAROLS

Adrien MARTIN

Directrices: Jacqueline Boutin
Danièle Hauser

26 Juin 2013

BANDE-L — 21 CM — 1.4GHZ

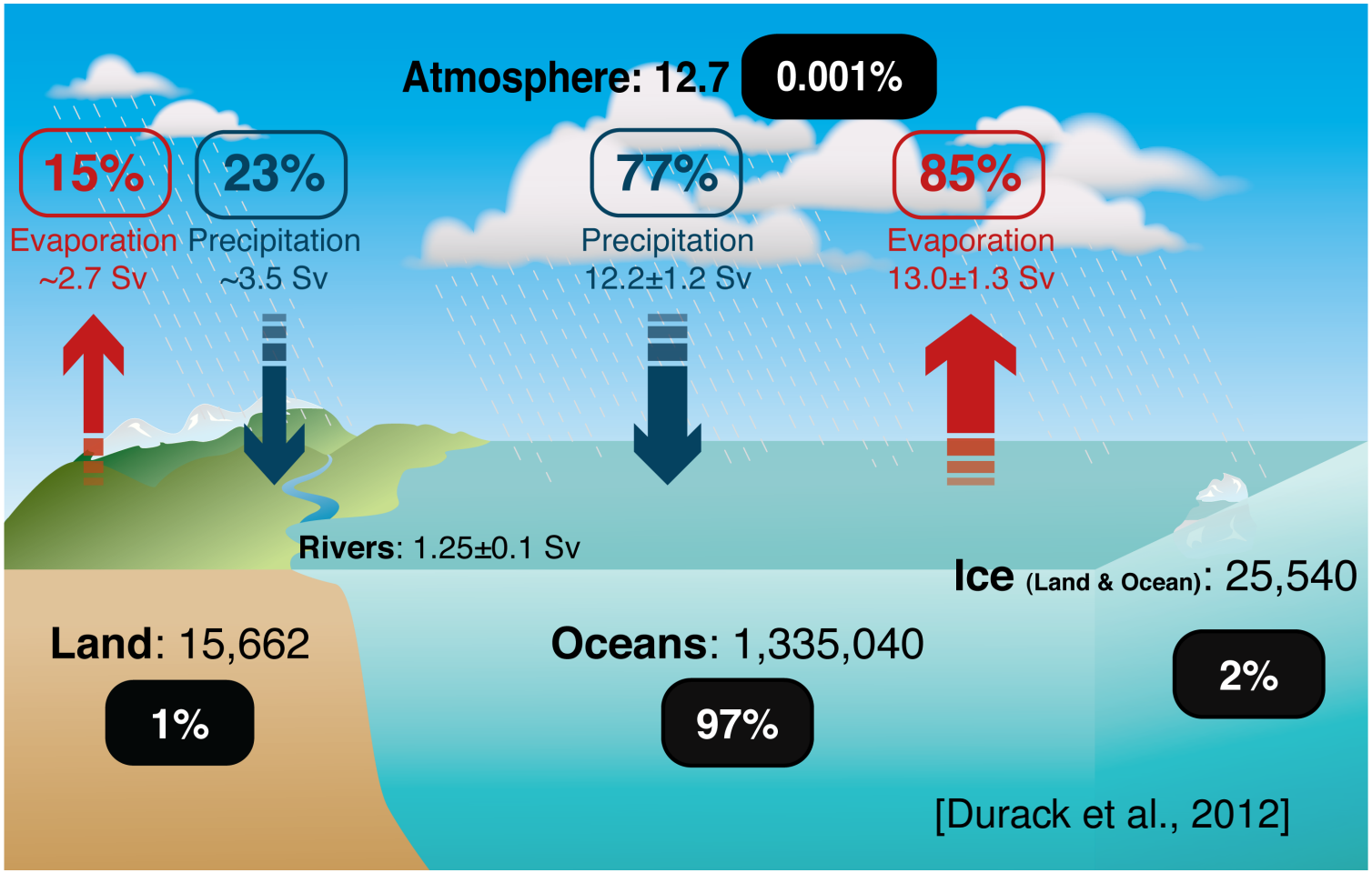
- fréquence choisie par les missions spatiales SMOS et Aquarius pour mesurer la SSS.

SMOS ET AQUARIUS

- Missions jeunes (cartes de SSS satellitaires depuis début 2010) ;

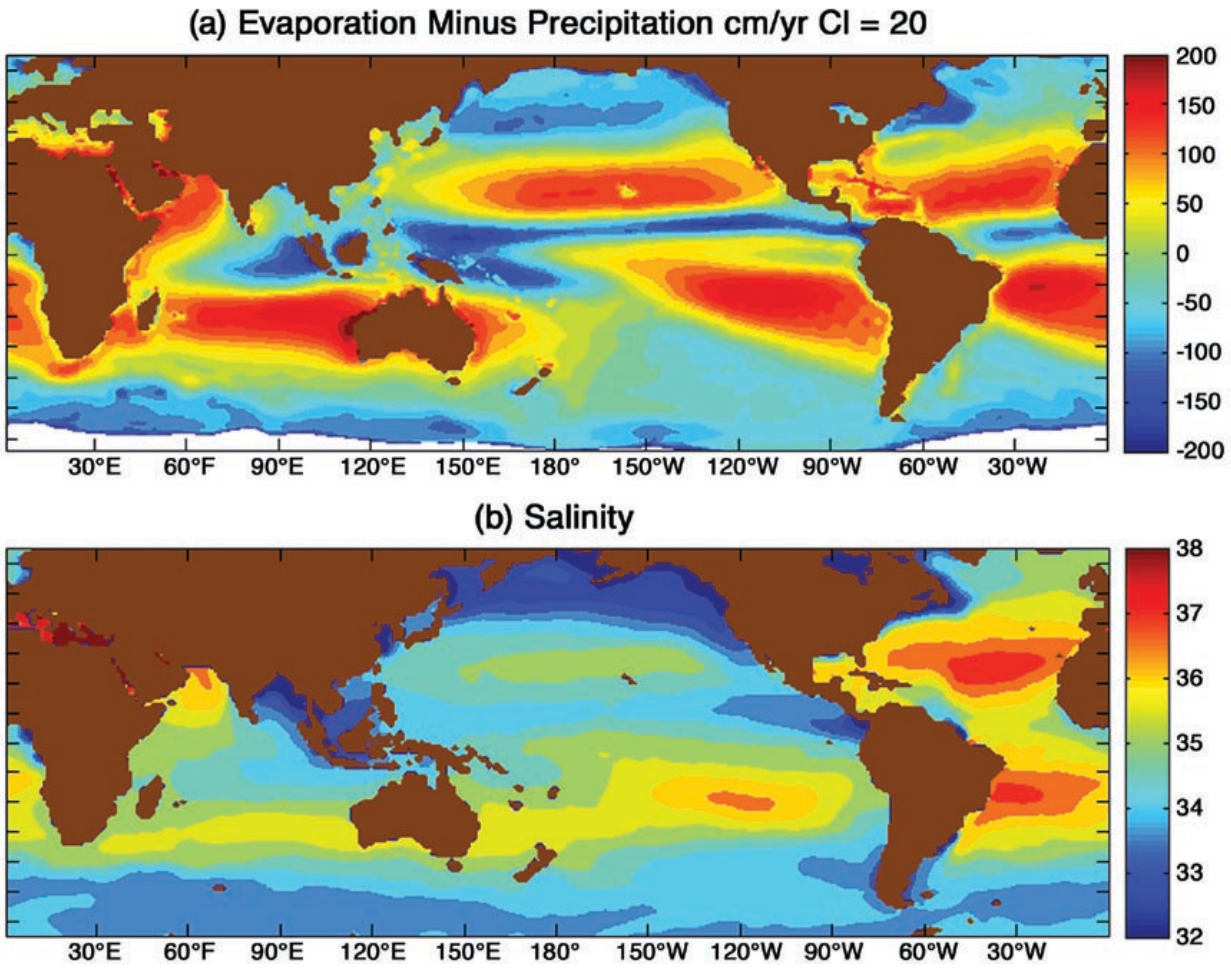
=> Améliorer notre compréhension des signaux géophysiques pour estimer la SSS.

Cycle Global de l'Eau



- Importance de l'océan pour comprendre le cycle hydrologique à l'échelle globale.

Cycle de l'Eau et Salinité de Surface (SSS)

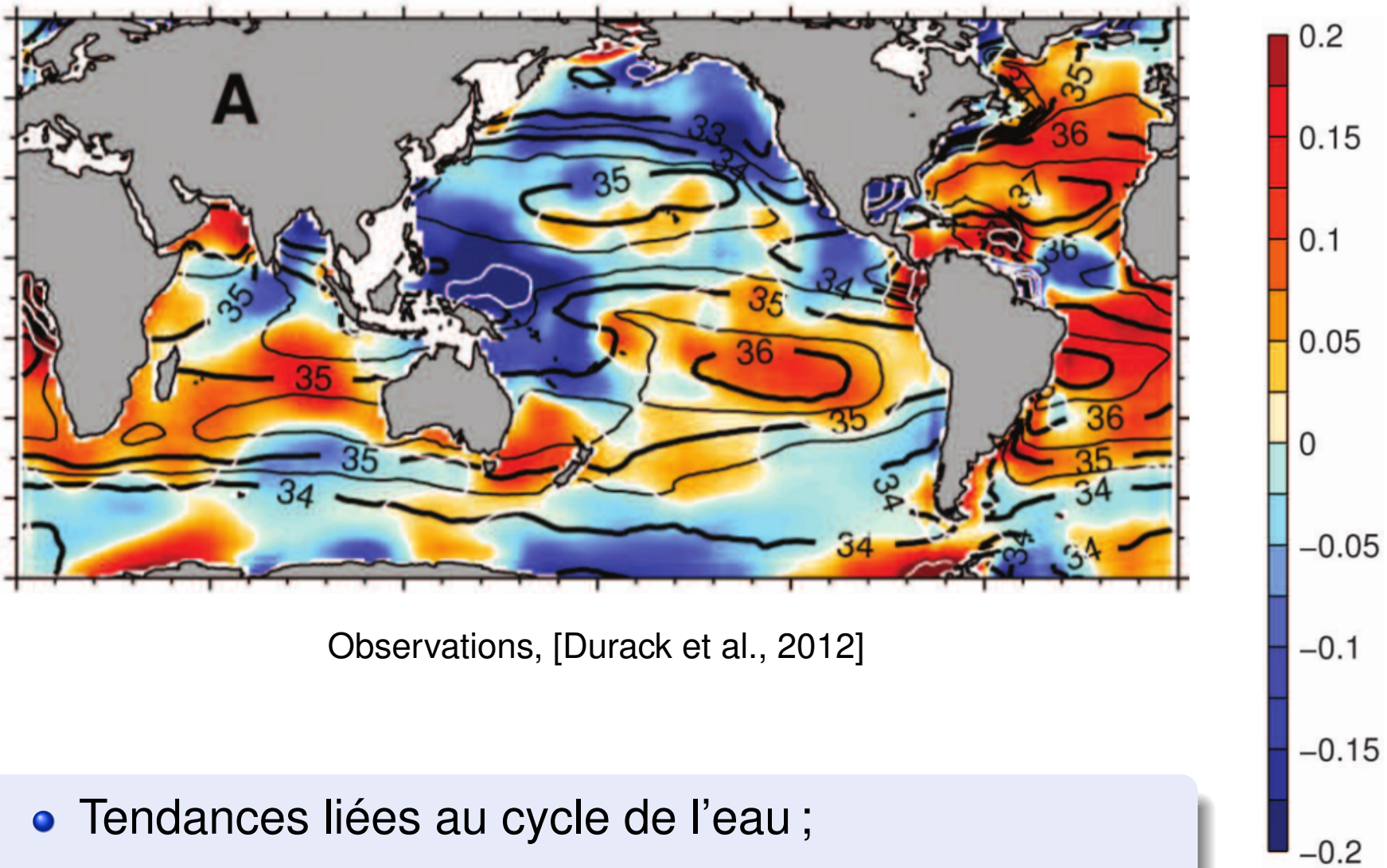


[Schmitt et al., 2008]

- Peu de mesure directe du cycle de l'eau ;
- SSS marqueur du cycle de l'eau ;
- SSS varie de 32 à 38 pss (g/kg).

Changement Climatique

Tendances des SSS 1950-2000



Observations, [Durack et al., 2012]

- Tendances liées au cycle de l'eau ;
- Accroissement des contrastes.

Variations de Salinité

Causes

- Cycle de l'eau
  - $(E - P)$, ruissellement, fonte des glaces.
- Circulation océanique ;

Influence sur la Densité

- Circulation océanique (thermohaline, . . .) ;
- Couches barrières.

Variations de Salinité

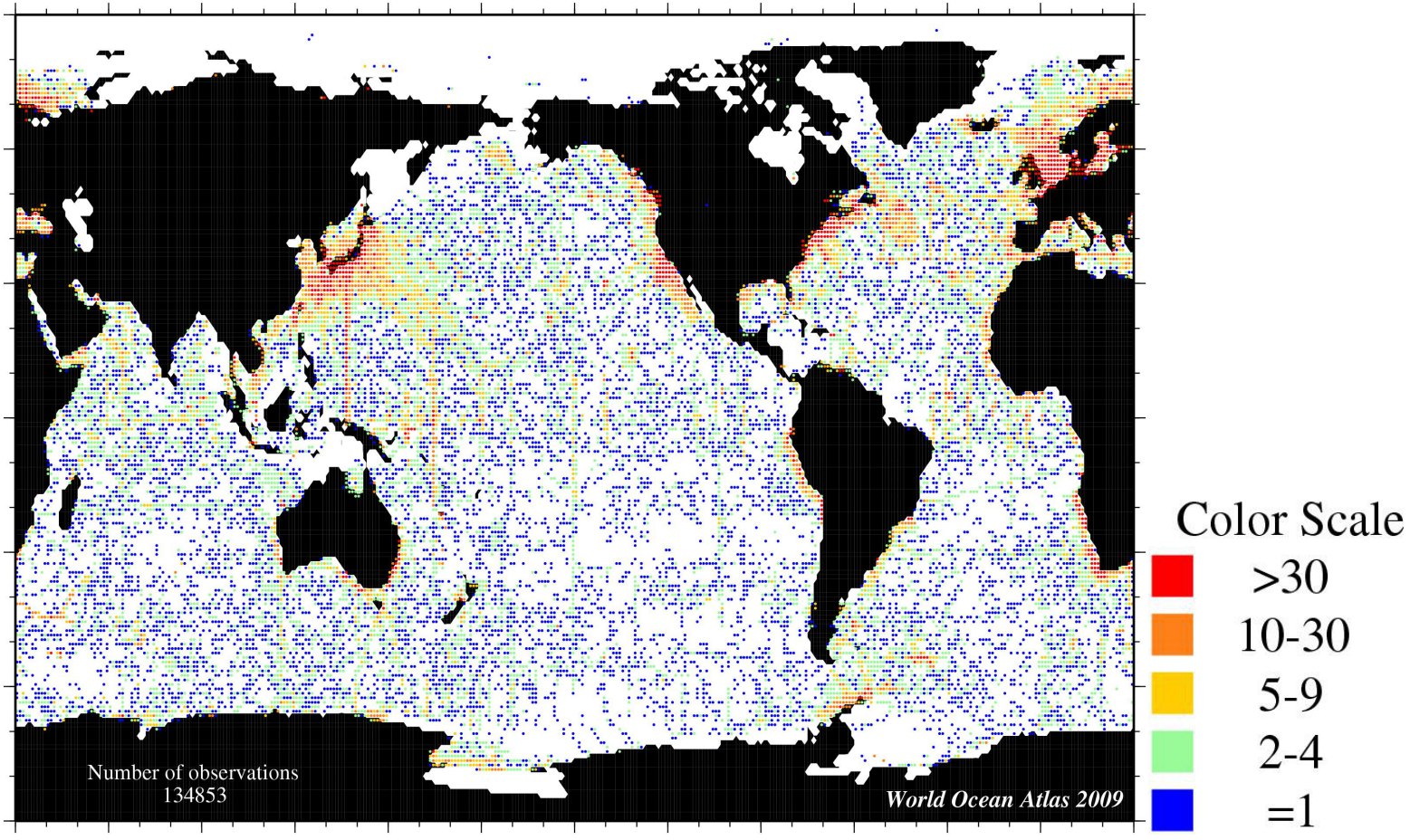
Causes

- Cycle de l'eau
  - $(E - P)$, ruissellement, fonte des glaces.
- Circulation océanique ;

Influence sur la Densité

- Circulation océanique (thermohaline, . . .) ;
- Couches barrières.

Mesures SSS In Situ



Nb d'observations $1° \times 1°$, Jan. 2009, [Antonov et al., 2010]

- Peu d'échantillon de la SSS

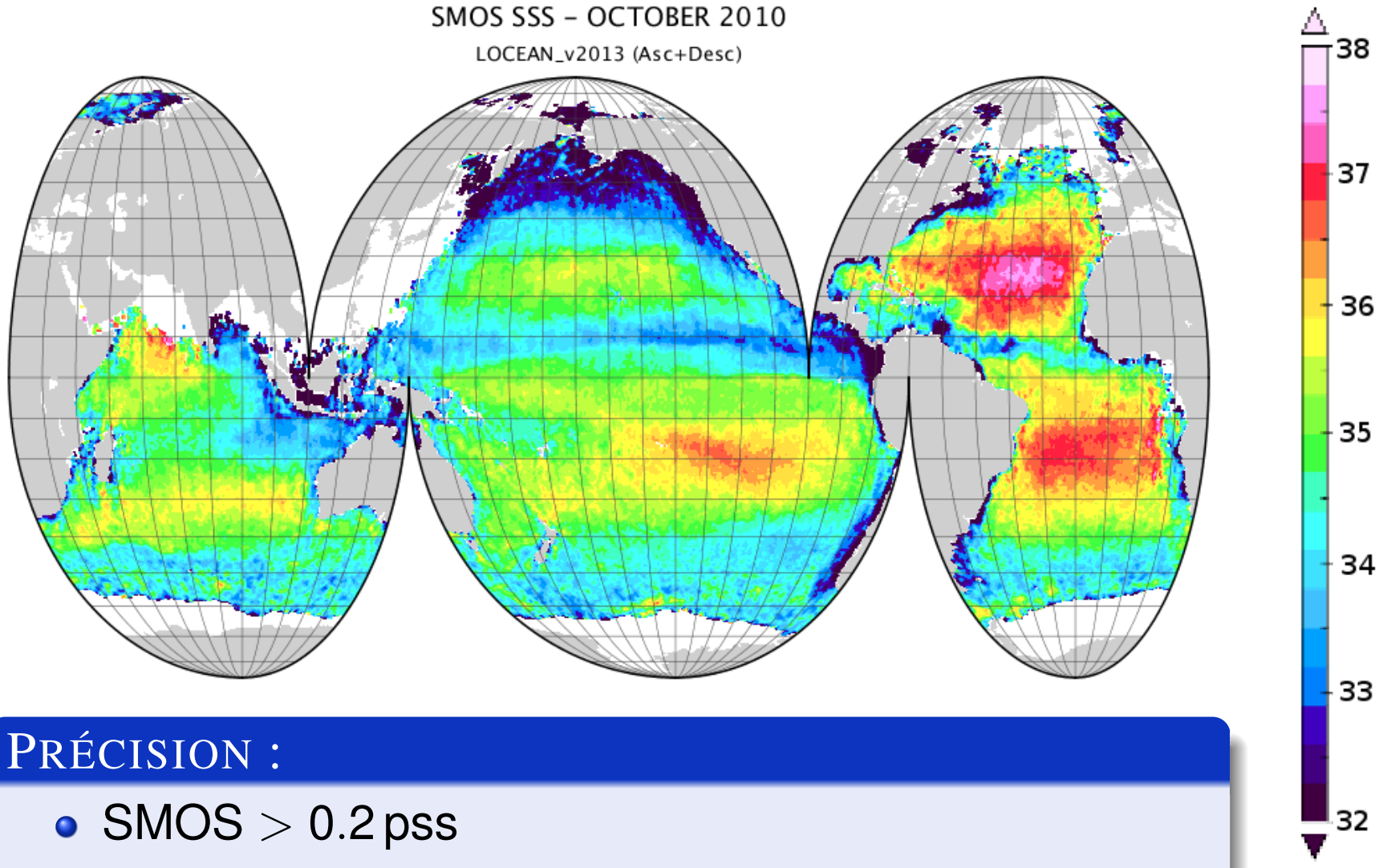
Missions Spatiales — Radiométrie en Bande-L

SMOS — Nov. 2009

Aquarius — Juin 2011

Antennes	interférométrique	réelle
Particularité	multi-incidence	actif/passif
Angles d'incidence	0˚ à 60˚	29˚,38˚ et 46˚
Rés. radiométrique	1.8K à 3K (1.2s)	0.06K (5.8s)
Couverture glob.	3 jours	7 jours
Rés. spatiale	$\approx$ 40 km	$\approx$ 100 km
Précision mensuelle		à 100km : $\approx$ 0.2 pss

SSS SMOS — Octobre 2010



Précision :

- SMOS > 0.2 pss
- Attendue (bruit rad. ; modèles parfaits) : 0.1 pss

Objectifs de la Thèse

Objectifs

- Valider et améliorer les modèles directs et méthodes d'inversions ;
- Améliorer notre compréhension de la physique de la mesure.

Données

Instruments

- Radiomètre en Bande-L CAROLS
- (Diffusiomètre en Bande-C STORM)

Zone d'Étude

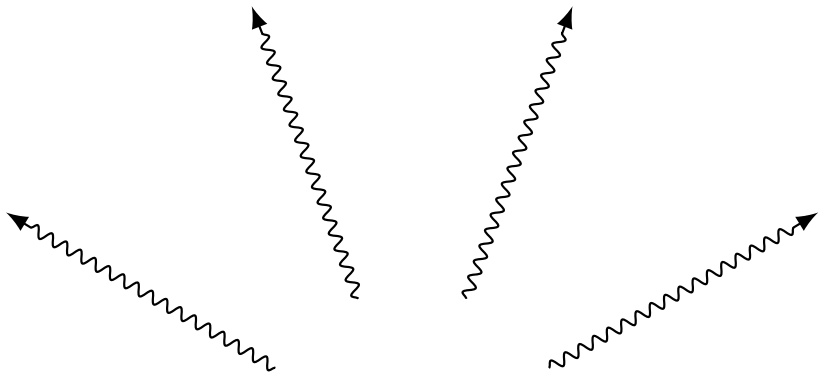
- Golfe de Gascogne

Plan

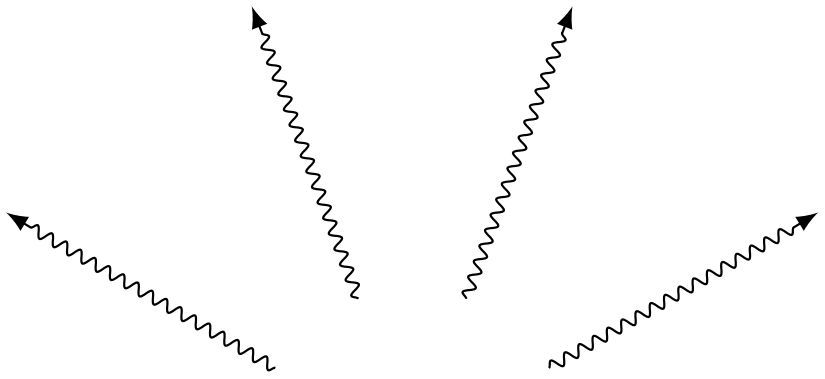
1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives



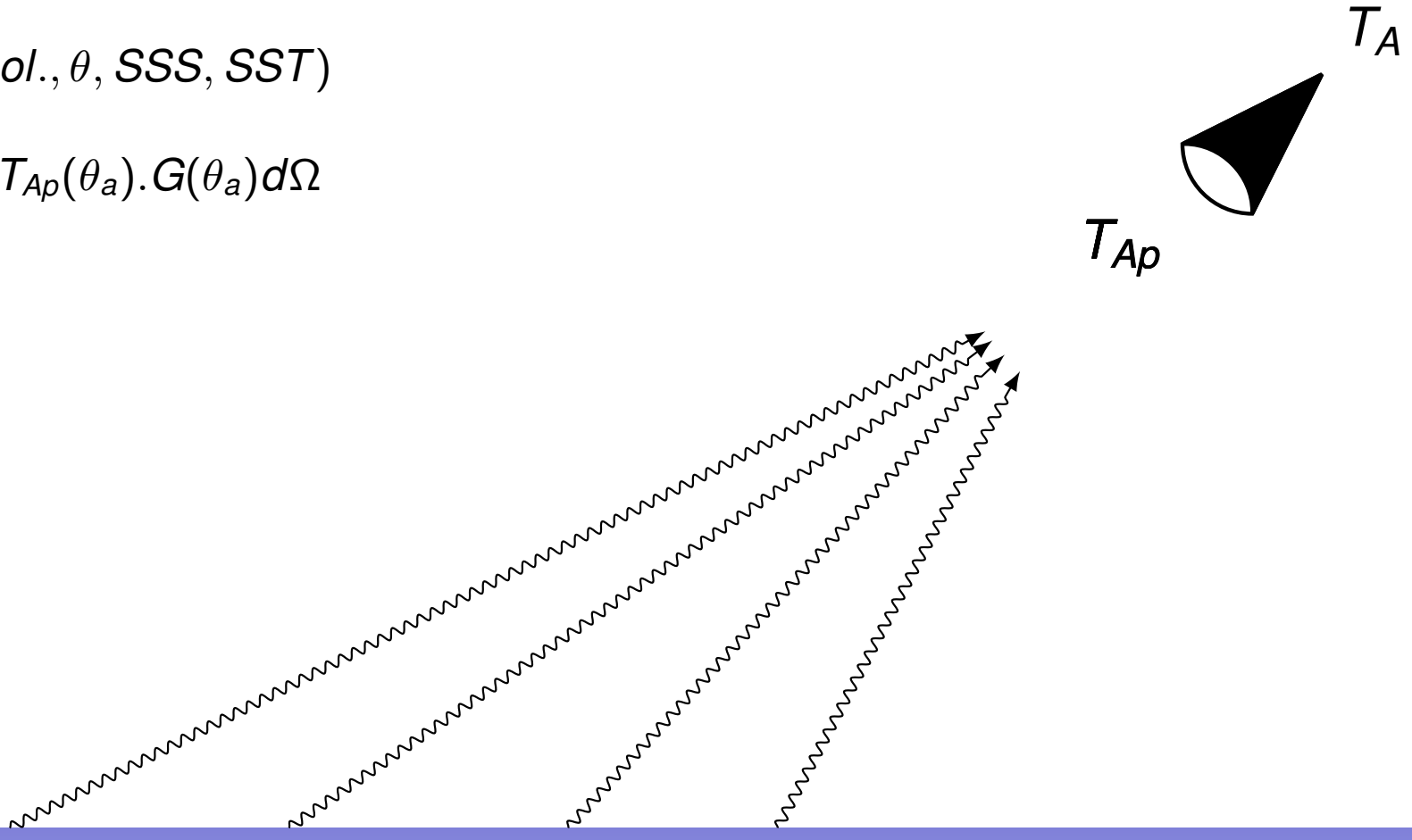
$$Tb_{mer} = Tb_{plat} = SST.e(pol., \theta, SSS, SST)$$



$$Tb_{mer} = Tb_{plat} = SST.e(pol., \theta, SSS, SST)$$

$T_{Ap} = Tb_{mer}(pol., \theta, SSS, SST)$

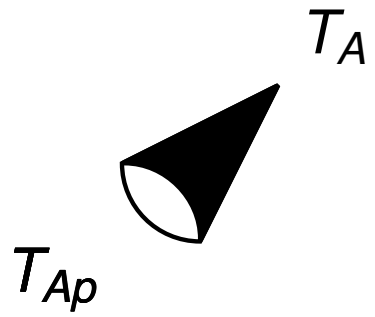
$T_A = \frac{1}{4\pi} . \iint_{4\pi} T_{Ap}(\theta_a).G(\theta_a)d\Omega$

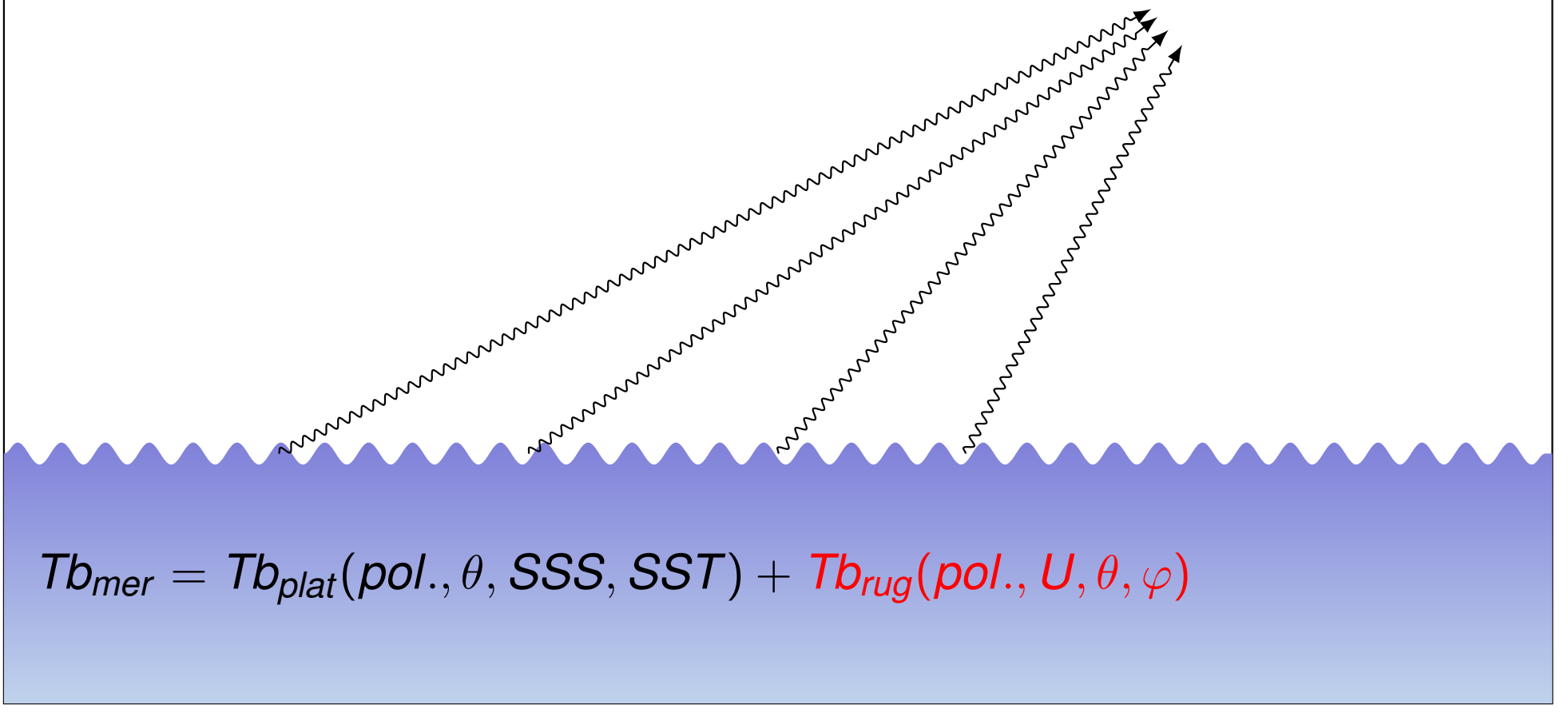


$Tb_{mer} = Tb_{plat} = SST.e(pol., \theta, SSS, SST)$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}(pol., \theta, SSS, SST, U, \varphi)$$

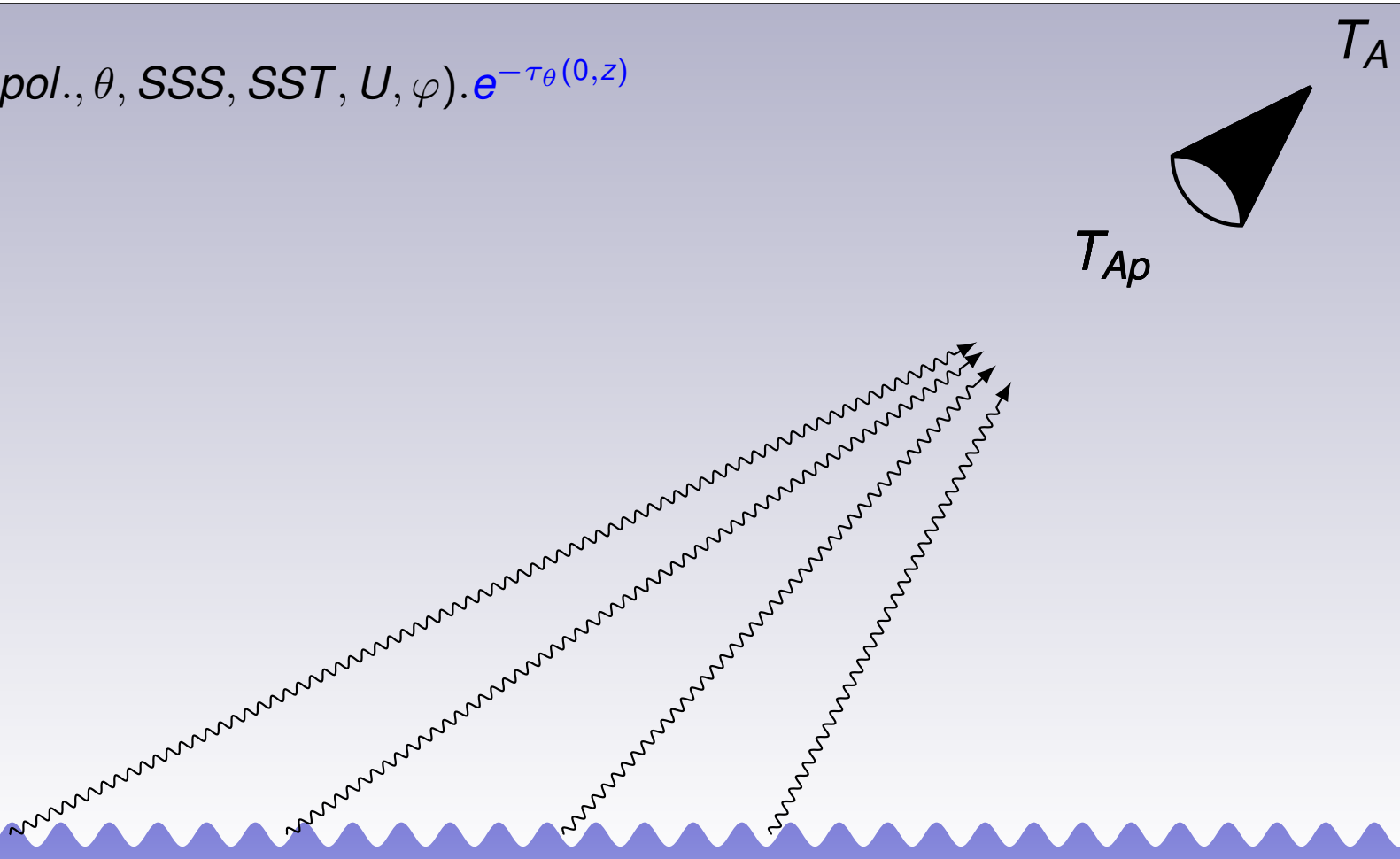
$$T_A = \frac{1}{4\pi} . \iint_{4\pi} T_{Ap}(\theta_a, \varphi_a) . G(\theta_a, \varphi_a) d\Omega$$





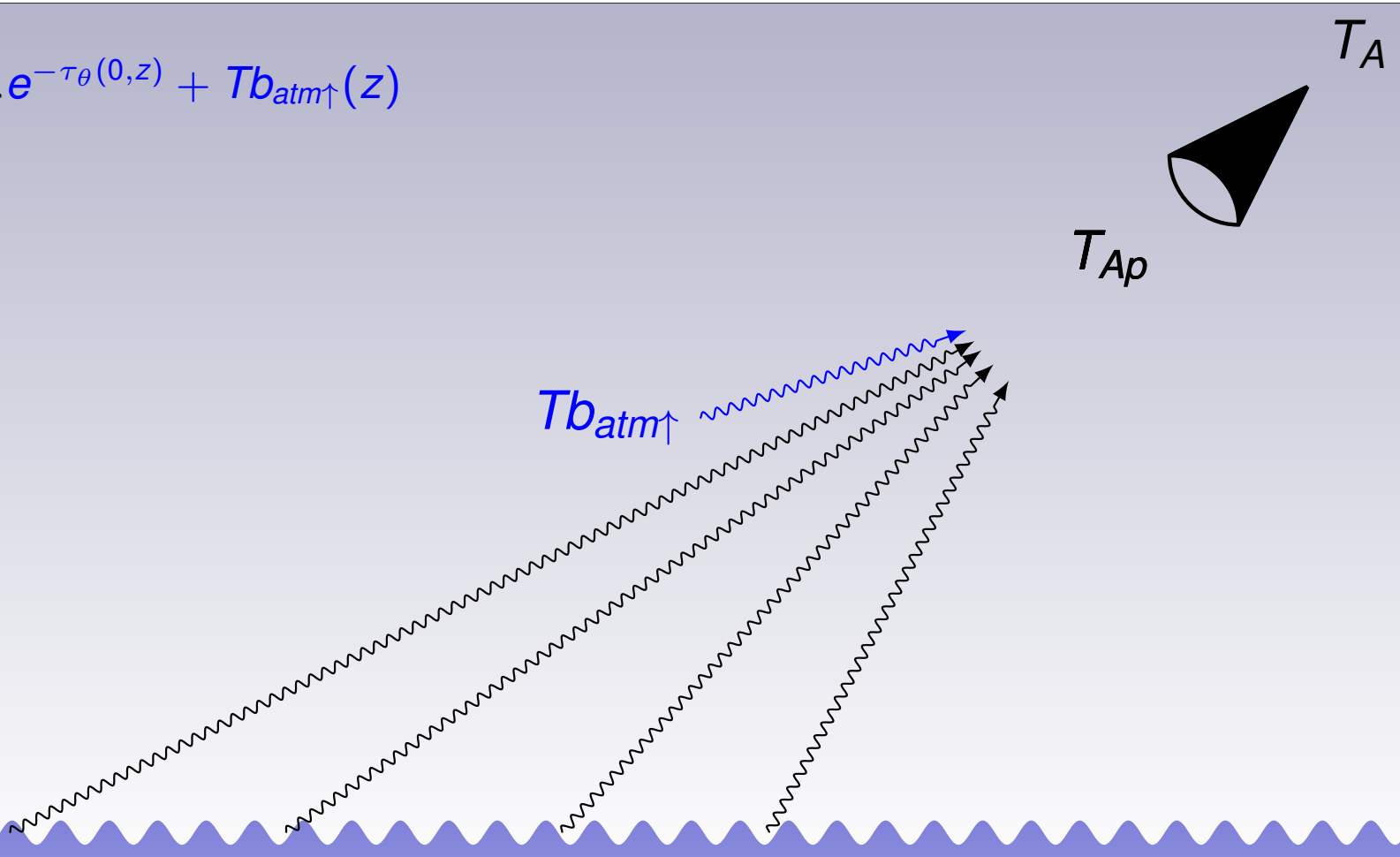
$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}(pol., \theta, SSS, SST, U, \varphi).e^{-\tau_\theta(0,z)}$$



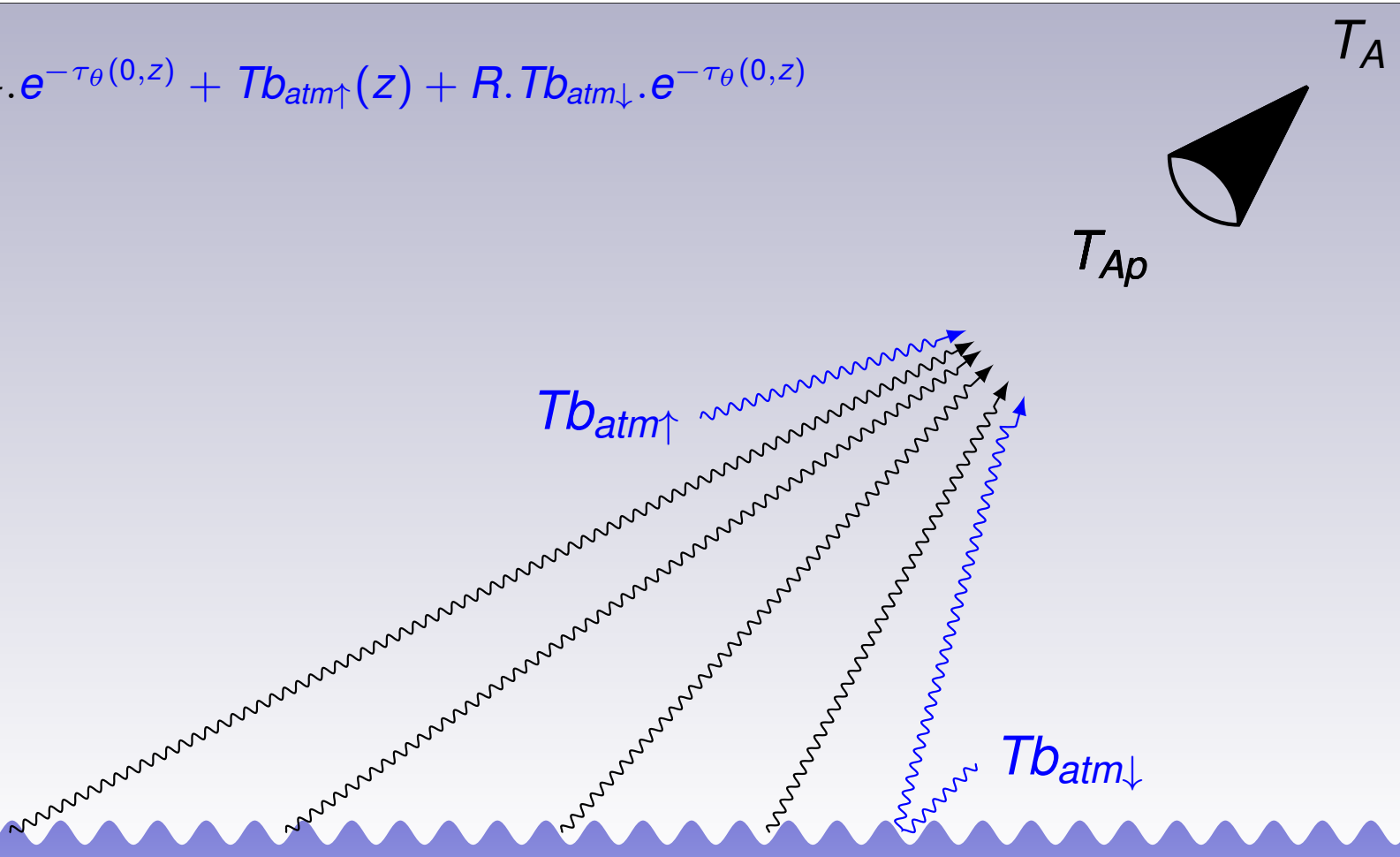
$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}.e^{-\tau_\theta(0,z)} + Tb_{atm\uparrow}(z)$$



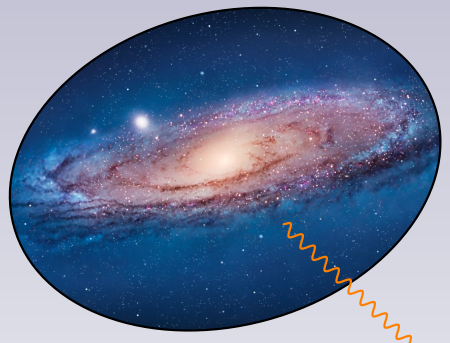
$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}.e^{-\tau_\theta(0,z)} + Tb_{atm\uparrow}(z) + R.Tb_{atm\downarrow}.e^{-\tau_\theta(0,z)}$$



$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}.e^{-\tau_\theta(0,z)} + Tb_{atm\uparrow} + R.\left(Tb_{ciel}.e^{-\tau_\theta} + Tb_{atm\downarrow}\right).e^{-\tau_\theta(0,z)}$$



T_A

T_{Ap}

$Tb_{atm\uparrow}$

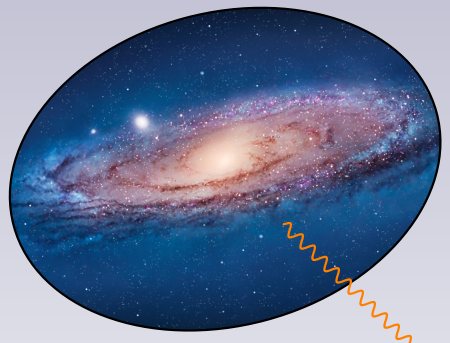
Tb_{ciel}

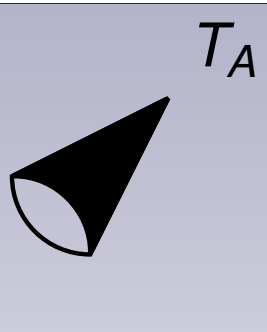
$Tb_{atm\downarrow}$

$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

$$T_{Ap} = Tb_{mer}.e^{-\tau_\theta(0,z)} + Tb_{atm\uparrow} + R.\left(Tb_{ciel}.e^{-\tau_\theta} + Tb_{atm\downarrow}\right).e^{-\tau_\theta(0,z)}$$

TRAP (Terrestrial Radiometry Analysis Package)



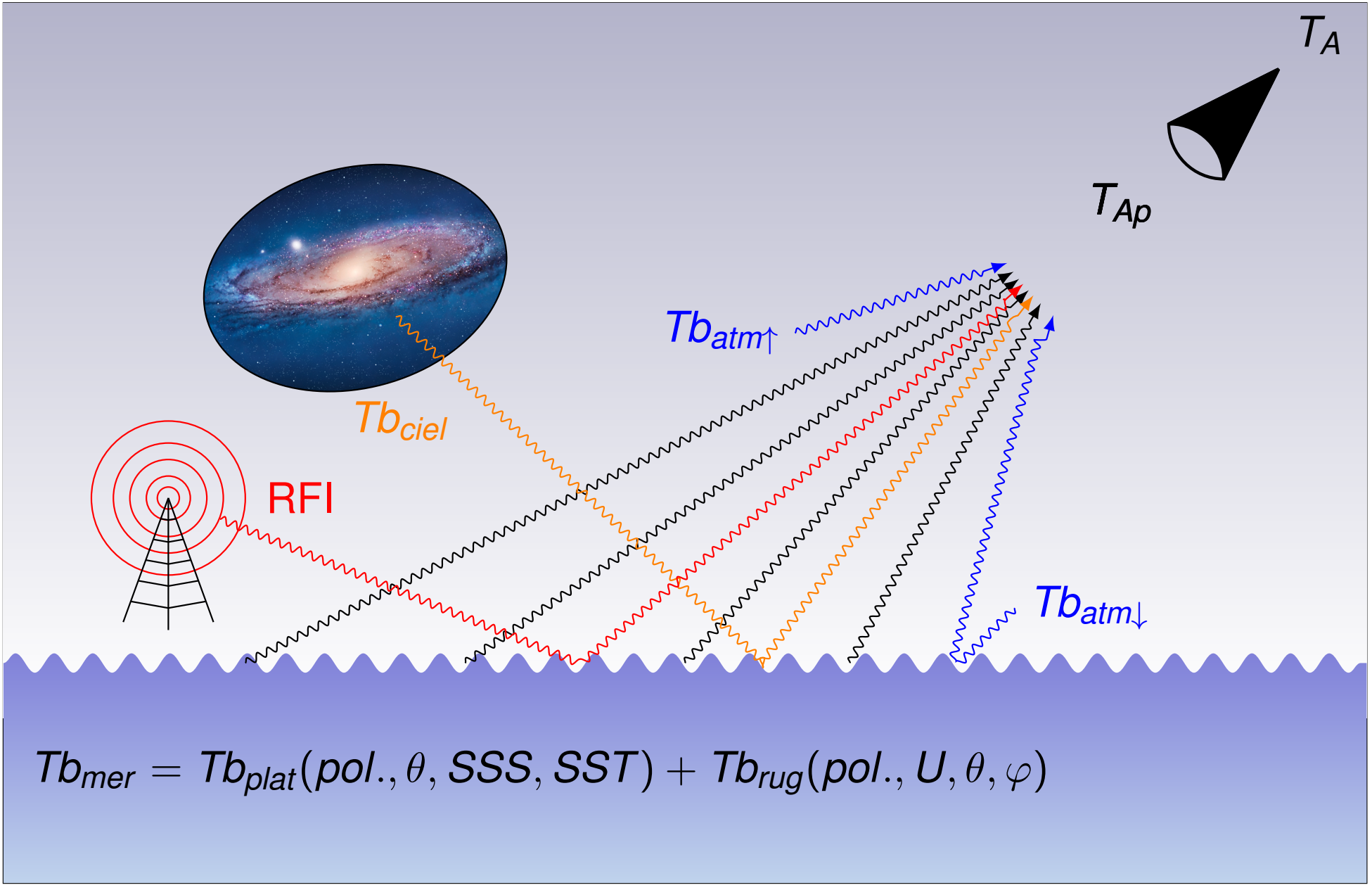


$Tb_{atm\uparrow}$

Tb_{ciel}

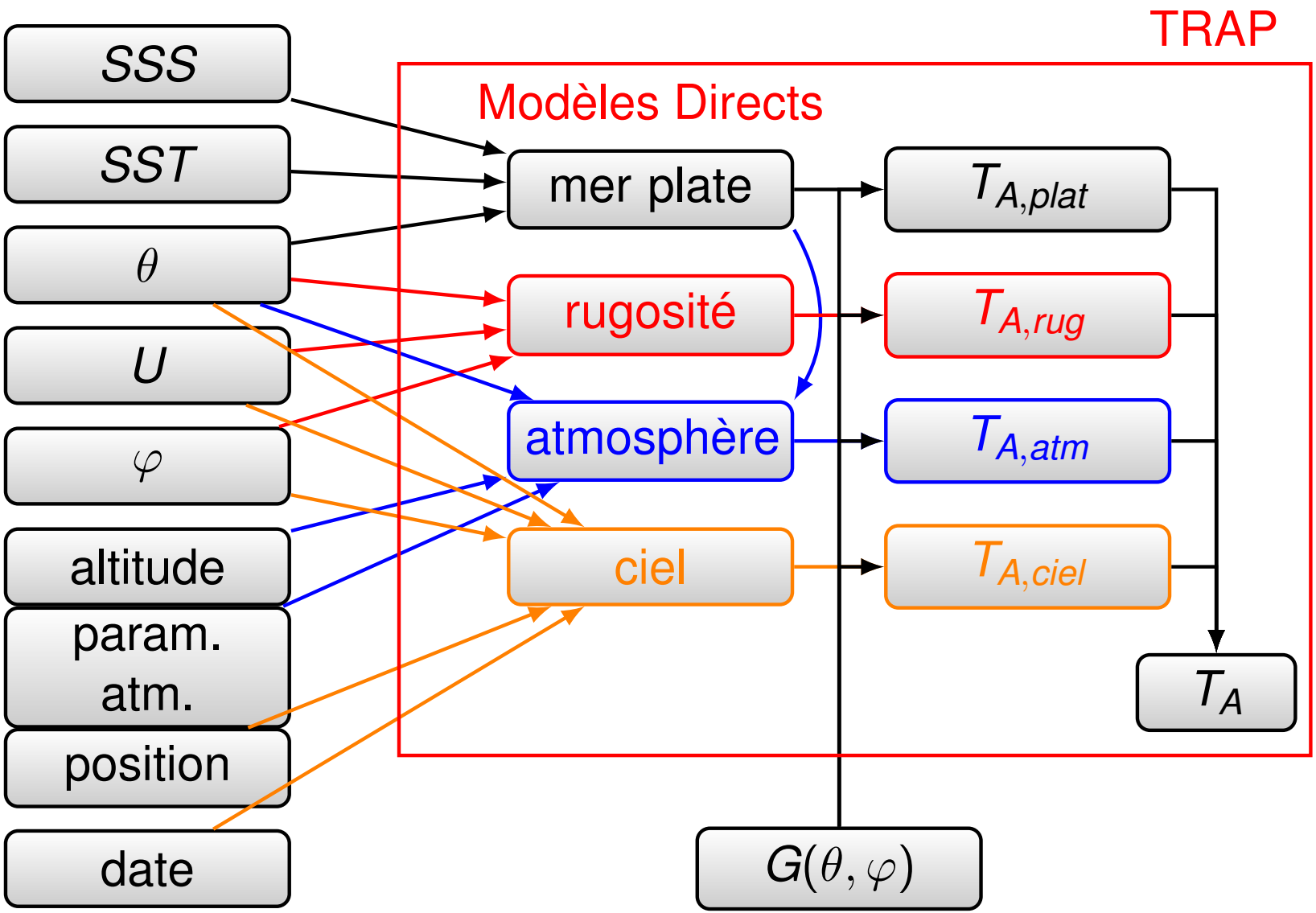
$Tb_{atm\downarrow}$

$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$



$$Tb_{mer} = Tb_{plat}(pol., \theta, SSS, SST) + Tb_{rug}(pol., U, \theta, \varphi)$$

TRAP


TRAP
Modèles Directs
SSS
SST
θ
U
φ
altitude
param. atm.
position
date
mer plate
rugosité
atmosphère
ciel
$T_{A,plat}$
$T_{A,rug}$
$T_{A,atm}$
$T_{A,ciel}$
T_A
$G(\theta, \varphi)$

Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

CAROLS — Radiomètre en bande-L

CAROLS OMT

Antenne CAROLS

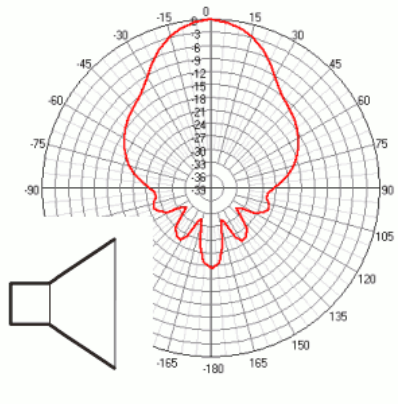
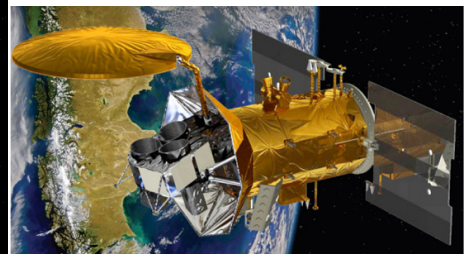


Diagramme d'Antenne

CAROLS (dérivé de EMIRAD) [Zribi et al., 2011]

- Grande Sensibilité : 0.1 K pour 1 s d'intégration
- Grande Stabilité : meilleure que 0.1 K sur 15 min
- Étalonnage interne
- Antennes Potter (HPBW 38˚)

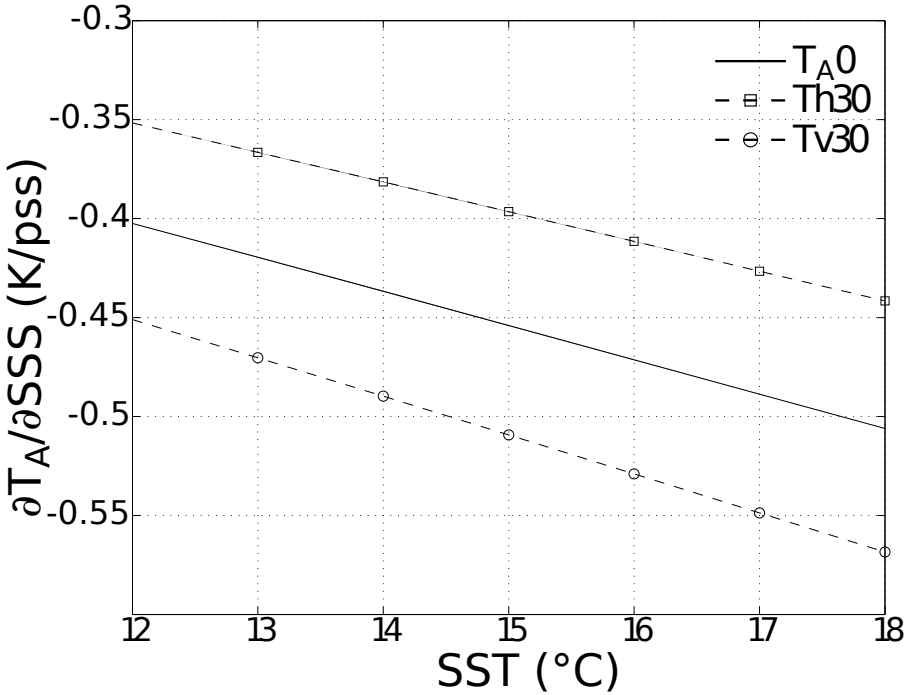
CAROLS et les Missions Spatiales

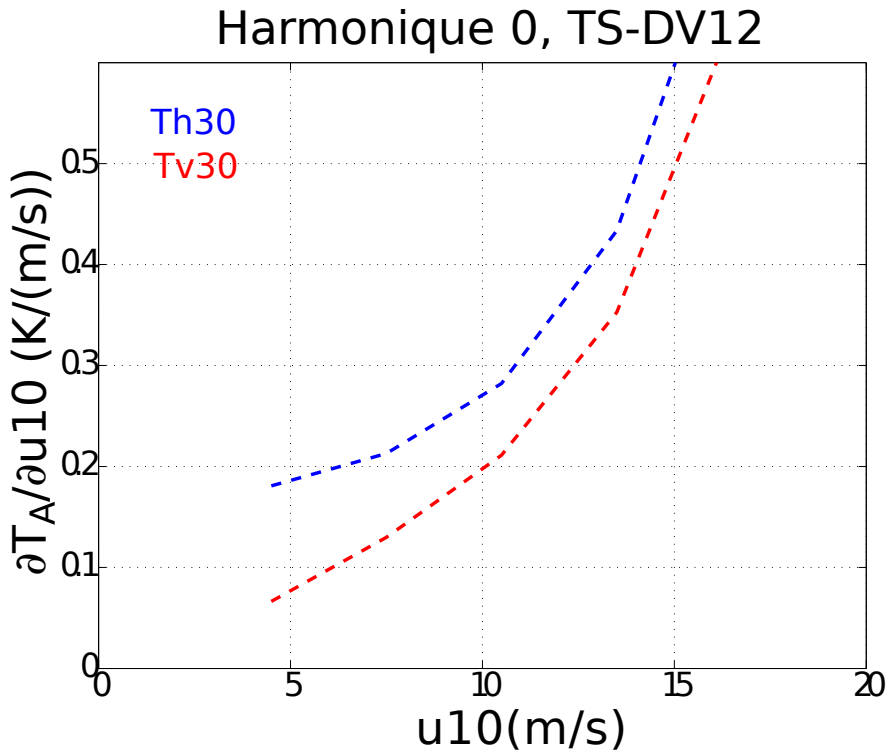


	CAROLS/(STORM)	SMOS	Aquarius
Antennes	réelle (lobe 38˚)	interférométrique	réelle
Particularité	(actif)/passif	multi-incidence	actif/passif
Angles d'incidence	(0˚) 33˚	0˚ à 60˚	29˚,38˚ et 46˚
Rés. radiométrique	0.1K (1s)	1.8K à 3K (1.2s)	0.06K (5.8s)

Sensibilité à la SSS et au vent

Antennes CAROLS





POLARISATION

- V plus sensible à la SSS ;
- H plus sensible au Vent.

$1\,\mathrm{K} \approx 2\,\mathrm{pss} \approx 5\,\mathrm{m/s}$;

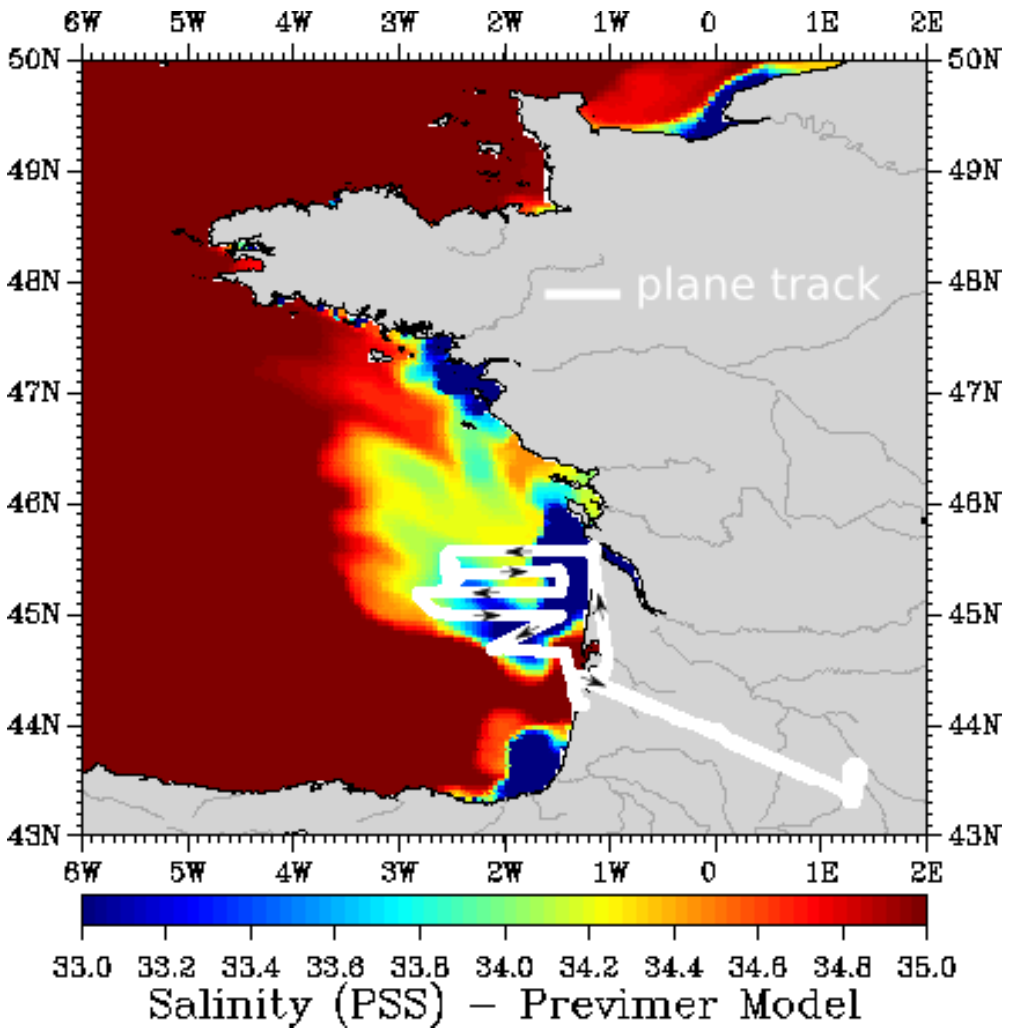
Deux Études des Mesures CAROLS

	Télédétection de la SSS	Contribution de la rugosité sur la T_A
vols	Vol côtier Mai 2009	4 vols en Nov. 2010
SSS	26-35 pss	35.3-35.8 pss
Vent	5-7 m/s QuickSCAT	5-15 m/s STORM
SST	15-17˚C	12.5-15.5˚C
Instrument	CAROLS 0˚ + 30˚	CAROLS 30˚ + STORM
Étalon. Interne	Charge 318 K + Diode de Bruit (on/off)	Charge 318 K et 54 K

Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

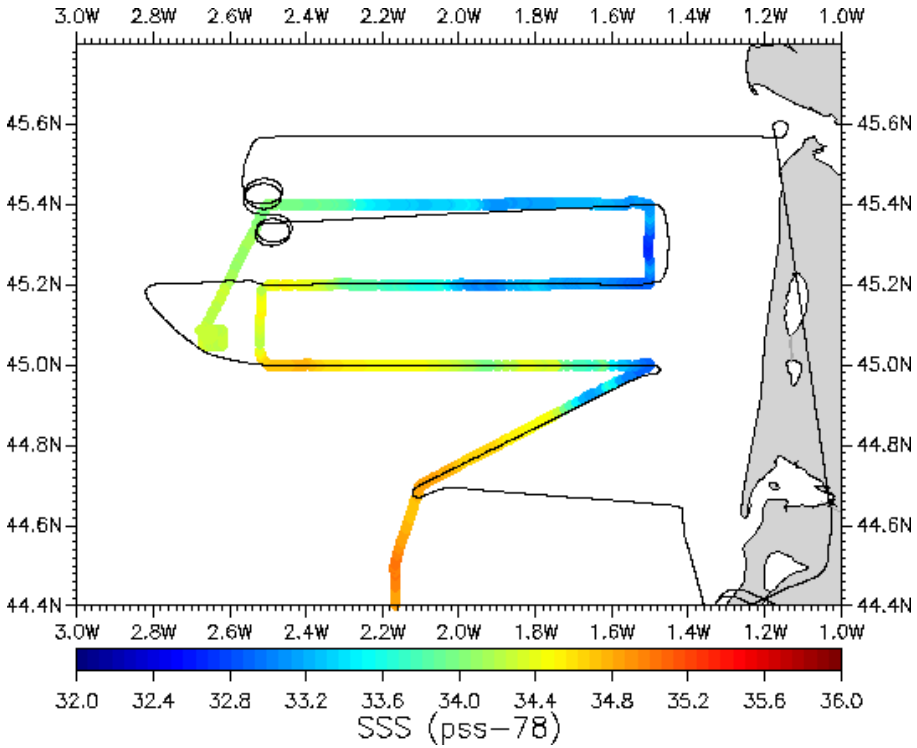
Vol Côtier



Configuration

- 600m d'altitude
- 2 antennes : Nadir + 30˚
- 2 polarisations : V et H

[Martin et al., 2012]



Mesures in situ

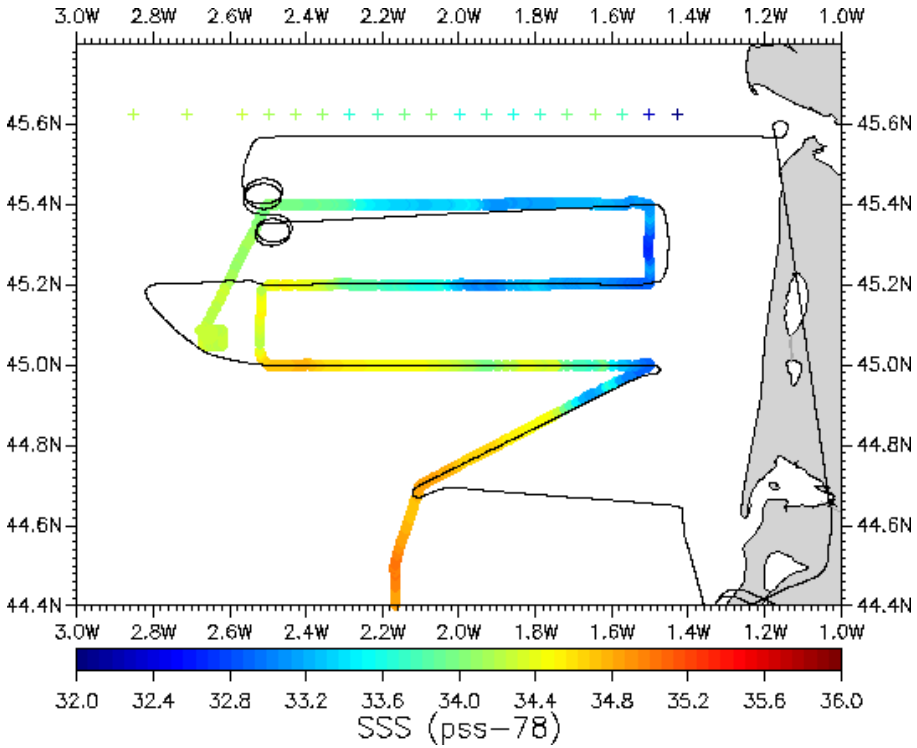
- RV Antea — TSG
- RV Investigador — CTD

⇒ SSS de référence sous la trace de l'avion

[coll. Reverdin]

Conditions Géophysiques

Salinité de Surface

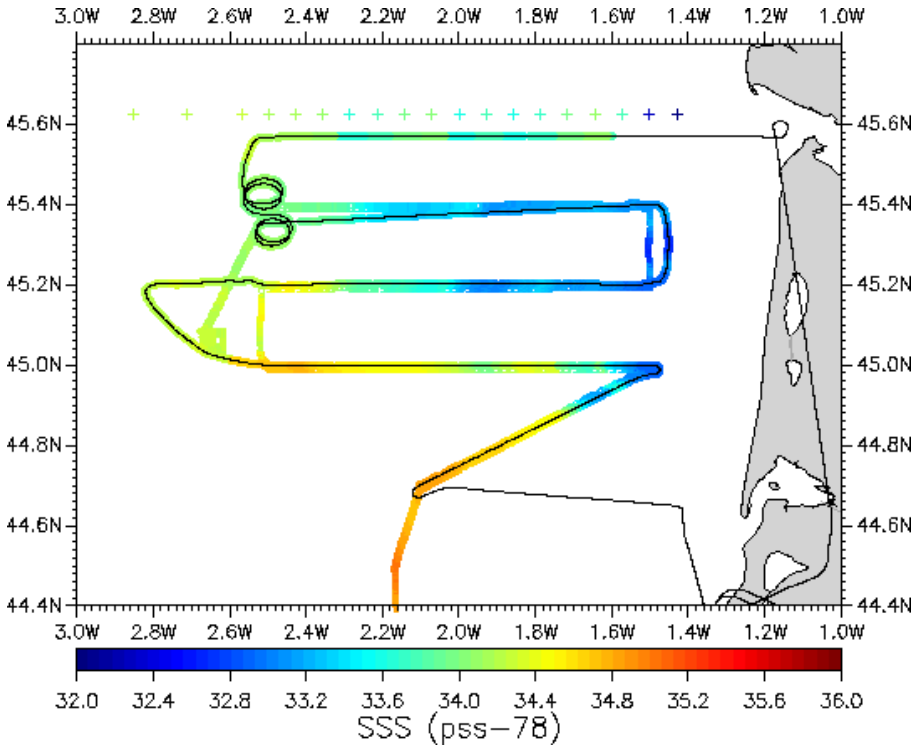


Mesures in situ

- RV Antea — TSG
- RV Investigador — CTD

⇒ SSS de référence sous la trace de l'avion

[coll. Reverdin]



Mesures in situ

- RV Antea — TSG
- RV Investigador — CTD

$\Rightarrow$ SSS de référence sous la trace de l'avion

[coll. Reverdin]

Approche Directe et Inverse

Approche Directe

Modélisation du signal reçu par l'instrument fonction de :

- caractéristiques de l'instrument ;
- paramètres géophysiques (propriétés de la surface).

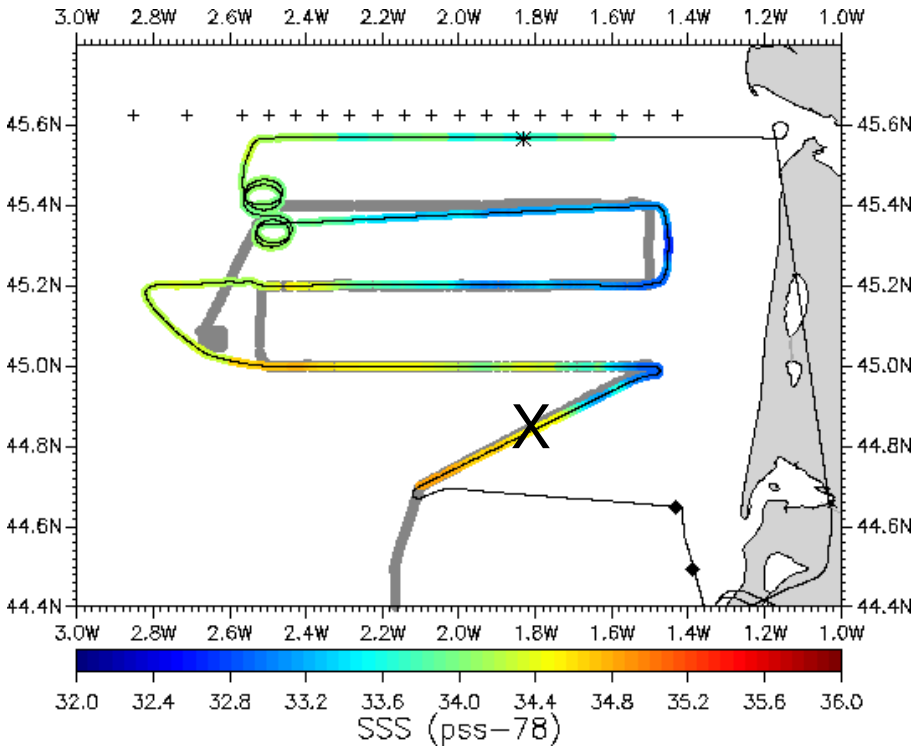
Approche Inverse

Détermination des paramètres géophysiques à partir des mesures de l'instrument et connaissance a priori

- inversion SSS seule
- inversion multi-paramétrique

T_A Mesurée et Modélisée

au Point de Croisement



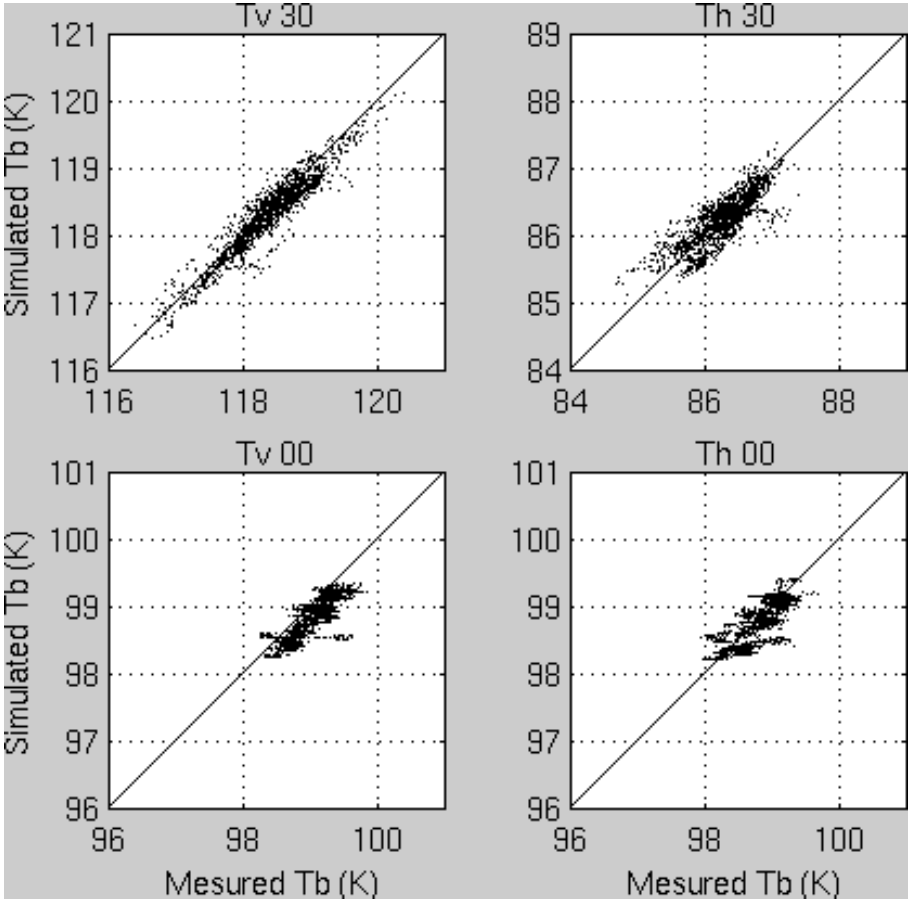
SSS de référence

SSS_{ANTEA}	SST_{ANTEA}	U_{ANTEA}
33.7 pss-78	16.5˚C	7.3 m/s

Ant.	Pol.	$T_A^{meas}(K)$	ΔT_A (K)
Nadir	V	99.5	+0.4
	H	99.6	+0.5
30˚	V	117.7	-0.5
	H	86.3	-0.4

T_A Mesurée vs. Modélisée

sur tout le Vol avec la SSS de Référence



Statistiques

Ant.	Pol.	$rms(\Delta T_A)$ (K)	R
Nadir	V	0.30	0.86
Nadir	H	0.21	0.80
30°	V	0.18	0.96
30°	H	0.22	0.84

$$\Delta T_A = T_A^{meas} - T_A^{mod}$$

Bons résultats des modèles directs, permettent d'envisager l'inversion de la SSS

Approche Inverse

Inversion Unique — Sensibilité à la SSS

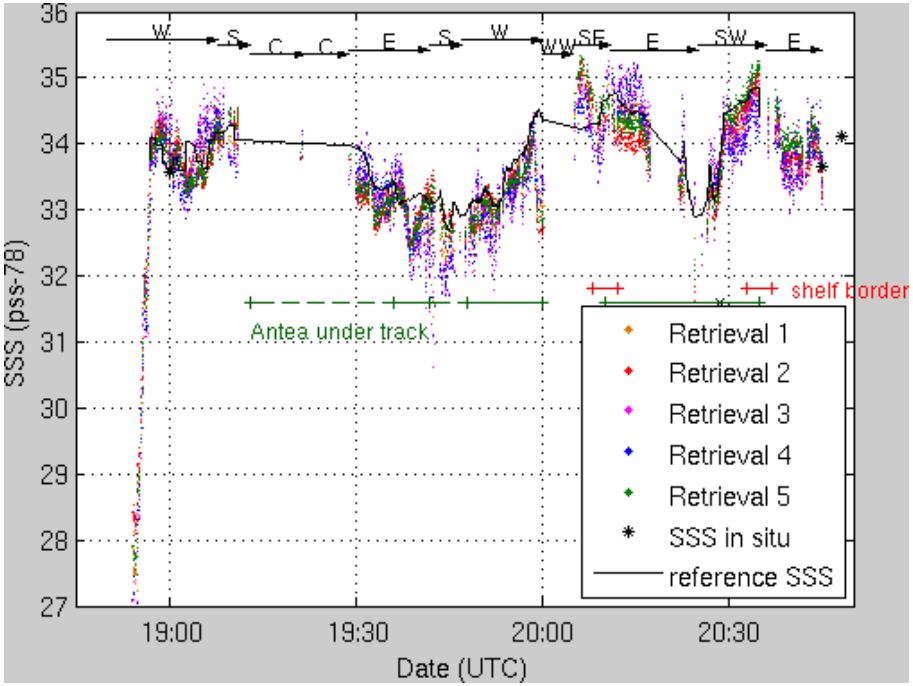
$$\Delta T_{A_i} = T_{A_i}^{meas} - T_A^{mod}\left(U, SST, SSS = 34\right),$$

$$SSS_i = 34 + \frac{dSSS}{dT_A}.\Delta T_{A_i}.$$

Inversion Multi-Paramétrique — Minimisation Fonction de Coût

$$\chi^2 = \sum_i \frac{\left(T_{A_i}^{meas} - T_{A_i}^{mod}\right)^2}{\sigma_{T_A}^2} + \frac{\left(SSS^{ret} - SSS^{prior}\right)^2}{\sigma_{SSS}^2} + \frac{\left(U^{ret} - U^{prior}\right)^2}{\sigma_U^2}.$$

SSS Inversée vs. SSS de Référence

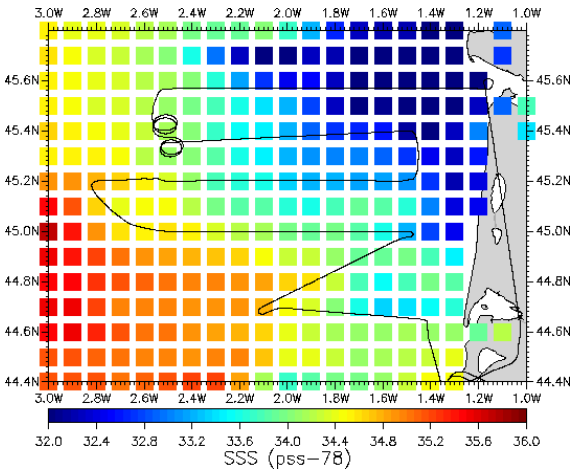


N°	Type	T_A bias correction	σ_{T_A} (K)	ΔSSS (pss)	$rms(\Delta SSS)$ (pss)	R
1	Unique – Tv30	Oui	–	-0.15	0.36	0.88
2	Unique	Oui	–	-0.23	0.40	0.86
3	Multi – Côté	Oui	0.15	-0.15	0.46	0.83
4	Multi	Oui	0.15	-0.20	0.45	0.83
5	Multi	Non	1	-0.15	0.33	0.90

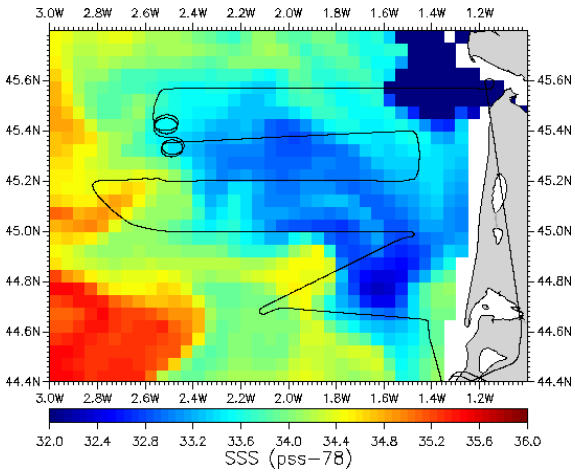
$$\Delta SSS = SSS_{inverse} - SSS_{reference}$$

Salinité de Surface : Intercomparaison

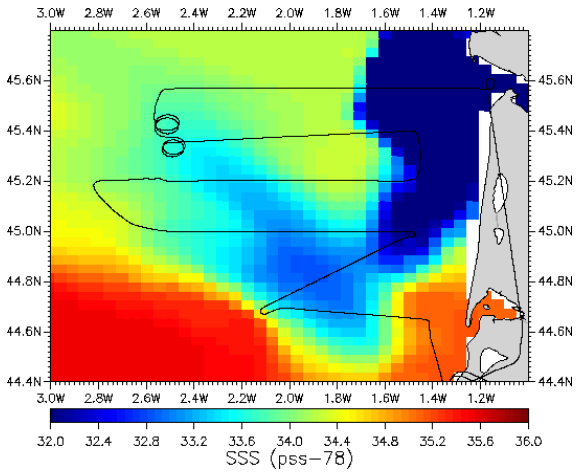
Vol Côtier
20 Mai, 18 :50–21 :45



11–31 Mai 2009
Analyse Objective
mesures in situ
[Reverdin et al., 2013]



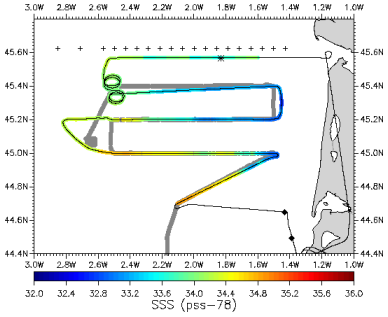
20 Mai 2009, 18h30
IBI (Mercator 1/36)
Modèle de circulation océanique avec décharge des rivières climatologique
[Cailleau et al., 2010]



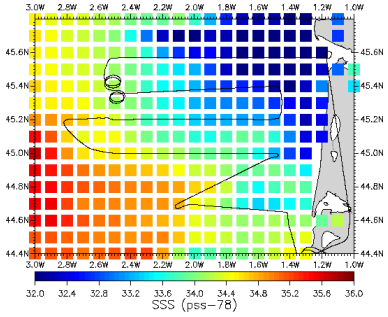
20 Mai 2009, 19h
Mars 3D
Modèle de circulation océanique avec observation quotidienne des décharges des rivières
[Lazure and Jégou, 1998]

SALINITÉ DE SURFACE : INTERCOMPARAISON

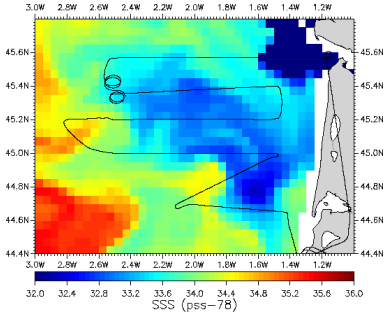
SSS de référence



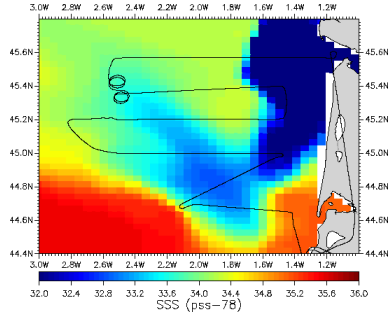
Analyse Objective

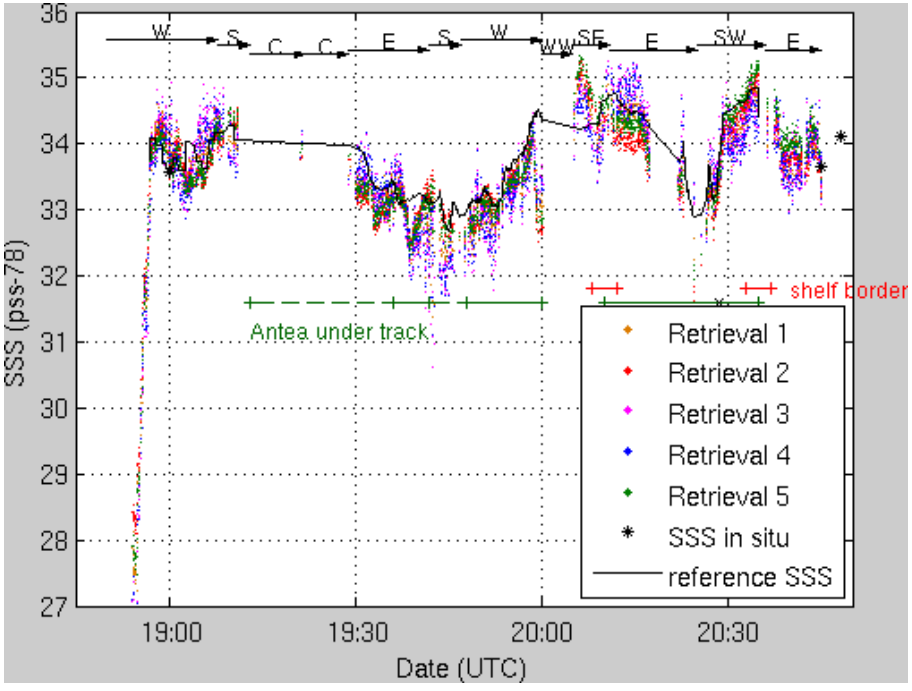


IBI

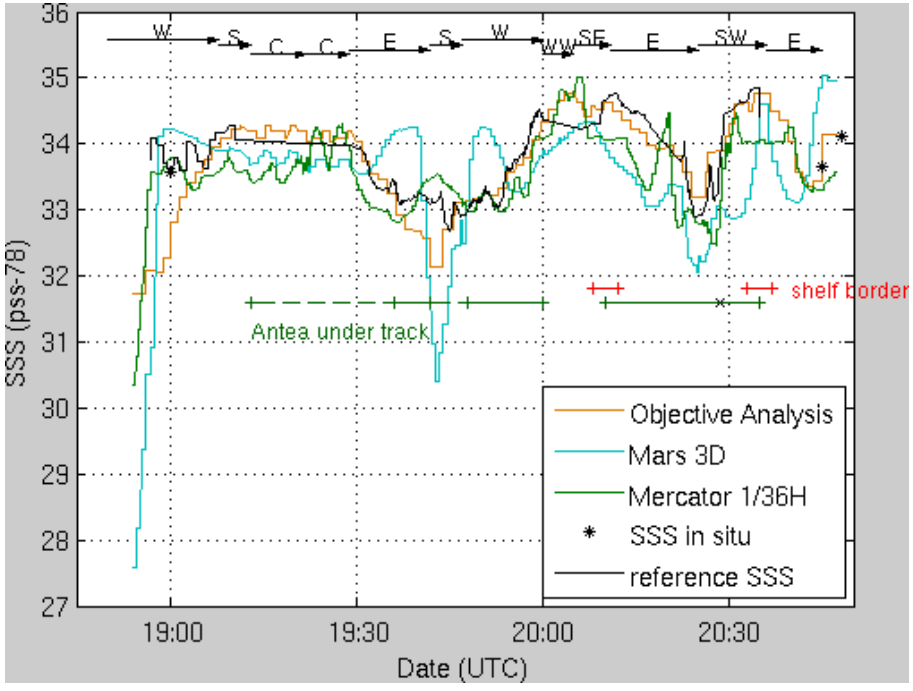


Mars 3D





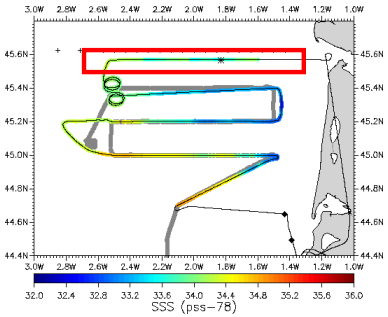
SSS CAROLS



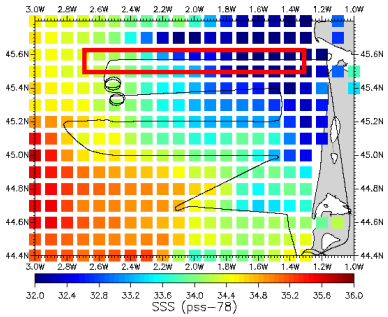
SSS in situ et modèle

SALINITÉ DE SURFACE : INTERCOMPARAISON

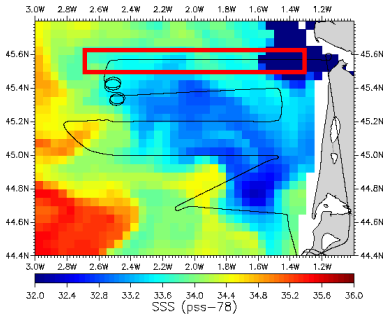
SSS de référence



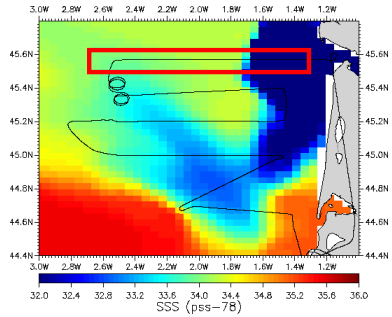
Analyse Objective

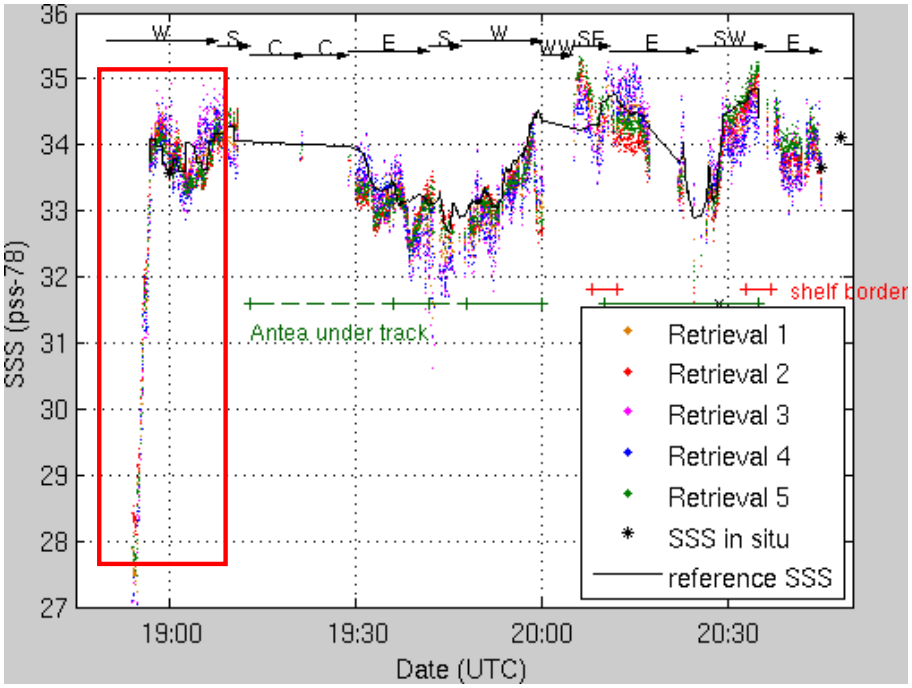


IBI

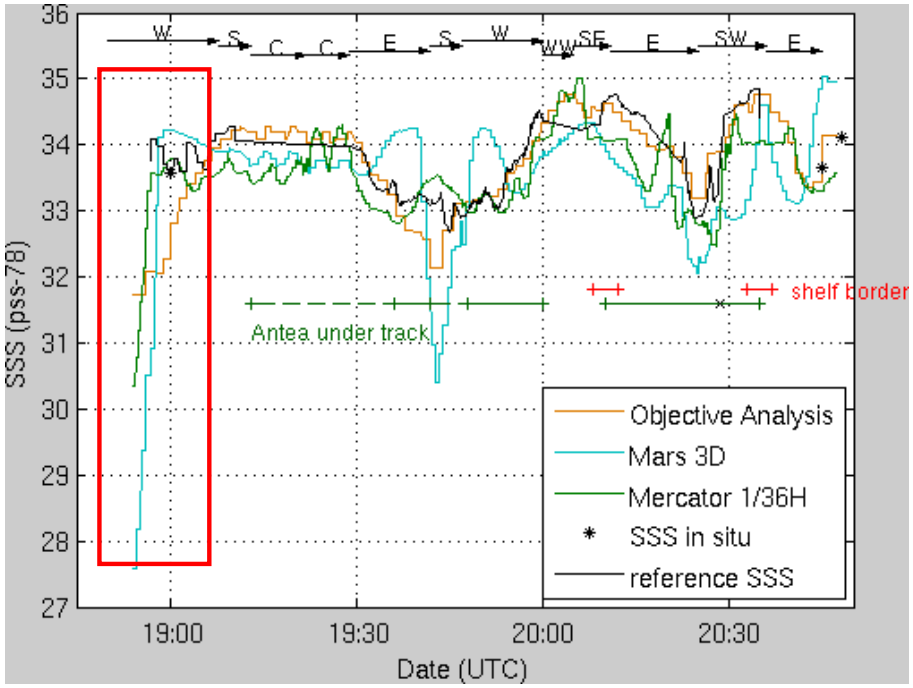


Mars 3D





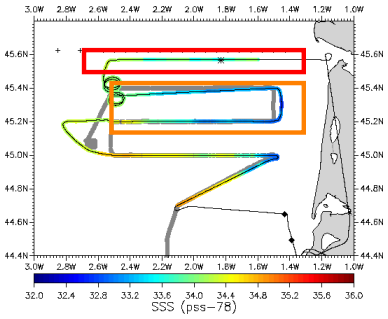
SSS CAROLS



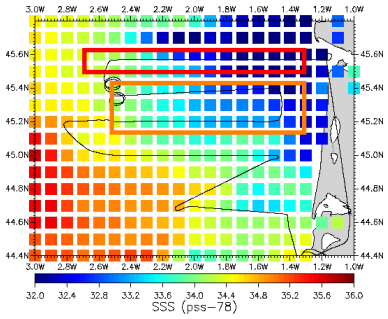
SSS in situ et modèle

SALINITÉ DE SURFACE : INTERCOMPARAISON

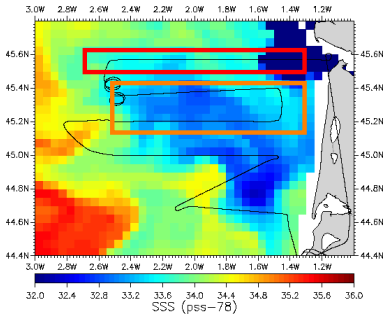
SSS de référence



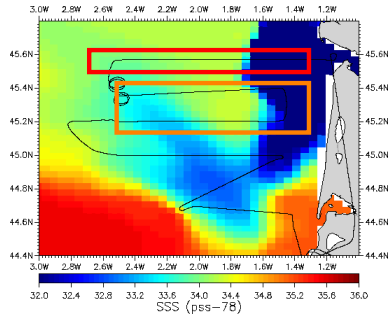
Analyse Objective

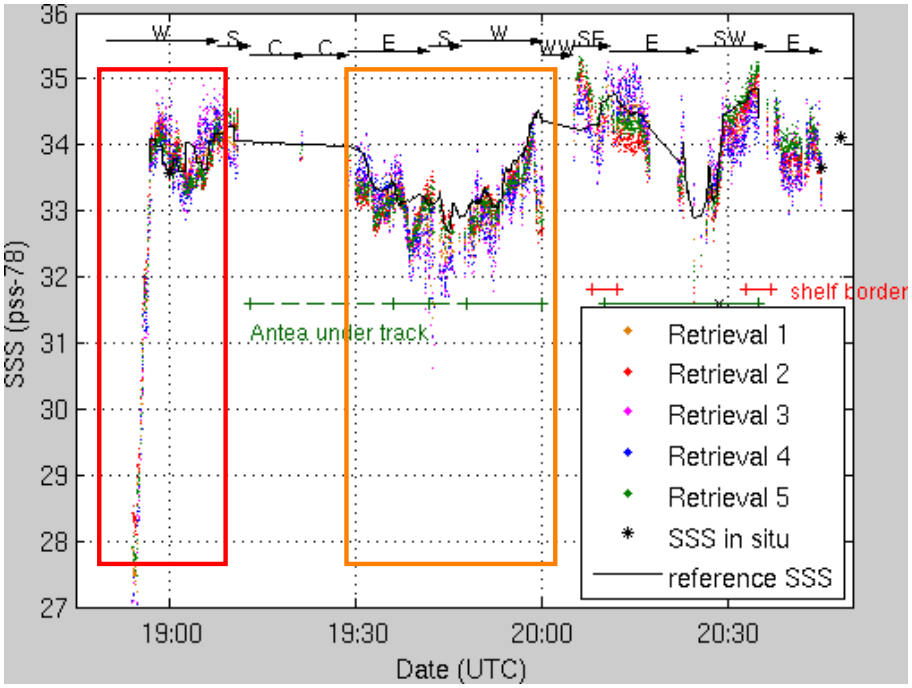


IBI

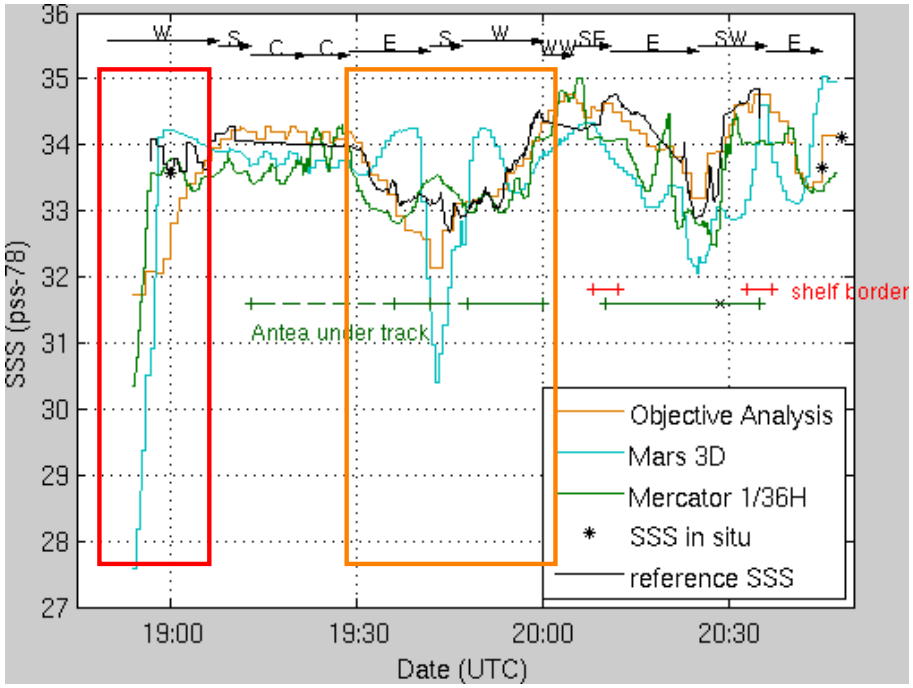


Mars 3D





SSS CAROLS



SSS in situ et modèle

Conclusions de l'Étude

Résumé

- SSS radiométrique à ≈ 0.3 pss ;
- SSS des modèles océaniques > 0.4 pss ;
- Mesures CAROLS permettent une vue quasi-instantanée de la SSS.

Précision attendue (bruit rad.) 0.15 pss :

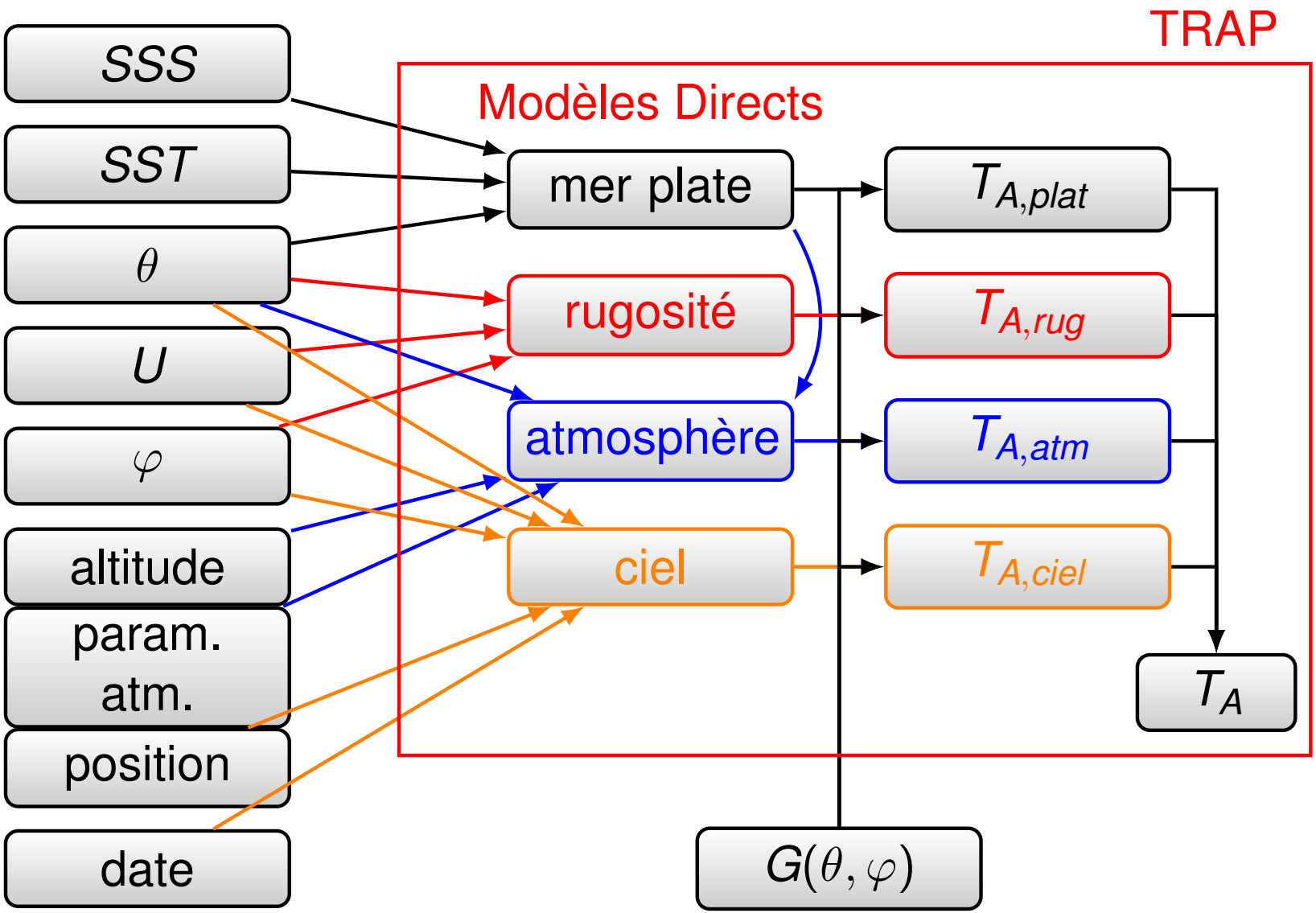
=> erreur sur la SSS de référence ;

=> mauvaise prise en compte de la contribution de la rugosité sur le signal radiométrique.

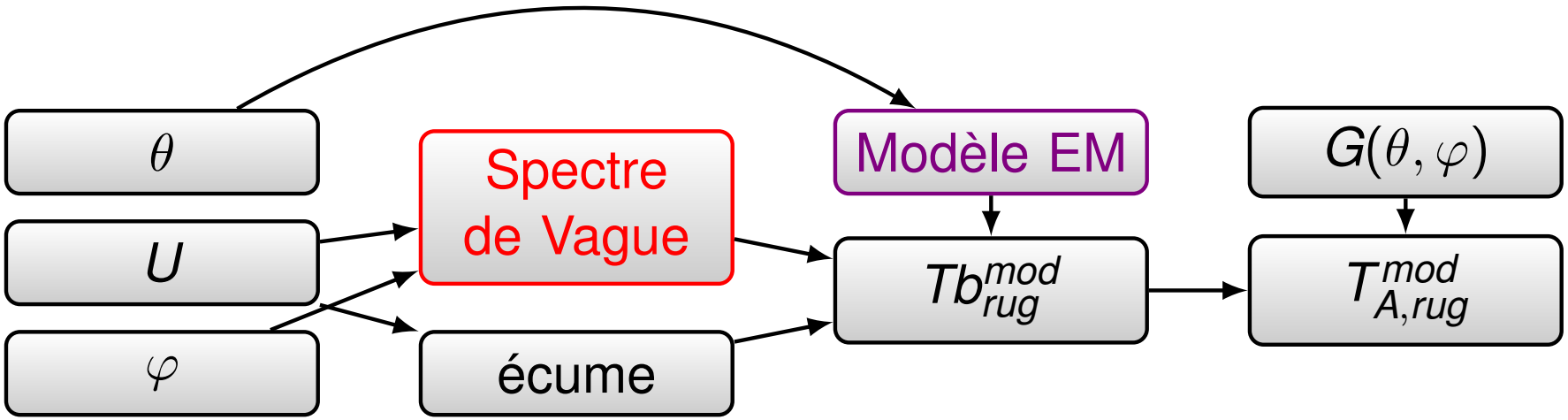
Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

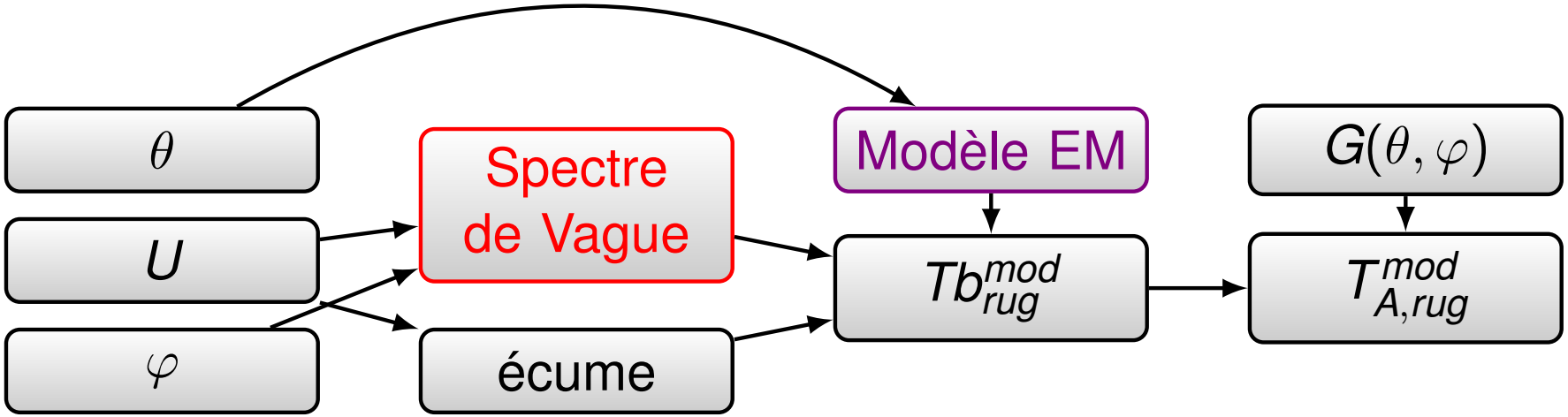
Contribution de la Rugosité à la T_A



Contribution de la Rugosité à la T_A



Contribution de la Rugosité à la T_A



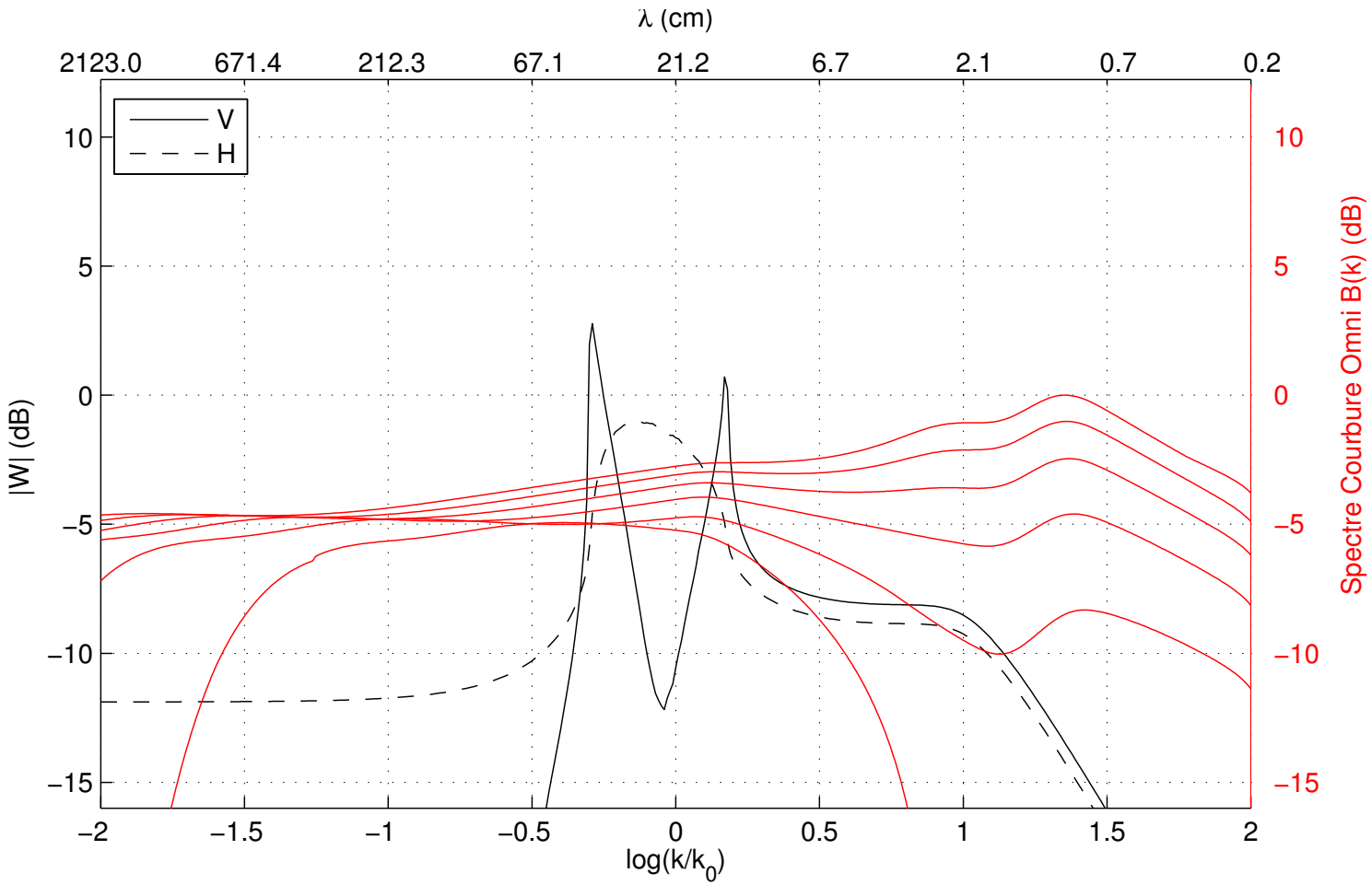
Composante Omnidirectionnelle — Modèle SPM2/SSA

$$Tb^{mod}_{rug,0} = -SST \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{W_0(\theta_i, k/k_0)}_{\text{fct poids}}. \underbrace{C_0(k)}_{\text{Spectre Vague}} .d(\log(k/k_0))$$

k_0 nombre d'onde du radiomètre, k nombre d'onde des vagues.

Contribution de la Rugosité à la T_A

$$Tb^{mod}_{rug,0} = -SST \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{W_0(\theta_i, k/k_0)}_{\text{fct poids}} . \underbrace{C_0(k)}_{\text{Spectre Vague}} .d(\log(k/k_0))$$



$\theta = 30^{\circ}$

Modèles Radiométriques de Rugosité — $T_{A,rug}^{mod}$

Modèles pré-lancement

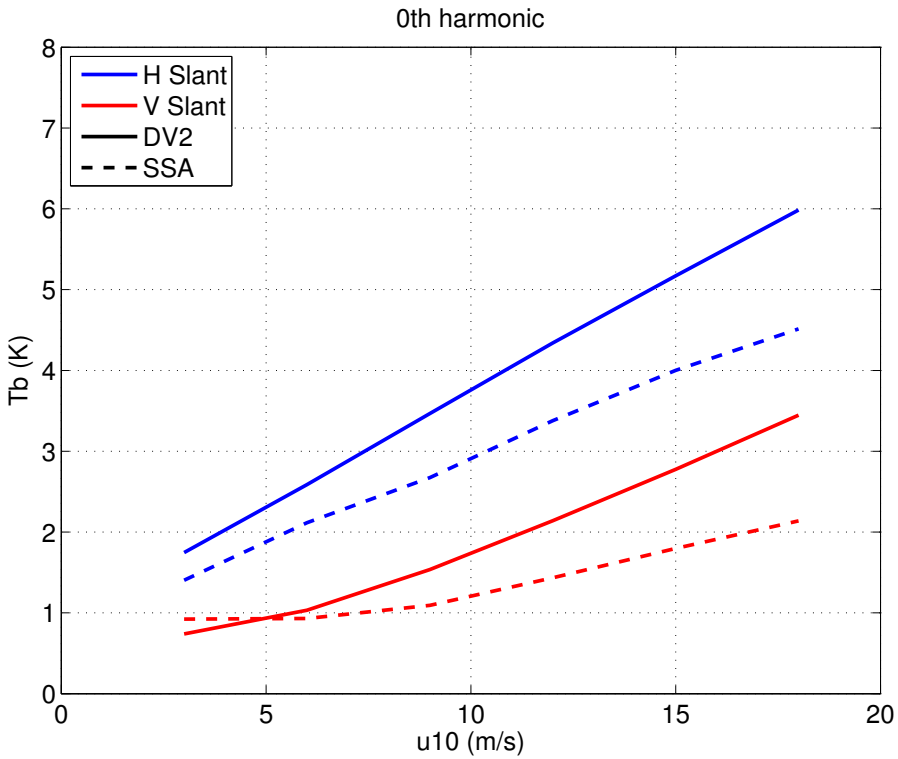
TS-DV2 — pre-lancement SMOS M1 [Dinnat et al., 2003] ;
modèle deux-échelles ; Spectre Durden & Vesecky spectrum $x2$
SSA-KHCC — pre-lancement SMOS M2 [Johnson and Zhang, 1999] ;
modèle SPM2/SSA ; Spectre Kudryatsev.

Nouveaux modèles ajustés aux mesures satellitaires

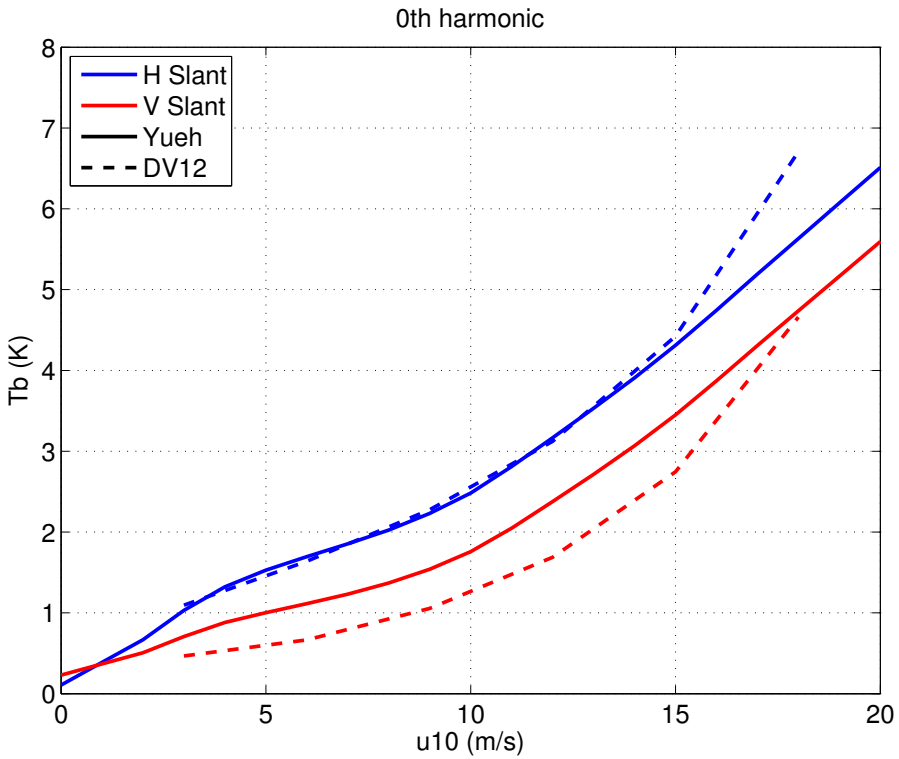
Yueh — Modèle Aquarius (pers. com.) ;
modèle empirique (non integré sur le lobe d'antenne) ;
TS-DV12 — SMOS Modèle 1 [Yin et al., 2012] ;
modèle deux-échelles ; Spectre Durden & Vesecky $x1.25$ + modèle d'écume ajusté ;

Modèles Radiométriques de Rugosité — $T_{A,rug}^{mod}$

Composante Omnidirectionnelle



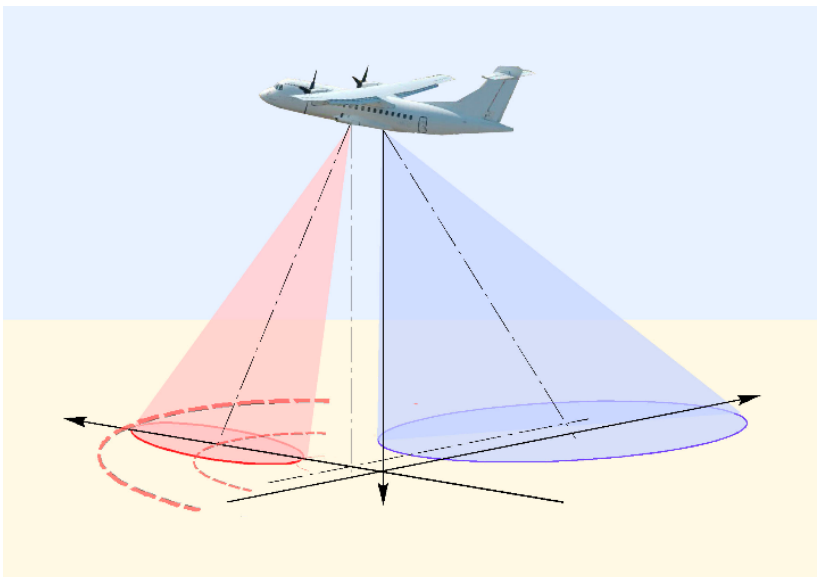
Pré-lancement

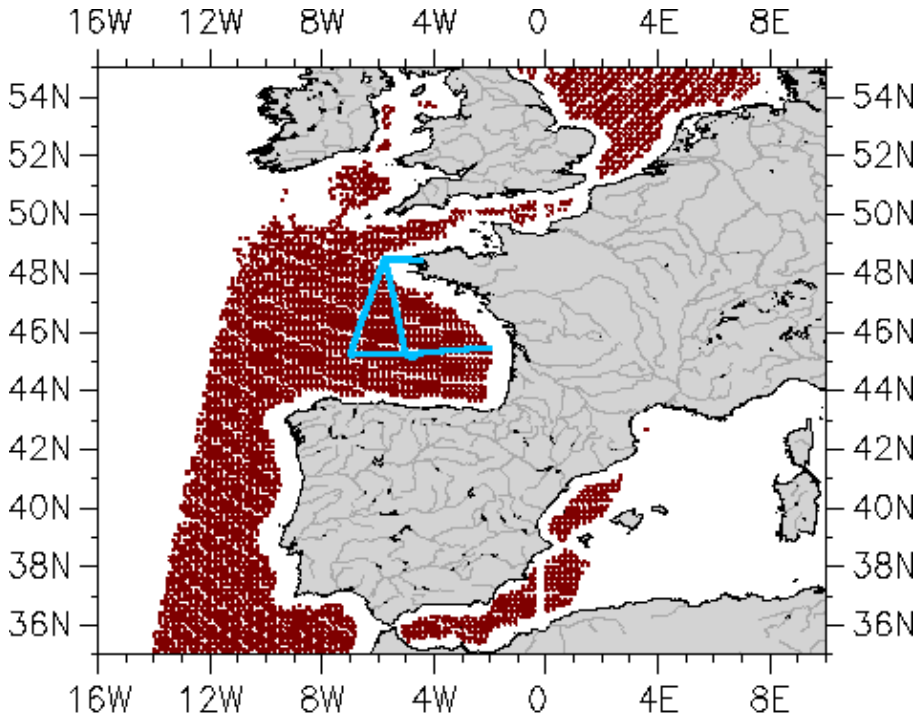


Nouveaux

Contribution de la Rugosité à la T_A Mesurée

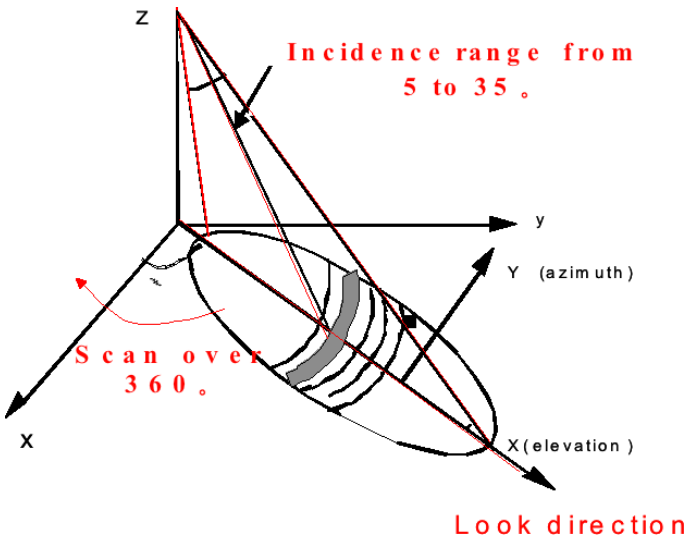
Campagne Aéroportée de Novembre 2010

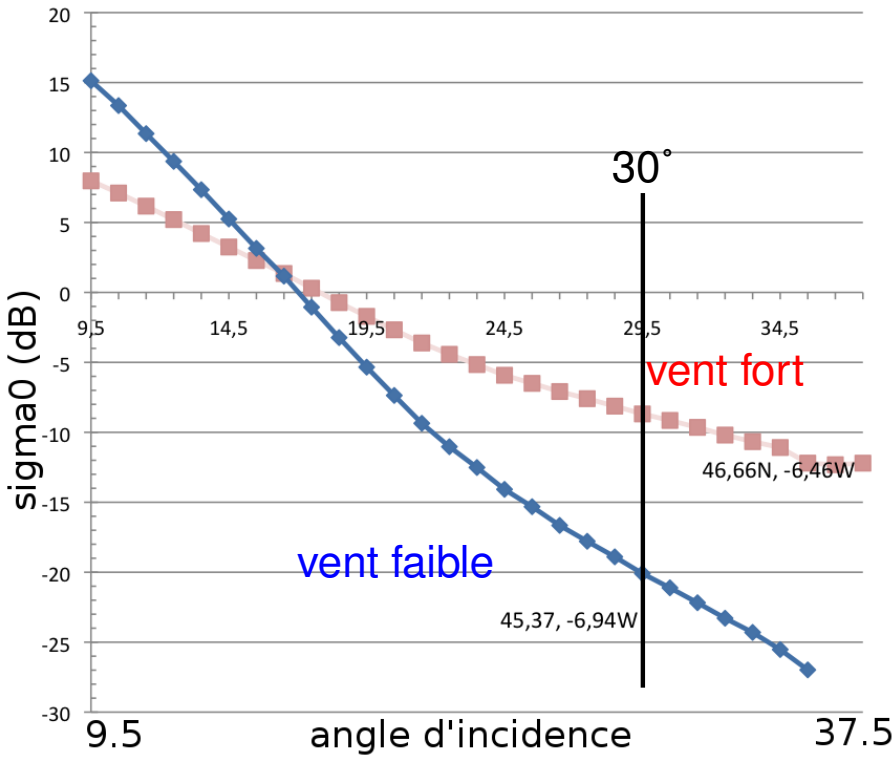




Novembre 2010 — Golfe de Gascogne

STORM — Diffusiomètre en Bande-C (5cm)





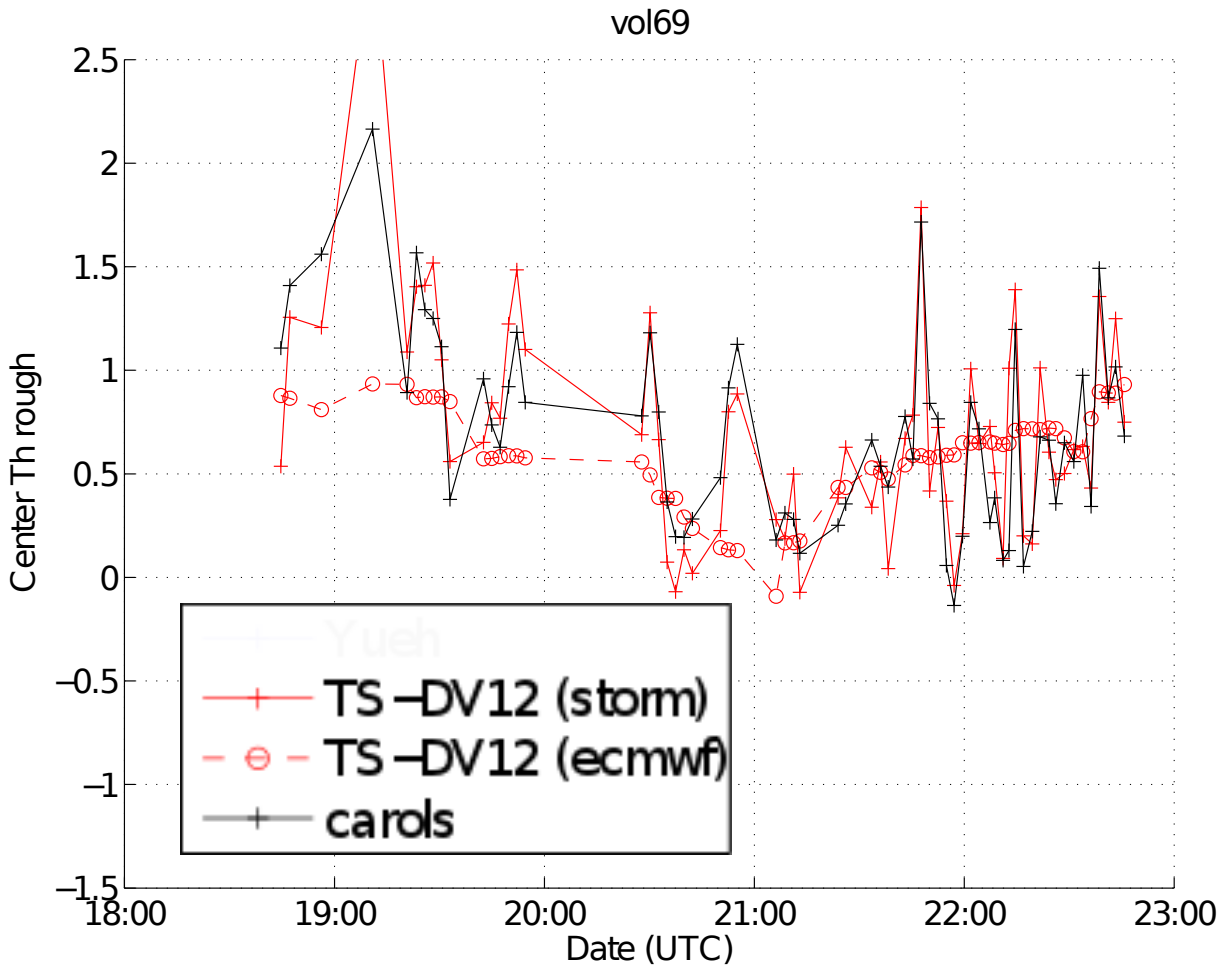
- Radar en bande-C (5.6 cm)
- Antenne tournante (360 °/min)
- Angle d'incidence de 5 à 35°

Vent STORM à 30° : sensible aux vagues de 5-6 cm.

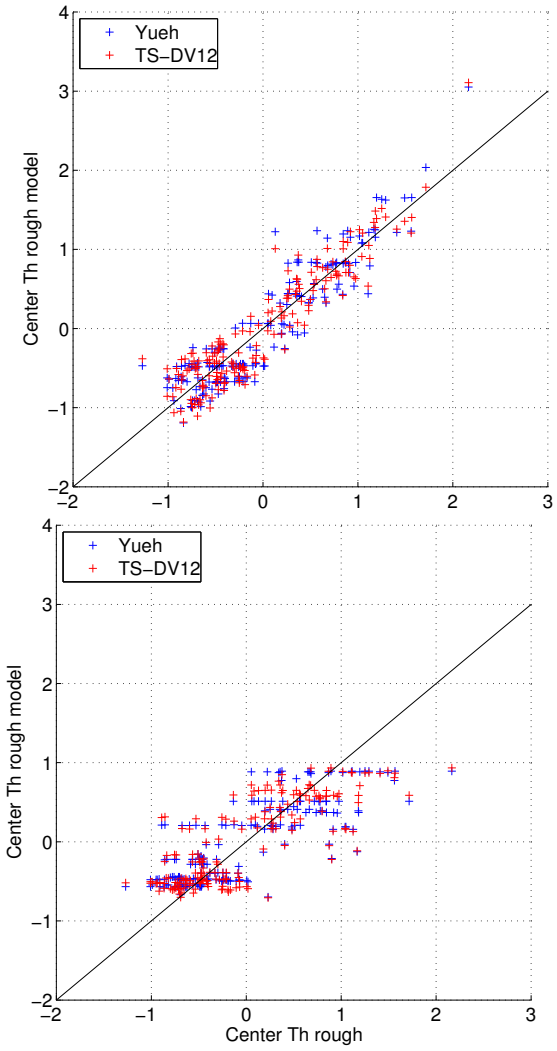
$T_{A,rug}$ Modélisée et Mesurée — vol 69

Contribution de la Rugosité sur T_A^{mes}

$$T_{A,rug}^{mes} = T_{A,CAROLS} - T_A(\text{mer plate})$$



$T_{A,rug}$ Modélisée et Mesurée — Nov. 2010



STORM

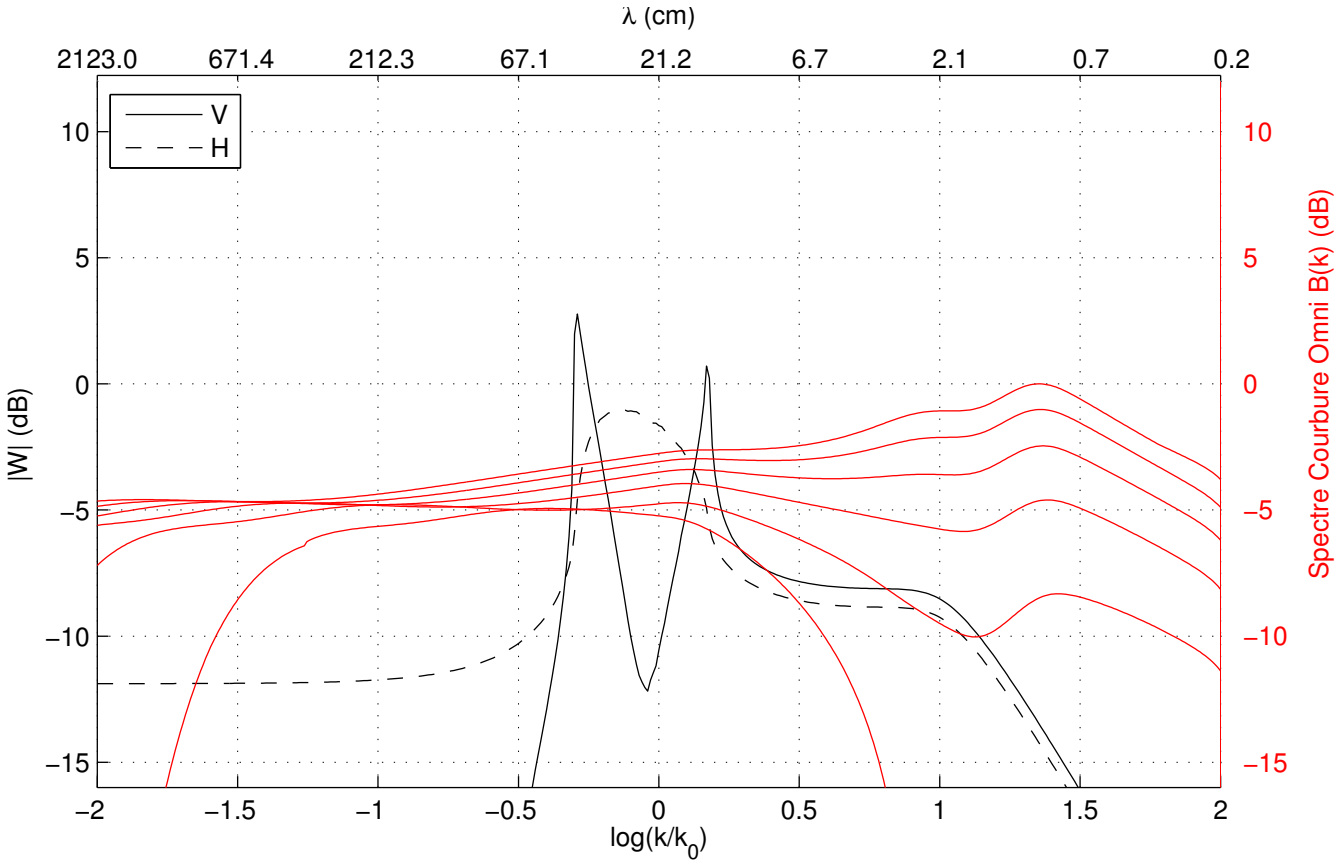
	Corrélation		rms error (K)	
	H	V	H	V
Yueh	0.92	0.91	0.29	0.25
TS-DV12	0.92	0.91	0.27	0.21
TS-DV2	0.91	0.90	0.31	0.22
SSA-KHCC	0.88	0.70	0.32	0.37

ERA Interim

	Corrélation		rms error (K)	
	H	V	H	V
Yueh	0.79	0.72	0.43	0.35
TS-DV12	0.79	0.73	0.42	0.35
TS-DV2	0.78	0.72	0.45	0.35
SSA-KHCC	0.73	0.45	0.48	0.46

- Apport des mesures STORM
- Amélioration des nouveaux modèles de rugosité

Influence des Différentes Échelles de Rugosité



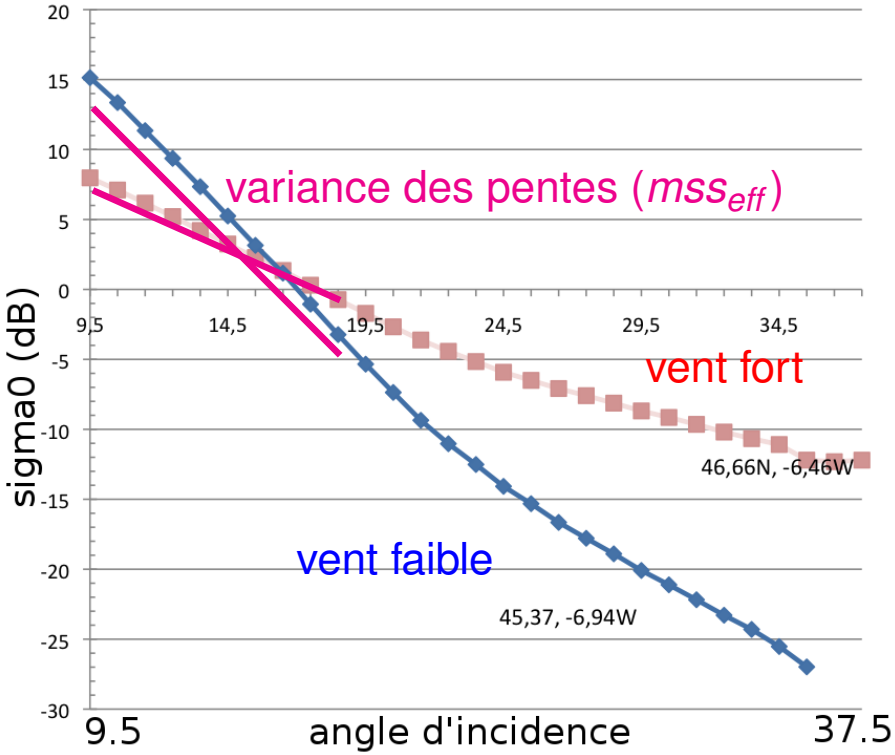
- Signal radiométrique sensible à de nombreuses échelles de rugosité ;
- Vent STORM à 30˚, sensible aux vagues de 5 cm ;

=> Influence des plus grandes échelles ?

APPROXIMATION OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

$$\sigma^0(\theta) = |R(0)|^2 \pi \frac{p(s_x, s_y)}{\cos^4\theta}$$

$$\sigma^0(\theta) = \frac{|R(0)|^2}{\cos^4\theta} \cdot \frac{1}{2\sigma_{up}\sigma_{cr}} \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{2mss}\right)$$



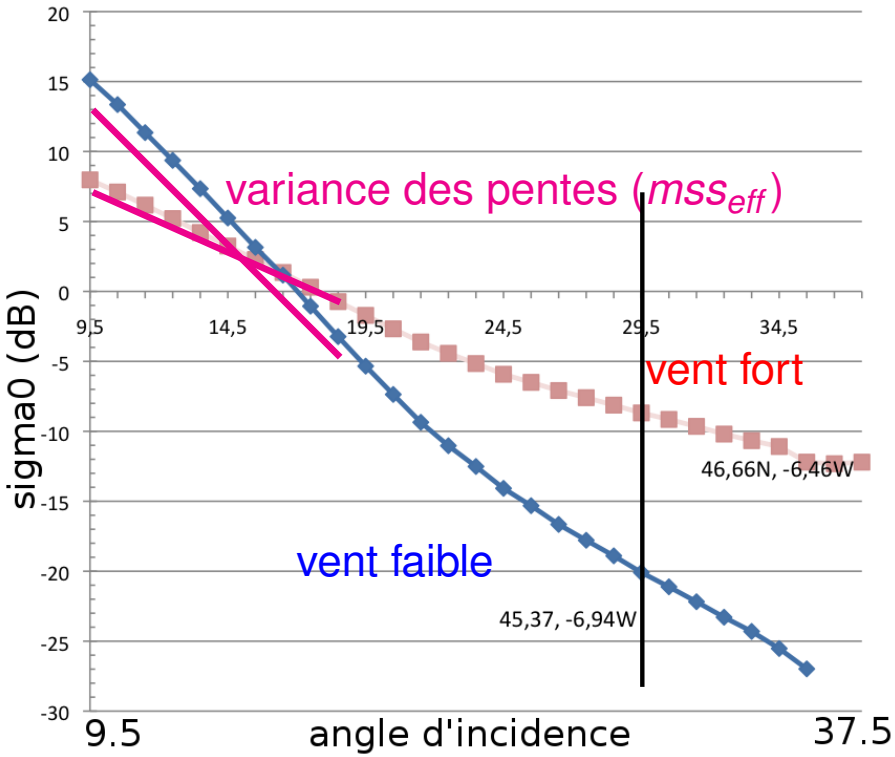
SENSIBILITÉ AUX LONGUEURS D'ONDE DES VAGUES

- mss_{eff} sensible aux vagues ($\lambda_{vague} > 12$ cm) ;
- Vent à 30° : $\lambda_{vague} \approx \lambda_{Bragg}$ (5 cm).

APPROXIMATION OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

$$\sigma^0(\theta) = |R(0)|^2 \pi \frac{p(s_x, s_y)}{\cos^4\theta}$$

$$\sigma^0(\theta) = \frac{|R(0)|^2}{\cos^4\theta} \cdot \frac{1}{2\sigma_{up}\sigma_{cr}} \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{2mss}\right)$$



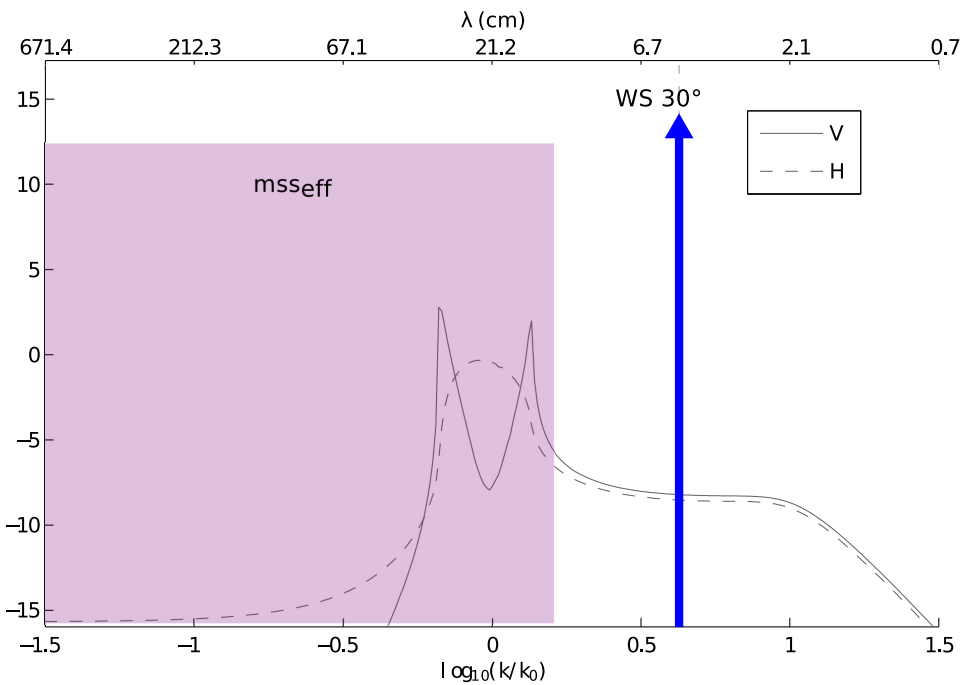
SENSIBILITÉ AUX LONGUEURS D'ONDE DES VAGUES

- mss_{eff} sensible aux vagues ($\lambda_{vague} > 12$ cm) ;
- Vent à 30° : $\lambda_{vague} \approx \lambda_{Bragg}$ (5 cm).

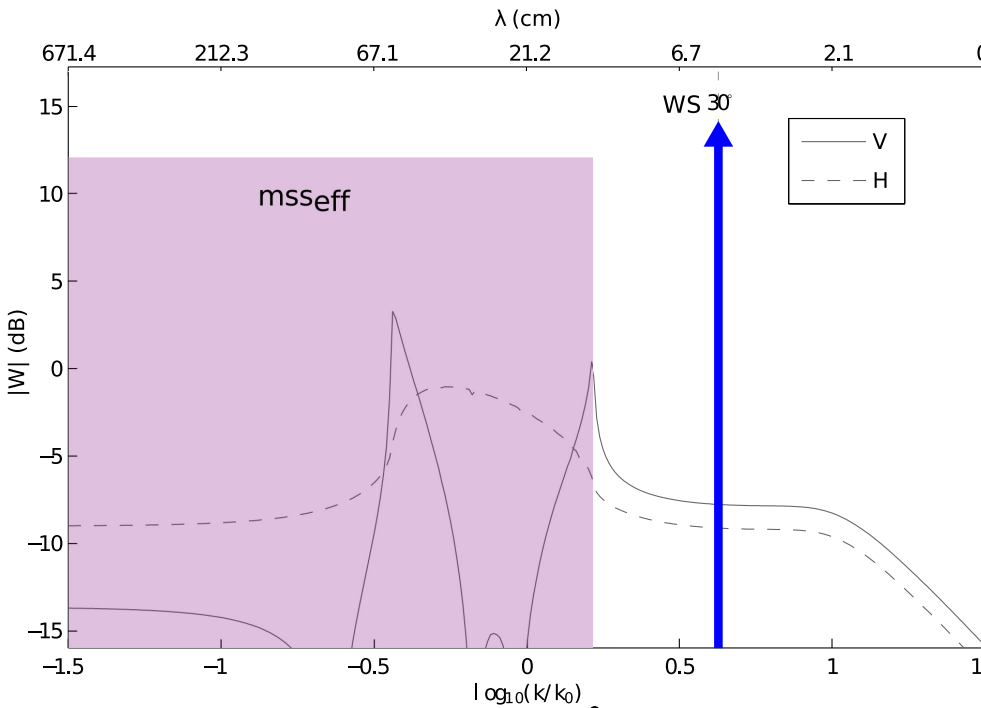
Synergie Actif/Passif : Fonctions de Poids

Composante Omnidirectionnelle — Modèle SPM2/SSA

$$Tb^{mod}_{rug,0} = -SST \int_{-\infty}^{\infty} W_0(\theta_i, k/k_0).C_0(k).d(\log(k/k_0))$$

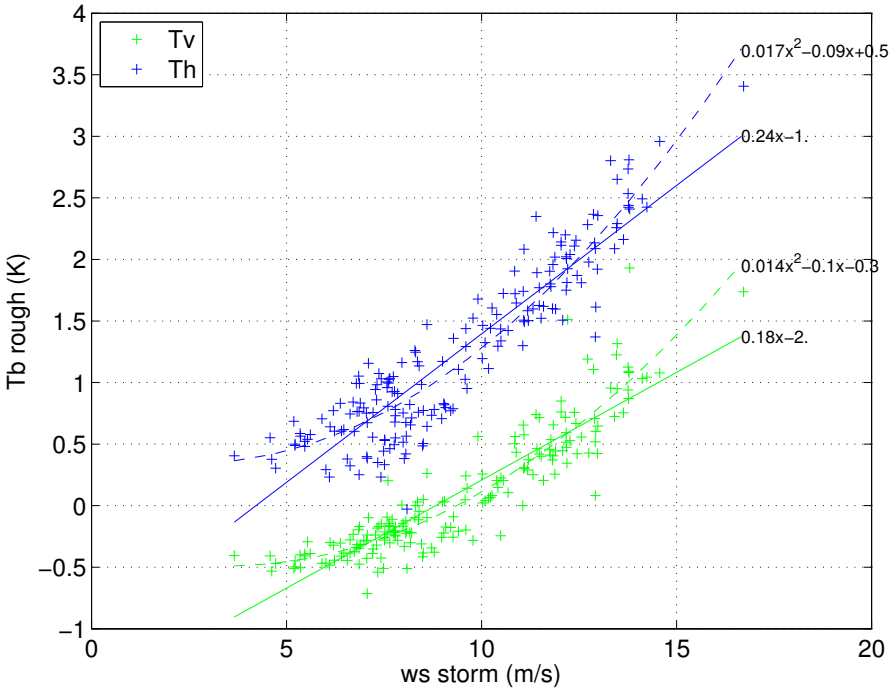


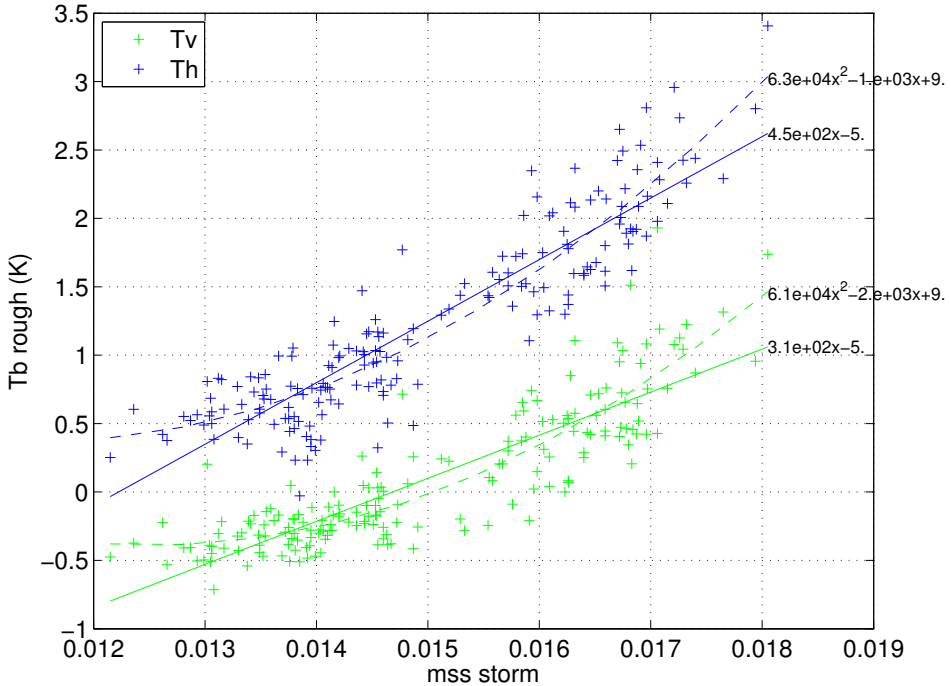
$\theta = 20^{\circ}$



$\theta = 40^{\circ}$

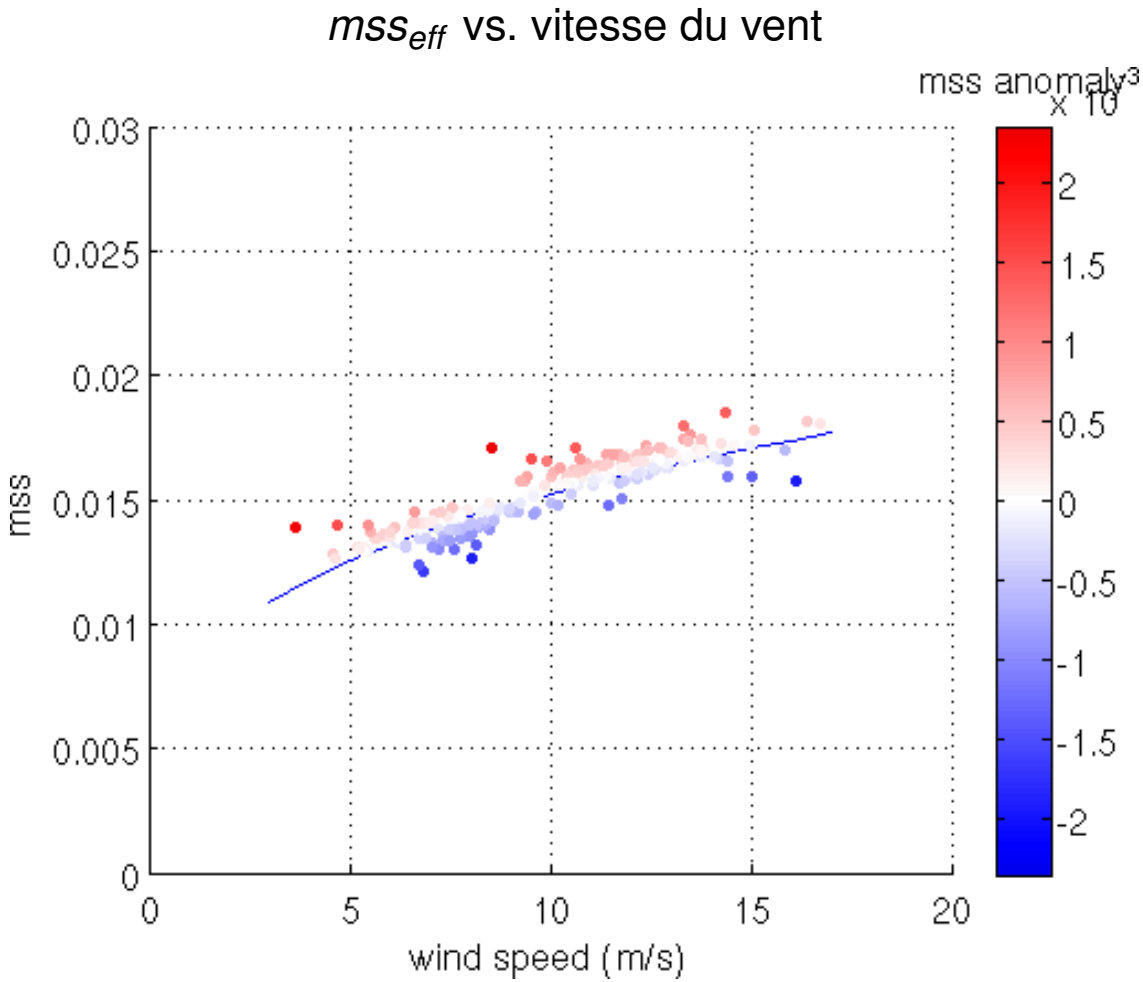
INFLUENCE DE LA MSS SUR $T_{A,rug}$





Corr.	Vent		mss_{eff}	
	H	V	H	V
linéaire	0.91	0.90	0.91	0.86
quadratique	0.93	0.92	0.92	0.89

MSS ET VENT STORM



Analyse des Résidus

Résidu de T_A

$$\Delta T_{A,rug} = \left(T^{mes}_{A,rug} - \overline{T^{mes}_{A,rug}} \right) - \left(T^{mod}_{A,rug} - \overline{T^{mod}_{A,rug}} \right),$$

Analyse des Résidus

- Vitesse du Vent (STORM)
- Azimut du Vent (STORM)
- Variance des Pentes des Vagues (mss STORM)

=> Influence du signal galactique et de la proximité de la côte

Analyse des Résidus de $T_{A,rug}$

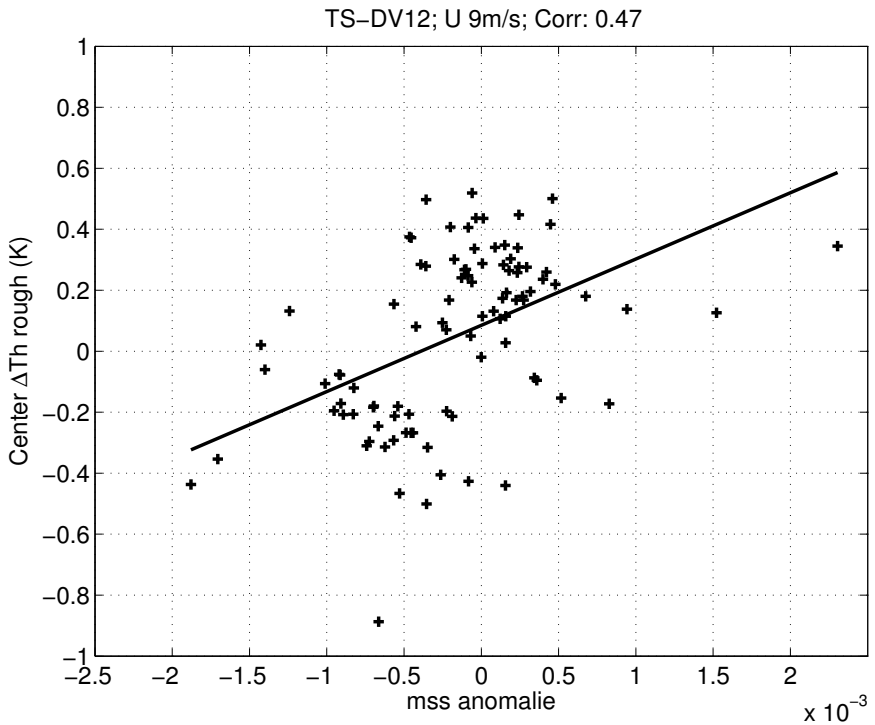
Coef. Corr. $\Delta T_{A,rug}$ (TS-DV12) avec :

	$U < 9$ m/s, $n = 94$		$U > 9$ m/s, $n = 89$	
	Th	Tv	Th	Tv
$\cos\varphi$	-0.24	-0.20	-0.08	-0.05
$\cos 2\varphi$	$+\mathbf{0.29}$	-0.00	$+0.01$	-0.04
ano. mss	$+\mathbf{0.47}$	$+0.19$	$+0.24$	$+0.09$

Analyse des Résidus de $T_{A,rug}$

Coef. Corr. $\Delta T_{A,rug}$ (TS-DV12) avec :

	$U < 9$ m/s $n = 94$		$U > 9$ m/s $n = 89$	
	Th	Tv	Th	Tv
$\cos\varphi$	-0.24	-0.20	-0.08	-0.05
$\cos 2\varphi$	$+\mathbf{0.29}$	-0.00	$+0.01$	-0.04
ano. mss	$+\mathbf{0.47}$	$+0.19$	$+0.24$	$+0.09$



- Influence de la mss > influence de l'azimut du vent.

Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

Résumé

Inversion de la SSS

- SSS radiométrique précise à mieux que 0.3 pss dans des conditions stables de vent ;
- SSS radiométrique complémentaire des modèles océanographiques côtiers ;
- Pas d'amélioration de l'inversion en utilisant l'antenne Nadir ;
- Résultats équivalents en utilisant le signal le plus sensible à la SSS ou les quatre signaux avec une inversion multiparamétrique.

Résumé

Synergie Active/Passive (STORM/CAROLS)

- Signal CAROLS mieux expliqué en utilisant les vents STORM que les vents Era Interim ;
- Validation de l'amélioration des nouveaux modèles radiométriques de rugosité ;
  - Sensibilité au vent semble légèrement surestimée ;
  - Vents forts : TS-DV12 semble mal adapté à cause d'une mauvaise paramétrisation de l'écume.
- Double dépendance du signal CAROLS en polarisation H au vent et à la mss (grandes échelles) ;
- Influence de la mss sur le signal CAROLS est supérieure à celle de l'azimut du vent.

Résumé

Limitations

- Dispersion des mesures supérieure d'au moins un facteur 2 (moyenne sur 1s) à celle attendue (bruit radiométrique) ;

=> Désaccord du même ordre de grandeur observé sur les mesures SMOS.

Plan

1. Méthodes et Données
   - Principe de la Mesure par Radiométrie
   - Radiomètre CAROLS
2. Études
   - Télédétection de la salinité
   - Contribution de la rugosité à la T_A
3. Conclusions
   - Résumé
   - Perspectives

Perspectives

Influence de la mss sur le signal radiométrique :

- Confirmer ces résultats avec les mesures SMOS ;
- Prendre en compte la mss dans le développement des modèles ;
- Inverser la mss avec les mesures SMOS ?

Importance de prendre en compte le spectre de vagues en plus de la vitesse du vent pour modéliser le signal radiométrique

=> Définir des critères à respecter pour la radiométrie en bande-L

Perspectives

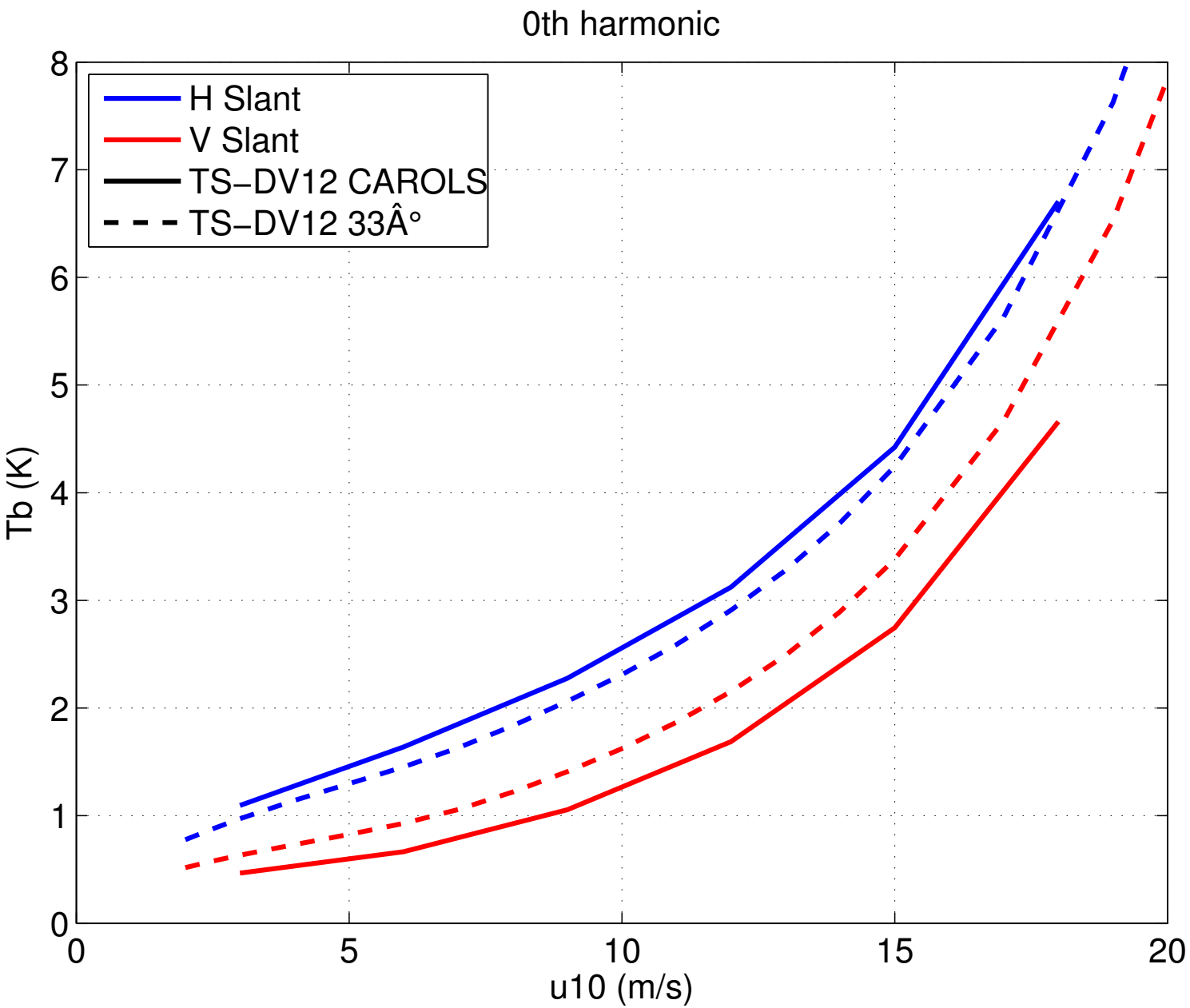
CAROLS

Fort potentiel des mesures CAROLS pour :

- mesurer la SSS dans des zones très contrastées ;
- valider les modèles directs et/ou méthodes d'inversions ;
- effectuer des études spécifiques pour améliorer la compréhension de la physique de la mesure (constante diélectrique, pluie, . . .)

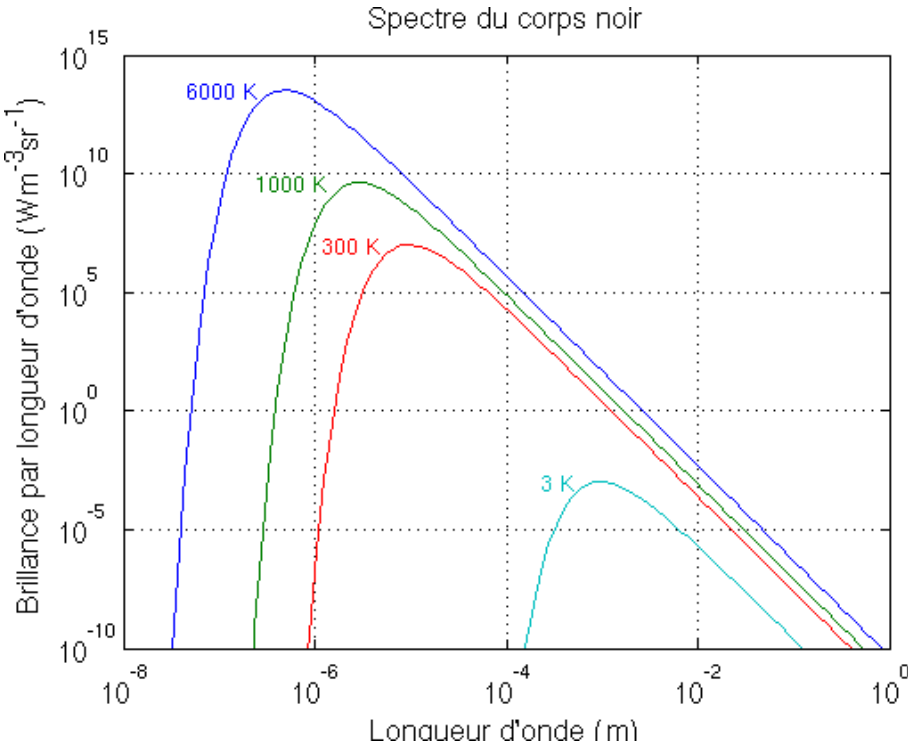
Merci pour votre attention

Intégration sur le lobe d'antenne



Principe de la mesure

Courbe de Planck



$$B_\lambda(\lambda, T_{phys}) = \frac{2.c.k_B.T_{phys}}{\lambda^4}$$

$$e(\lambda, T, \theta) = \frac{B(\lambda, T, \theta)}{B(\lambda, T)_{corpsnoir}} = \frac{Tb(\lambda, T, \theta)}{T_{phys}} \leq 1 \quad (1)$$

$$e = f(\varepsilon) = f(SST, SSS)$$

Cailleau, S., Chanut, J., Levier, B., Maraldi, C., and Reffray, G. (2010).
The new regional generation of Mercator Ocean system in the Iberian Biscay Irish (IBI) area.
Mercator Quarterly Newsletter, 36 :5–15.

Dinnat, E., Boutin, J., Caudal, G., and Etcheto, J. (2003).
Issues concerning the sea emissivity modeling at L band for retrieving surface salinity.
Radio Science, 38(4) :8060.

Guimbard, S. (2010).
Interprétation et modélisation de mesures à distance de la surface marine dans le domaine micro-onde.
PhD thesis, Université Versailles-Saint-Quentien-en-Yvelines.

Johnson, J. and Zhang, M. (1999).
Theoretical study of the small slope approximation for ocean polarimetric thermal emission.

Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 37(5) :2305 –2316.

Lazure, P. and Jégou, A. (1998).
3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf.
Oceanologica Acta, 21(2) :165–177.

Martin, A., Boutin, J., Hauser, D., Reverdin, G., Pardé, M., Zribi, M., Fanise, P., Chanut, J., Lazure, P., Tenerelli, J., and Reul, N. (2012).
Remote Sensing of Sea Surface Salinity From CAROLS L-Band Radiometer in the Gulf of Biscay.
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5) :1703 –1715.

Reverdin, G., Marié, L., Lazure, P., d'Ovidio, F., Boutin, J., Testor, P., Martin, N., Lourenco, A., Gaillard, F., Lavin, A., Rodriguez, C., Somavilla, R., Mader, J., Rubio, A., Blouch, P., Rolland, J., Bozec, Y., Charria, G., Batifoulier, F., Dumas, F., Louazel, S., and Chanut, J. (2013).
Freshwater from the Bay of Biscay shelves in 2009.

Journal of Marine Systems, 109–110, Supplement(0) :S134–S143.

Yin, X., Boutin, J., Martin, N., and Spurgeon, P. (2012).
Optimization of l-band sea surface emissivity models deduced from smos data.
Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 50(5) :1414 –1426.

Zribi, M., Parde, M., Boutin, J., Fanise, P., Hauser, D., Dechambre, M., Kerr, Y., Leduc-Leballeur, M., Reverdin, G., Skou, N., Søbjærg, S., Albergel, C., Calvet, J., Wigneron, J., Lopez-Baeza, E., Rius, A., and Tenerelli, J. (2011).
Carols : A new airborne l-band radiometer for ocean surface and land observations.
Sensors, 11 :719–742.