



# Expérimentation micro-ondes aéroportée

D. Hauser, C. Le Gac, M. Dechambre,  
P. Fanise, M. Pardé, M. Zribi, A. Martin,  
J. Boutin, C-A Guérin, A. Mironov

*Journée du GDR « micro-ondes », 9 Novembre 2011*

# Plan de l'exposé



- Objectifs scientifiques
- Contexte spatial
- Enjeux de l'instrumentation aéroportée
- Présentations de quelques instruments, méthodes d'analyse et résultats
  - Généralités (enjeux, développements en France, et au LATMOS)
  - STORM: caractéristiques et méthodes d'analyse
  - STORM: quelques résultats
  - CAROLS: objectifs et caractéristiques
  - CAROLS: quelques résultats (CAROLS et CAROLS/STORM)
  - Projet SIMODE
- Conclusions

# Objectifs scientifiques



## **OCEANS :**

- 70% de la surface du globe et rôle majeur dans le système climatique

## **MAIS :**

- difficultés pour observations in situ systématiques => grand intérêt des mesures par télédétection spatiale

**Intérêt des mesures micro-ondes** (actives/passives) pour leur faible sensibilité à l'atmosphère mais leur sensibilité à:

- La rugosité de surface (vent, vagues, courants)
- La nature ou composition de la surface (via constante diélectrique), dont salinité de surface de la mer
- Cinématique de surface (mesures Doppler)

## Instrumentes micro-ondes actifs

Développement et mise en œuvre depuis plus de 20 ans :

- **Altimètres** : radar haute résolution radiale, en visée nadir, bande Ku, C, S (Geosat, ERS(s), Jason(s), Envisat,...) et bientôt Ka (Saral)

=> Hauteur moyenne et topographie de l'océan, vent de surface, vagues, glace de mer

**Tendance**: synthèse d'ouverture ou/et interférométrie pour améliorer la résolution spatiale (Cryosat, SWOT,...)

- **Radar à ouverture synthétique** : « image » de la rugosité à haute résolution (~ 25 m ou moins), bande C, X, L, (Envisat, Terra-SAR, Alos, Sentinelle )

=> vent, vagues, signatures de courant de surface, détection de nappes de pétrole, de navires, de glaces de mer,.....

**Tendance** : augmentation résolution ou couverture, vers une mesure Doppler (courants de surface)

# Contexte spatial (2/3)



## **Instrumentes micro-ondes actifs (suite)**

Développement et mise en œuvre depuis plus de 20 ans (suite) :

- **« Diffusiomètres »** : résolution moyenne (plusieurs dizaines de km), large fauchée bande C, Ku: vent de surface  
*Tendance* : vers une mesure Doppler (courants de surface)

## **Encore du domaine recherche:**

- **Utilisation signaux GNSS** (bi-statique, Bande L)

## Instrumentes micro-ondes passifs

Depuis plus de 20 ans

- **Radiomètres** en bande C à W (5 à 86 GHz ou plus), plutôt dédiés à l'atmosphère (vapeur d'eau, nuages, précipitations,...) mais fournissant également des paramètres de surface (vent, température)

Plus récemment (SMOS, 2009, Aquarius 2011) :

- **Radiomètres en bande L** (interférométriques ou non) => salinité de surface

# Enjeux de l'instrumentation aéroportée



## Aide au développement/utilisation données satellite

- Aide à étalonnage/validation des données spatiales avant inversion
- Caractérisation variabilité spatiale, intra-pixel...
- Amélioration méthodes estimations empiriques, validation de méthodes d'inversion
  - Algorithmes empiriques (mono ou multi-capteurs)
  - Études multi-paramètres rugosité/salinité (radiométrie), vent/vagues (radar ou radiomètres,...)
  - Impact de paramètres de second ordre (écume, vagues longues/vagues courtes,..)
  - Méthodes d'identifications RFI (passif)

## Recherche instrumentale

Développements et tests de nouveaux concepts pour instruments sur satellite

## Physique de la mesure

- Aide à l'amélioration et validation de la modélisation des interactions ondes électromagnétiques /surface
  - modèles électromagnétiques approchés/théoriques, différents types de modèles approchés => cf présentation B. Chapron
  - connaissances partielles des propriétés de la surface :
    - ✓ description spectrale et/ou statistique de la rugosité de surface (partie haute fréquence du spectre, anisotropie, déviation des lois de probabilités par rapport au cas Gaussien, surface bi-phasique- déferlement,..)
    - ✓ temps et distance de corrélation des éléments diffuseurs,
    - ✓ mouvement des diffuseurs

## Moyen d'étude à caractère régional (côtier)

études de processus, comparaison modèles..



# Instruments aéroportés micro-ondes/ surfaces



## 1- Développements en France: deux entités: LATMOS, DGA/ONERA

- **ONERA/DGA :**

- Systèmes embarqués sur Falcon 20: radar SAR haute résolution, UHF, P, L, X, diversité de polarisation interférométrique,....
- Plutôt destinés aux observations continentales
- Complexité des technologies d'antenne et du traitement
- Accès limité pour la communauté recherche « civile »

- **LATMOS (CNRS/UVSQ/UPMC):**

- Prototypes conçus et réalisés au laboratoire (recherche)
- Radars de faible consommation, faible encombrement, durée et coût de développement limités
- Radiomètre (CAROLS) hérité de travaux antérieurs (DUT, Danemark)
- Compatibilité avec avions de recherche français gérés par SAFIRE, flexibilité pour campagnes de mesures,
- Proximité ingénieurs/chercheurs (qualification des instruments/données)

# Instruments LATMOS: vue d'ensemble



## 2- Au LATMOS (anciennement CRPE/CETP):

- Depuis les années 90: développements et mise en œuvre de radars FMCW avec antennes réseaux, contexte ERS, ENVISAT (applications surfaces continentales et océaniques),  
ERASME, RENE, RESSAC (< 2000) , **STORM (depuis 2002)**
- Depuis 2005: développement du radiomètre bande L **CAROLS** (continent et océan), contexte SMOS/Aquarius
- Prévu pour 2012-2015: Radar Bande Ku **KuROS** en support à la mission spatiale CFOSAT

- **STORM**

- Radar bande C, incidence modérée (10-30°), double-polarisation, mode polarimétrique
- objectifs sur océan: mesure vent, propriétés et physique des vagues longues, propriétés de la rugosité de petite échelle

- **CAROLS**

- Radiomètre Bande L double incidence, full polarisation
- Objectif sur océan: mesures salinité

- **Radar KuROS**

- En développement: bande Ku multi-incidences (0-55°), Doppler Vent, vagues, propriétés de rugosité de surface + applications continentales (régions semi-arides, glaces continentales,...)

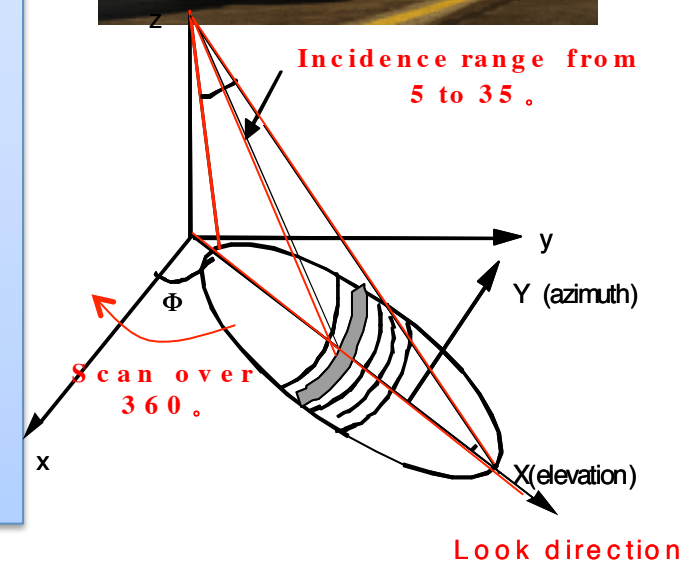
# Radar STORM- Caractéristiques



Embarqué sous ATR 42 (SAFIRE)

Altitude: 2000 à 3000m

- ✓ Émission Bande C (5.35 GHz)
  - FMCW (continue, modulée en fréquence)
  - 2 polarisations émises alternativement : H, V
  - Largeur de bande 200 MHz : résolution radiale  $\sim 1.5\text{m}$
  - 2 modes d'émission :
    - + Mode polarimétrique (rampe de 1 ms)
    - + Mode non polarimétrique (rampe de 3.5 ms)
- ✓ Angle incidence moyen  $20^\circ$
- ✓ Ouverture incidence/azimut:  $\pm 15^\circ / \pm 3.6^\circ$
- ✓ Antenne à balayage azimutal
- ✓ Réception simultanée H et V
- ✓ Mesure amplitude et phase (en mode polarimétrique)



# Radar STORM- analyse



## Proche Nadir

- Rétrodiffusion quasi-spéculaire (proche conditions optique géométrique)
- $\sigma_0$  lié à densité de probabilité des pentes de la surface (longueur d'onde  $> 3$  fois e.m.)
- Variance des pentes dominée par vagues courtes => sensibilité au vent (utilisé par l'altimètre)

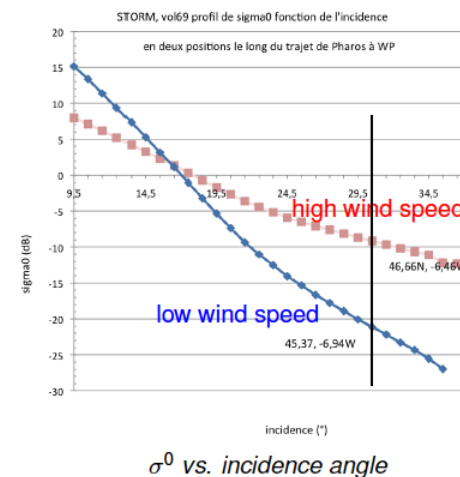
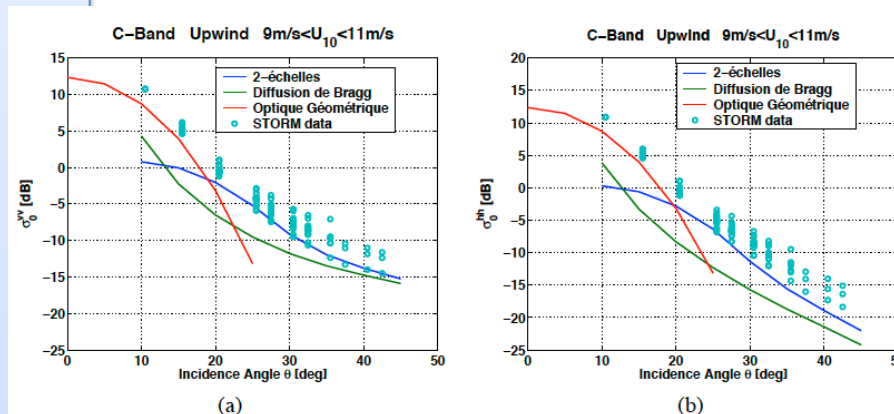
## Incidences $> 20^\circ$

- diffusion de Bragg => sensible aux vagues l'ordre de la longueur d'onde radar (qqc centimètres), elles –mêmes portées et modulées par les vagues plus longues)

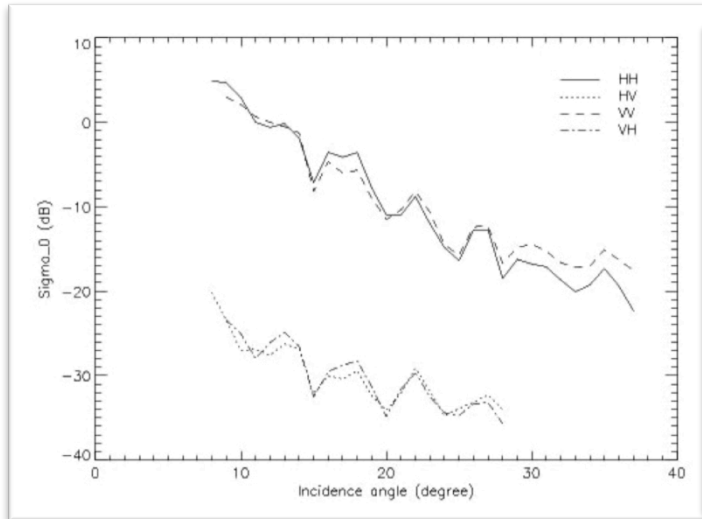
## Autour de $10-15^\circ$ environ

- peu de sensibilité au vent (vagues courtes) mais très sensible à l'incidence locale => pentes des vagues longues
- => Utilisé pour mesure modulation du signal dû aux pentes

Thèse A. Mouche, 2005

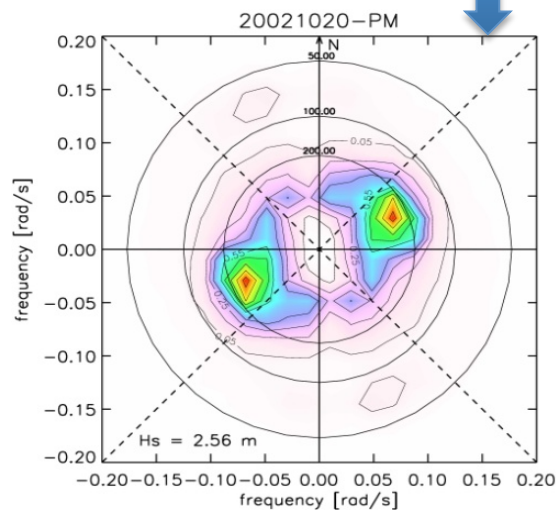


# Radar STORM-analyse



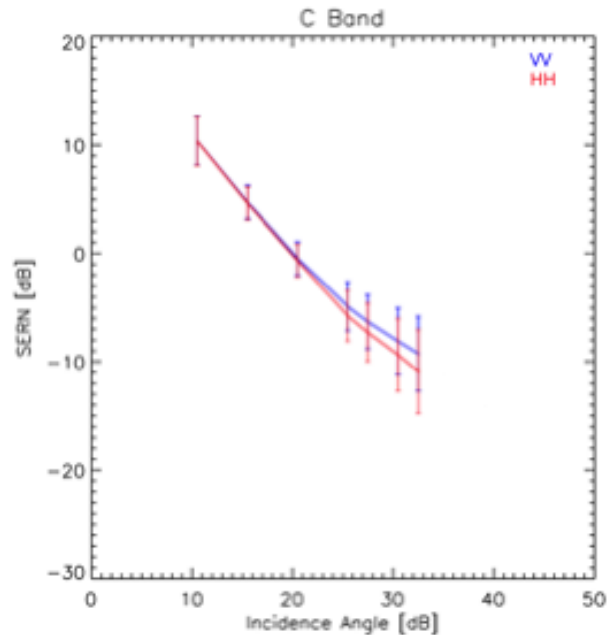
Au sein de la fauchée (1500 x 400 m), dans la direction de propagation des vagues longues

- ✓ modulations dues aux pentes des vagues (> 40-50 m)
- ✓ Analyse dans toutes les directions azimutales (antenne tournante)
- ✓ A incidence modérée ( $\sim \leq 20^\circ$ ) relation linéaire entre modulations et pentes des grandes vagues



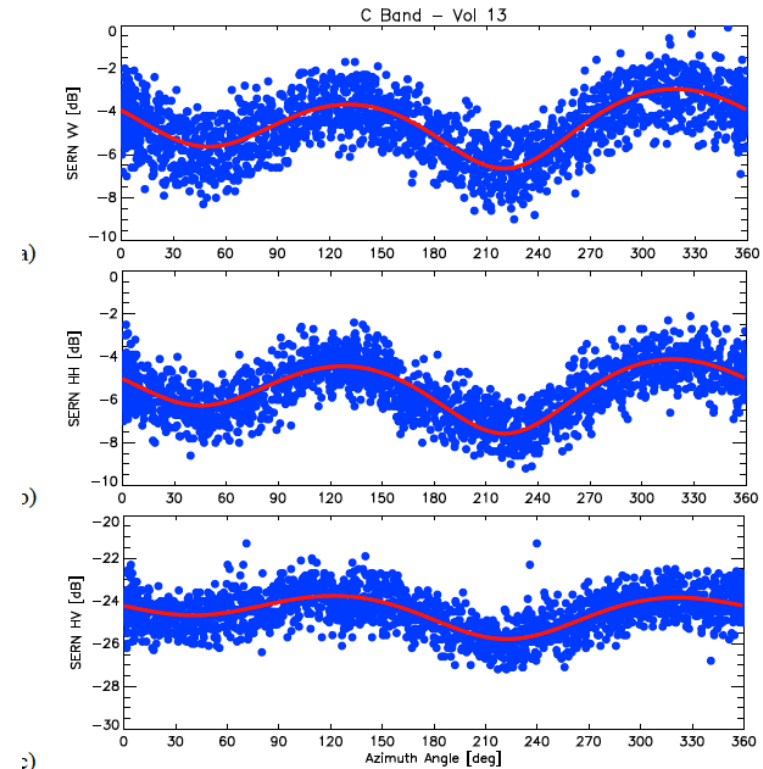
Spectre directionnel des vagues longues (50m-400m) représentatif d'une échelle de 2 x 2 km environ,

# Analyses STORM-sigma0



**Profil moyen de section efficace radar ( $\sigma_0$ ) fonction de  $\theta$ , à faibles incidences ( $<20^\circ$ )**

=> pdf des pentes de la surface (variance des pentes, kurtosis, analyse azimutale et en fonction du vent )



**$\sigma_0$  at Incidences  $> 30^\circ$**

=> Vent de surface (direction et module)  
=> Rapports de polarisation (pour modélisation)

# STORM- Quelques résultats



## Campagnes RESSAC/STORM (1991-today)

- *Evolution spatio-temporelle des spectres des vagues longues, comportement angulaire)*
- *Comparaison multi-capteurs (dont SAR)*
- *Modulation hydrodynamique (impact de vagues longues sur la répartition des vagues courtes)*
- Validation/ajustements de modélisations électromagnétiques
- Modélisation empirique (rapport de polarisation)
- fonction de probabilité des pentes
- Impact du déferlement sur signal radar
- Complément aux mesures passives (avec CAROLS)

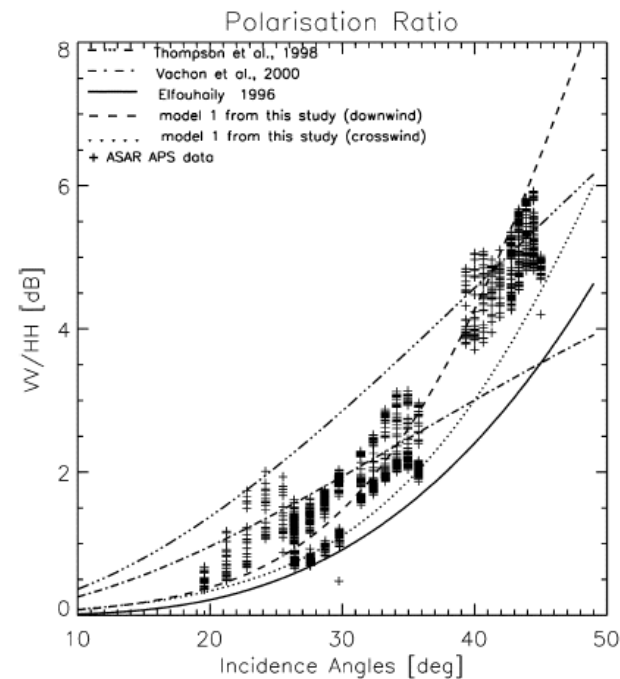


# STORM- Quelques résultats -1



Modèle empirique de rapport de polarisation en bande C  
=> dépendance en fonction de l' incidence et de la direction/vent  
=> utilisé par la suite pour analyse des données SAR de Radarsat

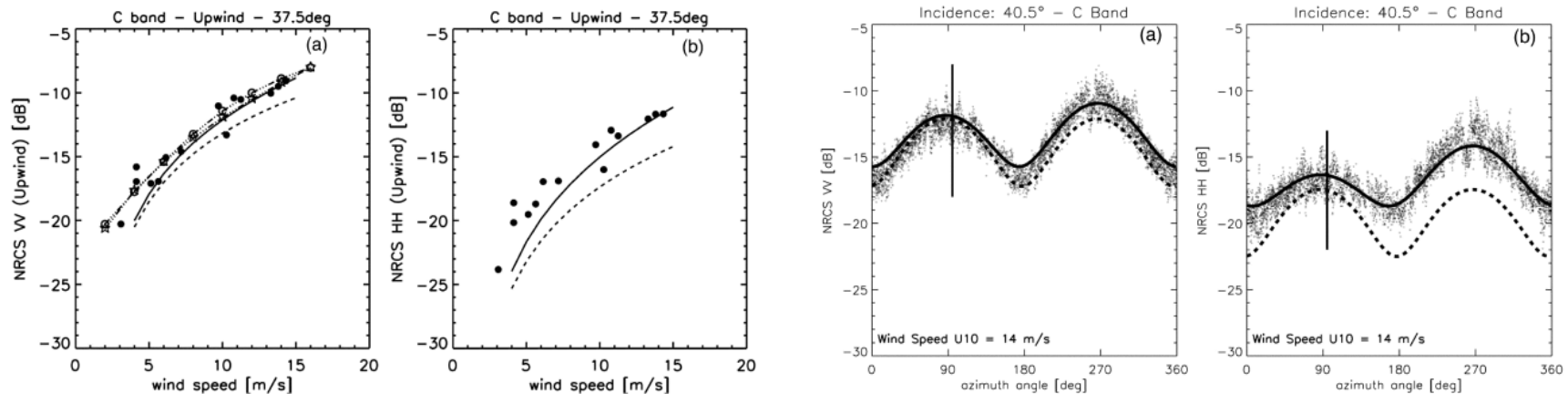
*Mouche et al, 2005*



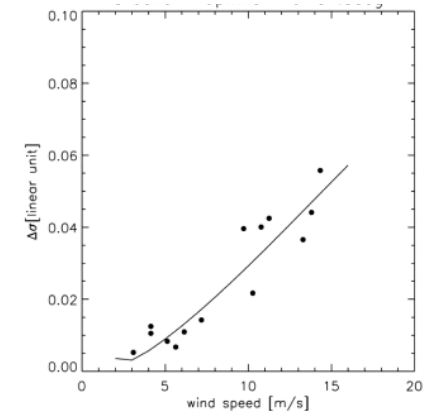
# STORM- Quelques résultats -2

Mise au point/ajustement de modèle interactions e.m (type deux échelles incluant les effets du déferlement (Kudryavstev et al, 2003, Mouche et al, 2006)

*Mouche et al 2006 (modèle proposé: en trait plein)*



Estimation de la part de signal due au déferlement, selon incidence, vent, azimuth



# STORM- Quelques résultats -3



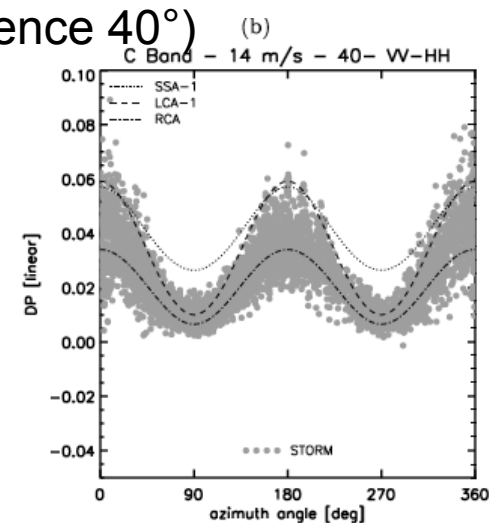
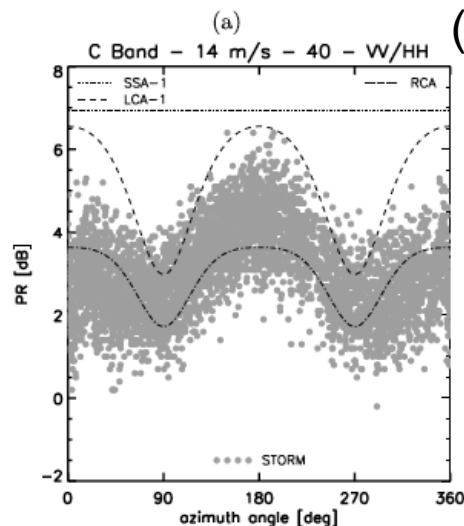
Contribution à la validation d'autres approches en modélisation (modèles unifiés, évitant la séparation d'échelles) dont resonant curvature approximation (Mouche et al, 2007)

=> apport de la double polarisation (vérification du modèle grâce au rapport et à la différence de polarisation)

*Mouche et al 2007*

Rapport et différence de polarisation en fonction de l'azimut

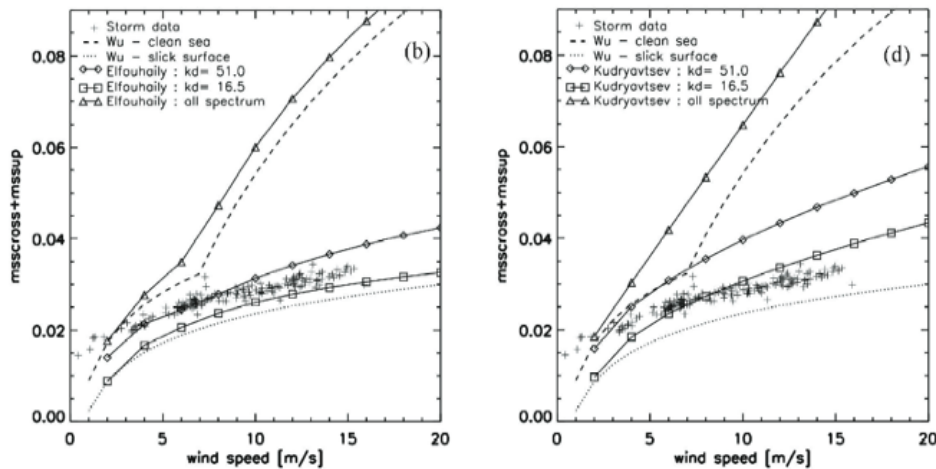
(vent 14 m/s, incidence 40°)



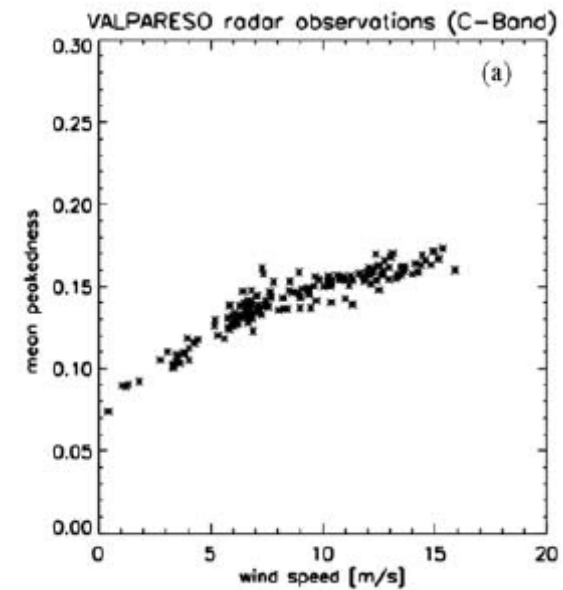
# STORM- Quelques résultats -4

Variance des pentes (mss) et autres paramètres de la distribution des pentes, estimées à partir de  $\sigma_0$  (faibles incidences) - *Hauser et al, 2009*

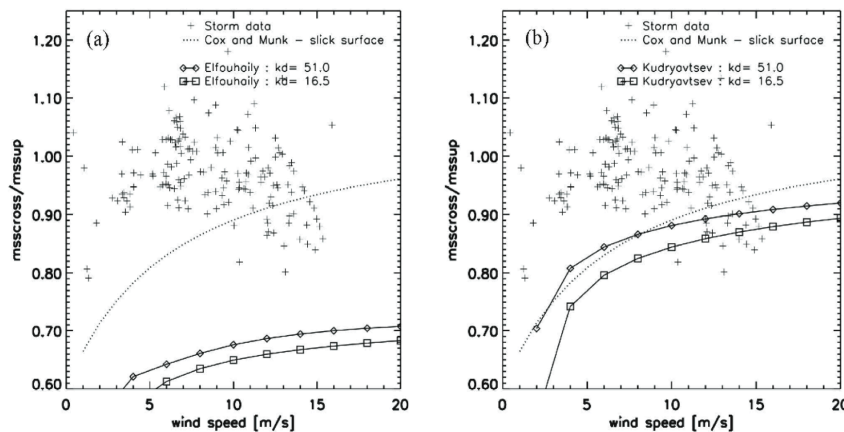
mss fonction du vent/ modèles existants



peakedness, fction du vent



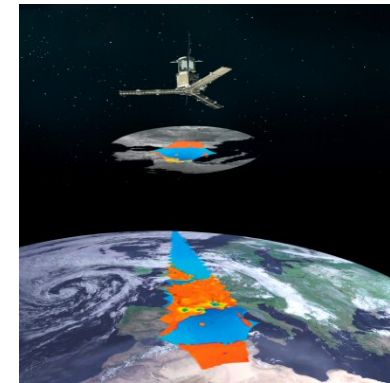
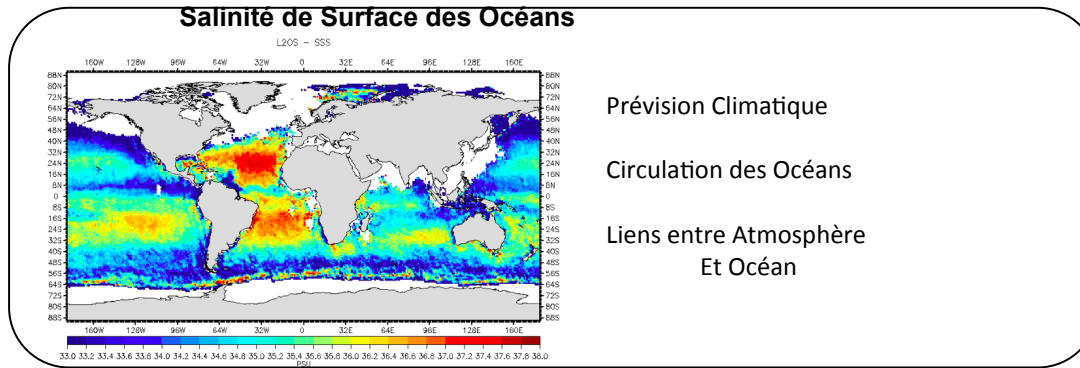
Anistropie de la mss, fction du vent/modèles existants



# Radiomètre CAROLS- objectifs



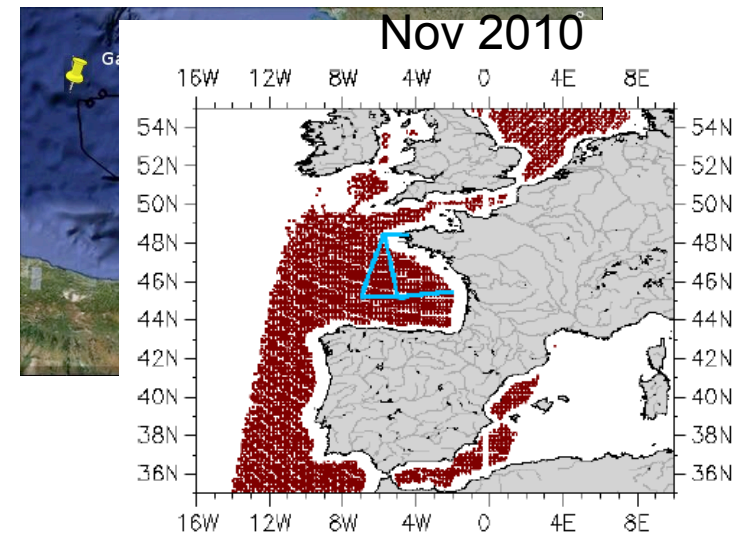
Contexte; SMOS (mission CNES/ESA): radiomètre bande L , Lancé fin 2009



## Objectifs CAROLS :

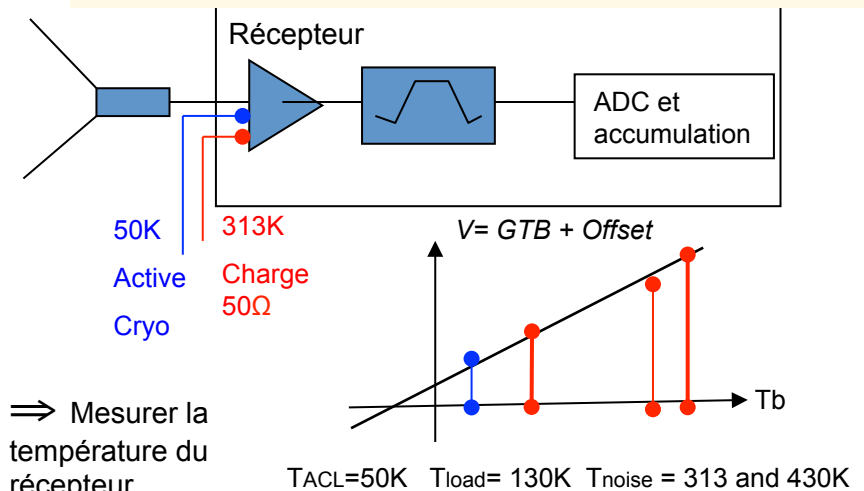
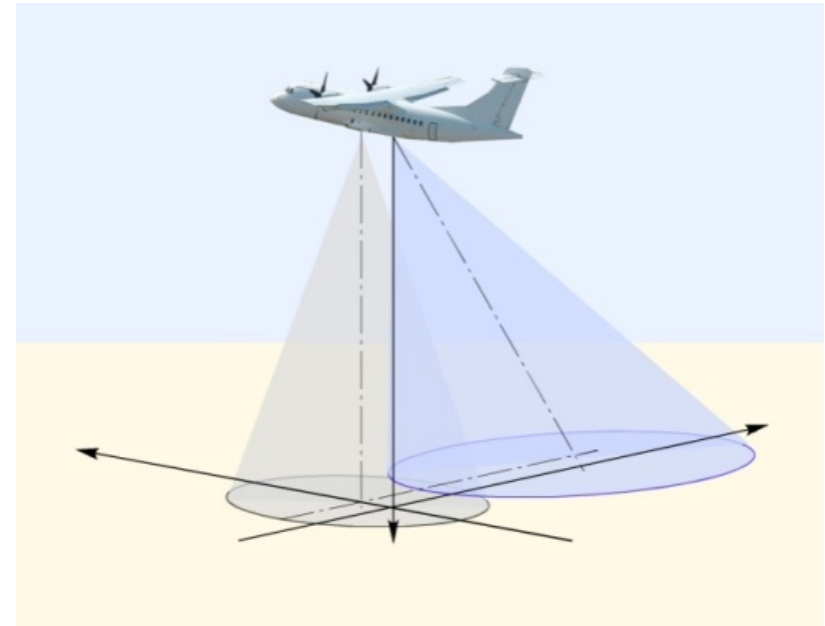
- Etalonner / Valider SMOS (Tb)
- Etudier l'hétérogénéité des Tb à l'intérieur d'un pixel
- Analyser comportement along/across track de SMOS
- Valider/améliorer méthodes inversion des paramètres géophysiques

2008, 2009, 2010



# Radiomètre CAROLS- caractéristiques

- CAROLS Radiometer (derived from EMIRAD 2) [Zribi et al., 2011]
- Correlation radiometer with direct sampling
- Fully polarimetric (i.e 4 Stockes)
- Freq : - 3 dB @ 1401 MHz 1426 MHz
- Sensitivity : 0.1 K for 1 s integration time
- Stability: better than 0.1K over 15 min
- Internal calibration : gain calculated from 4 different meas. (combine active cryogenic load, active Load, noise load)
- Cables with low loss and well monitored temperature
- A large potter horn (HPBW 37.6°) at 0 and 34°



⇒ Mesurer la température du récepteur

⇒ Connaître son gain

# Radiomètre CAROLS- performances

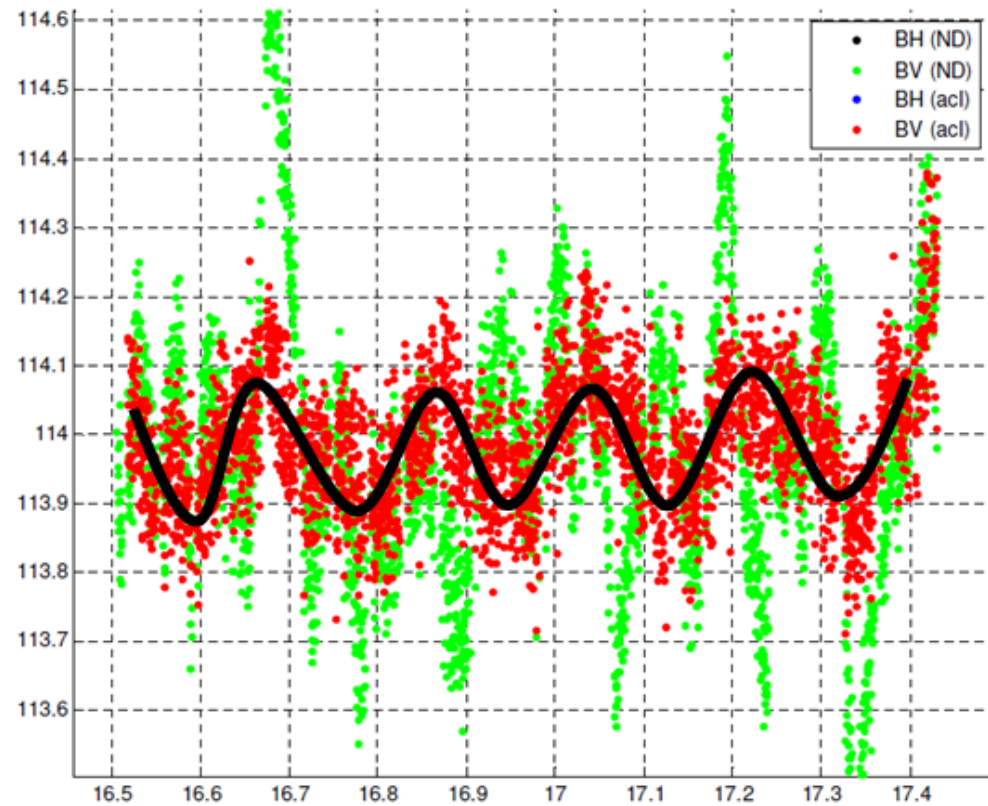


Résolution radiométrique améliorée par rapport à version équivalente de Emirad2 (DTU)

=> Variations 0,1 K peuvent être estimées

Tv (K)

- Avec étalonnage sur diode de bruit seule
  - Avec étalonnage sur charge froide active + diode de bruit
- Référence



Temps (heure)

# Radiomètre CAROLS- traitement



## **Main steps of the processing:**

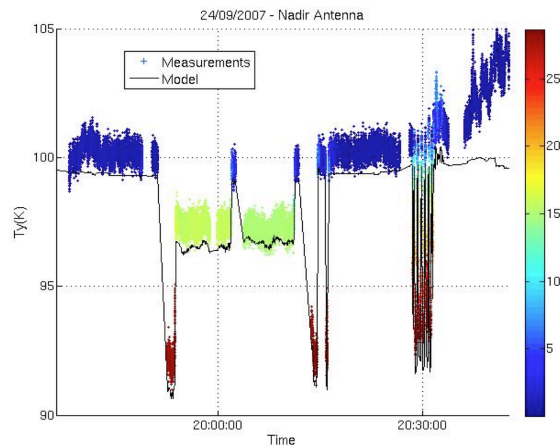
- Correction for cable attenuation and OMT
- Account for internal calibration to retrieve  $T_b$
- Elimination of RFI (kurtosis method)
- $T_b$  averaging (typically 1s)
- Analysis along flight legs : selecting constant range of incidence angles ( $1^\circ$  variation), post-averaging (2min)
- Analysis versus incidence (wing wags)
- Analysis versus azimuth (circle flights)



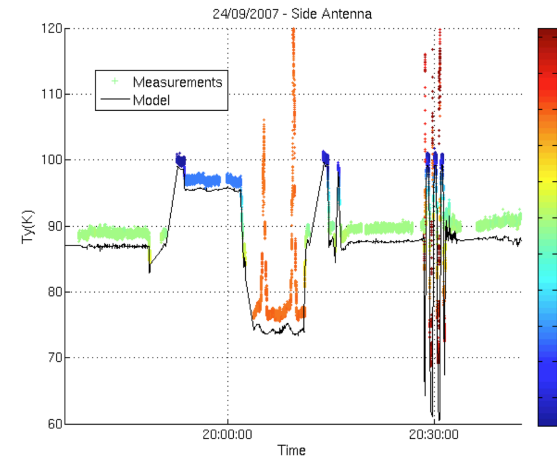
# Radiomètre CAROLS- résultats – 1/7



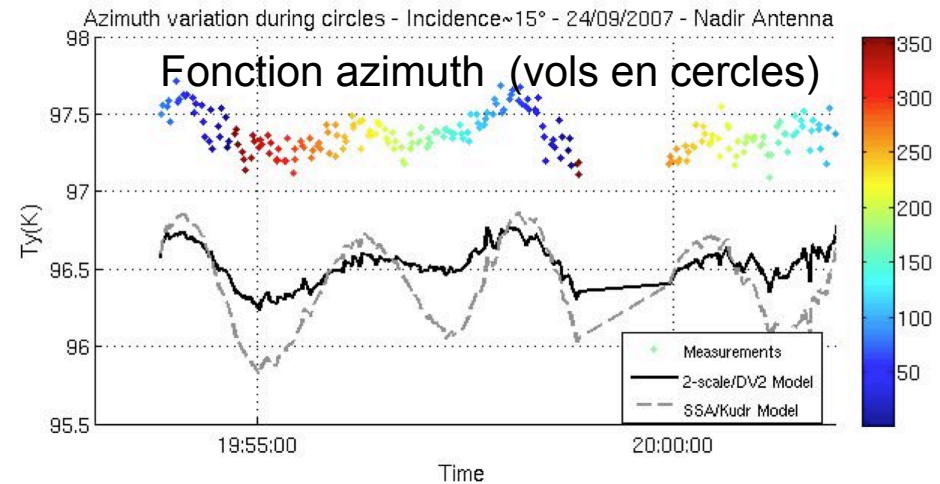
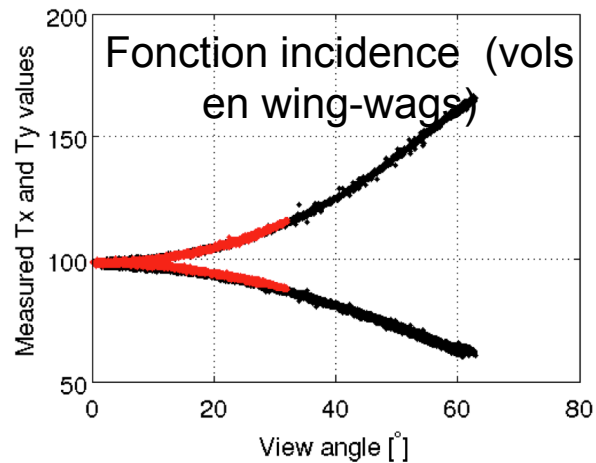
Exemple données Tb, Vol 24/09/2007 (plat, nose wags, wing wags, cercles)  
(from Zribi et al, Sensors, 2010)



Antenne Nadir; code couleur= incidence



Antenne côté; code couleur= incidence



## **Inversion in terms of ocean surface parameters:**

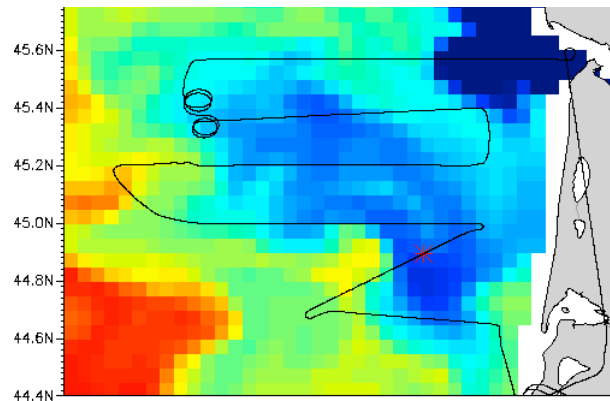
- 1) Direct modeling of the L-Band radiometric signal as seen through the CAROLS antenna
- 2) Minimization differences obs/model (salinity or salinity+ wind speed)
  - Sea Surface Emissivity for a flat surface [Klein and Swift, 1977] (impact of T, SSS)
  - Contribution of Roughness (two-scale model) [Dinnat et al., 2003]
  - Atmospheric Emissivity and Absorption [Liebe et al., 1993]
  - Scattering of sky radiation by Sea Surface [Tenerelli et al., 2008]
  - Estimate  $T_b$  accounting for CAROLS antenna lobes geometry + aircraft attitude

# Radiomètre CAROLS- résultats – 3/7

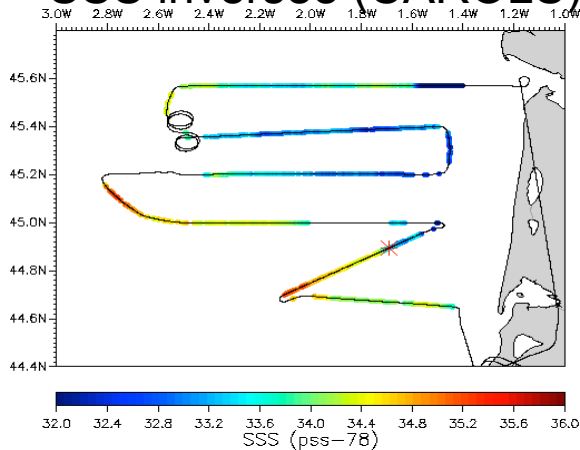


Résultats d'inversion (salinité de surface , SSS) en zone côtière (*thèse de A. Martin, et Martin et al, IEEE TGARS, accepté*)

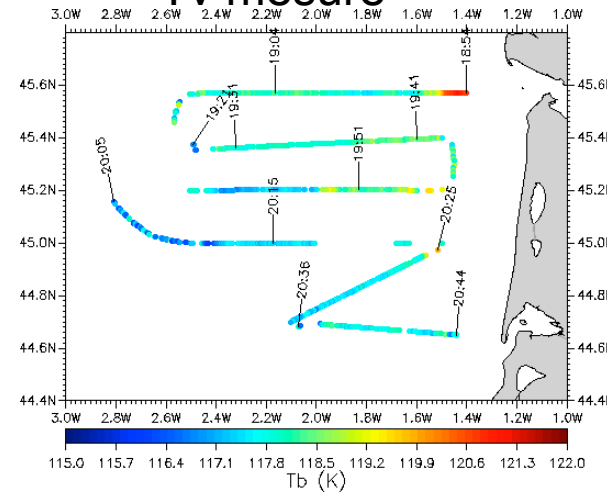
Trace du vol avion sur carte  
SSS d'un modèle



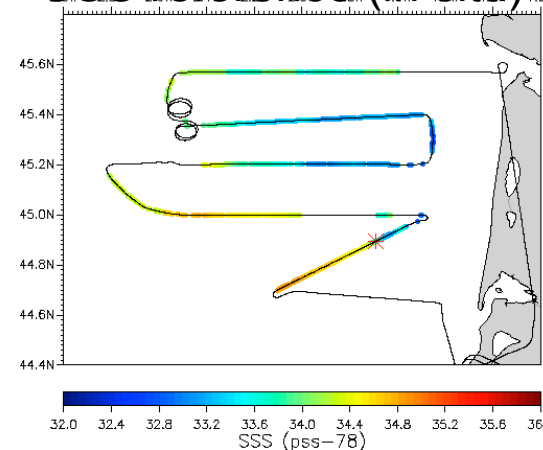
SSS inversée (CAROLS)



Tv mesuré



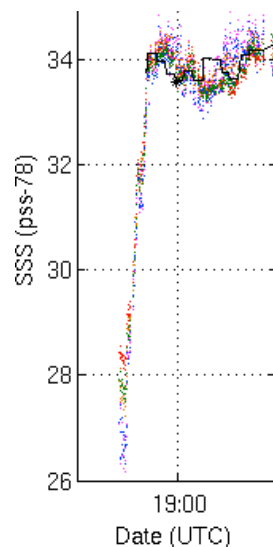
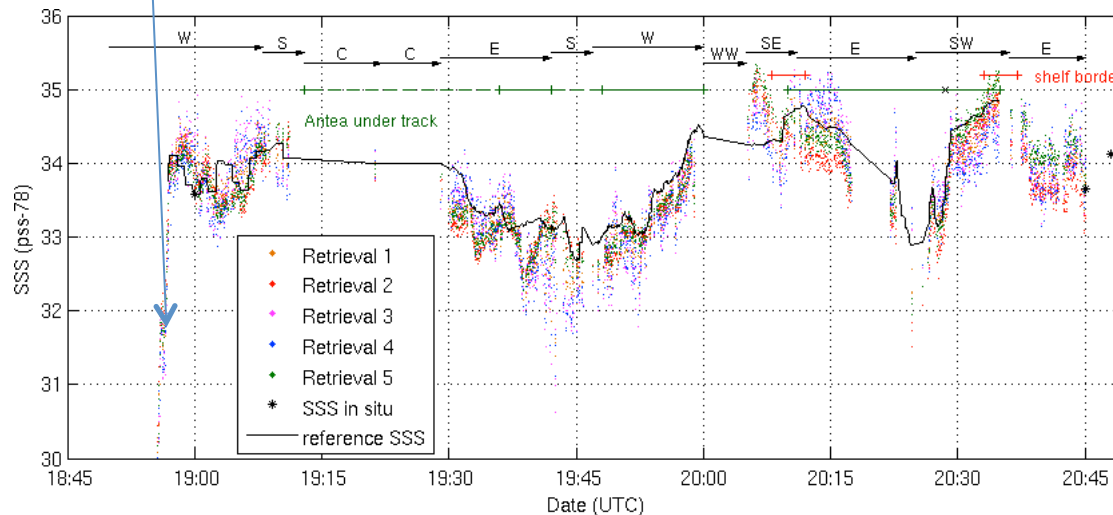
SSS référence (in situ)



Inversée/  
référence in situ  
(pss-78)  
Biais: -0.15  
Std: 0.30  
Rms: 0.33  
Cor=0.90

# Radiomètre CAROLS- résultats- 4/7

## Embouchure de la Gironde



*(thèse de A. Martin, et  
Martin et al, IEEE  
TGARS, accepté)*

Le long de la trace avion:  
Comparaison entre  
différentes méthodes  
d'inversion (1 ou 2 visées,  
avec ou sans corrections de  
biais préalable, 1 ou 2  
paramètres,...), et les  
mesures de référence

=> Pour une des méthodes  
(multi-visées, multi-  
paramètres, sans correction  
de biais préalable) :écart-  
type/référence => inférieur  
à celui entre modèles et  
référence

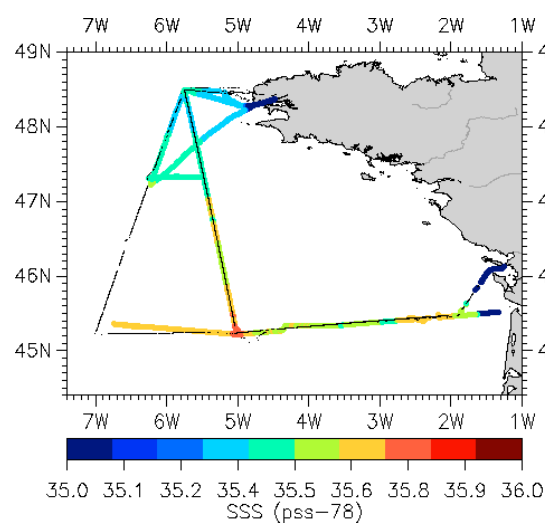
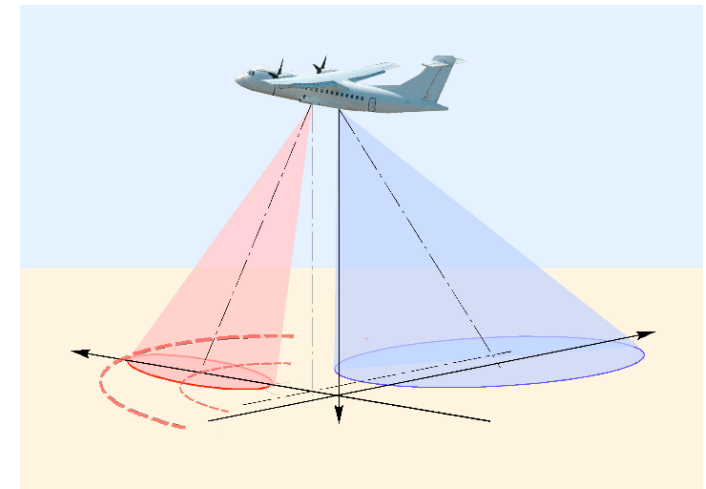
# Radiomètre CAROLS- résultats – 5/7



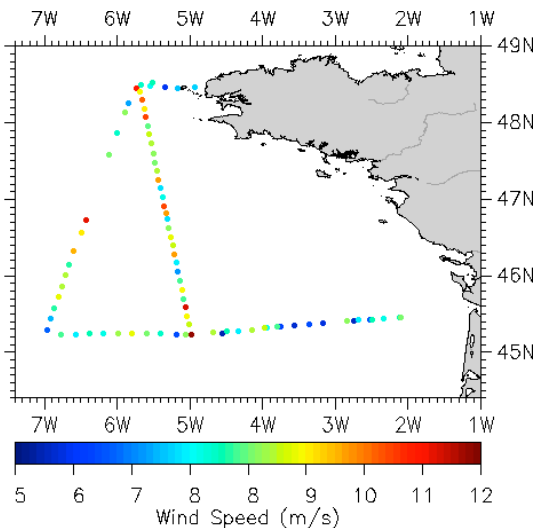
Synergie actif/passif (STORM/CAROLS),  
campagne nov 2010

Objectifs:

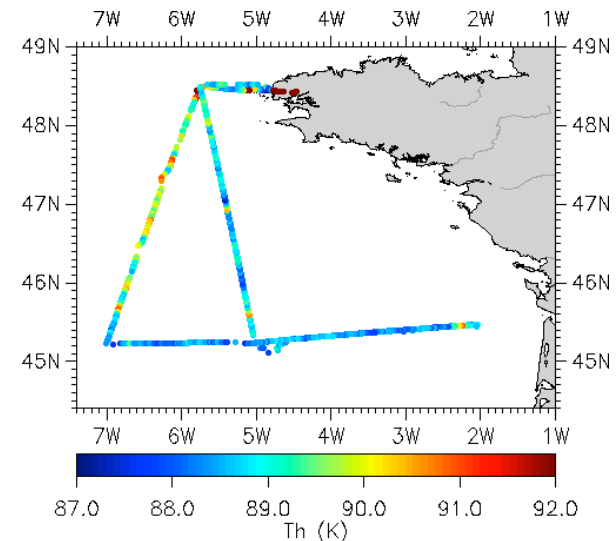
- meilleure séparation des impacts de la salinité et rugosité sur le signal (approche empirique)
- meilleure prise en compte des effets de rugosité dans les modèles de  $T_b$  en bande L



Référence in situ



Vent estimé via STORM

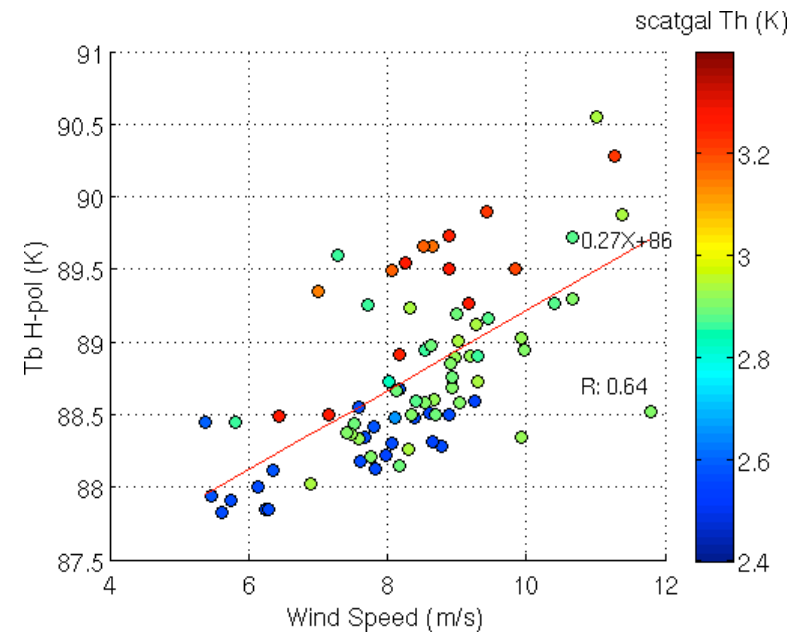
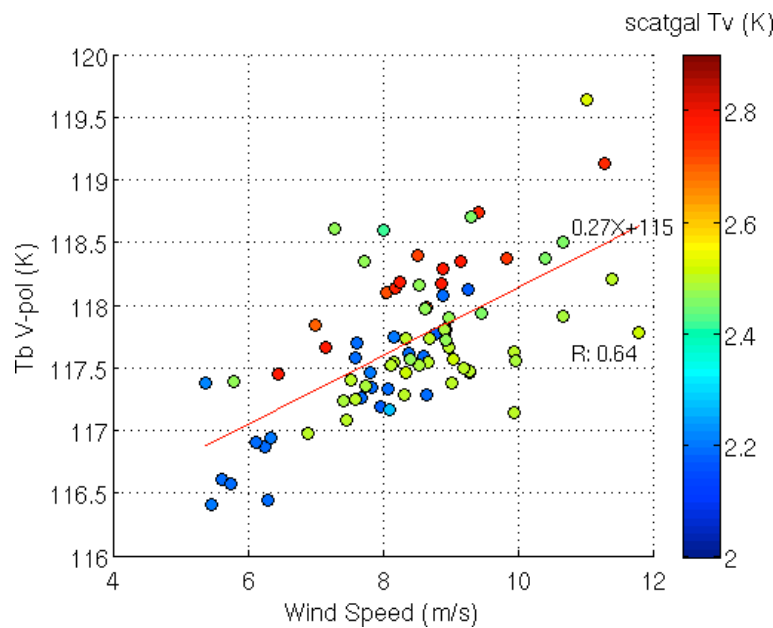
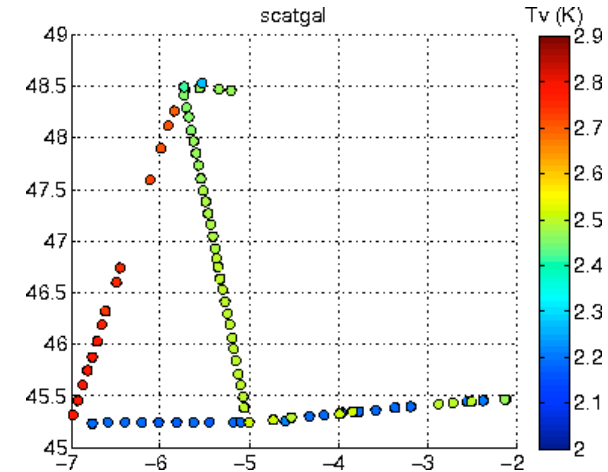


Th mesuré (CAROLS)

# Radiomètre CAROLS- résultats – 6/7



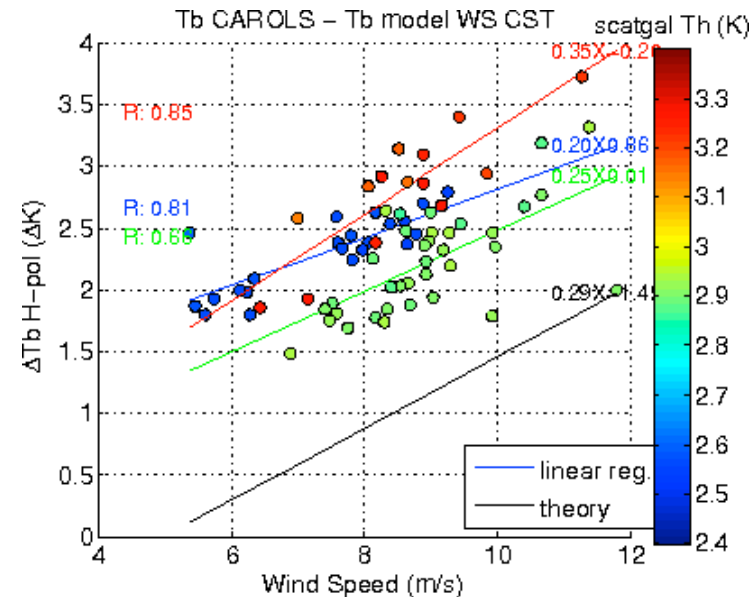
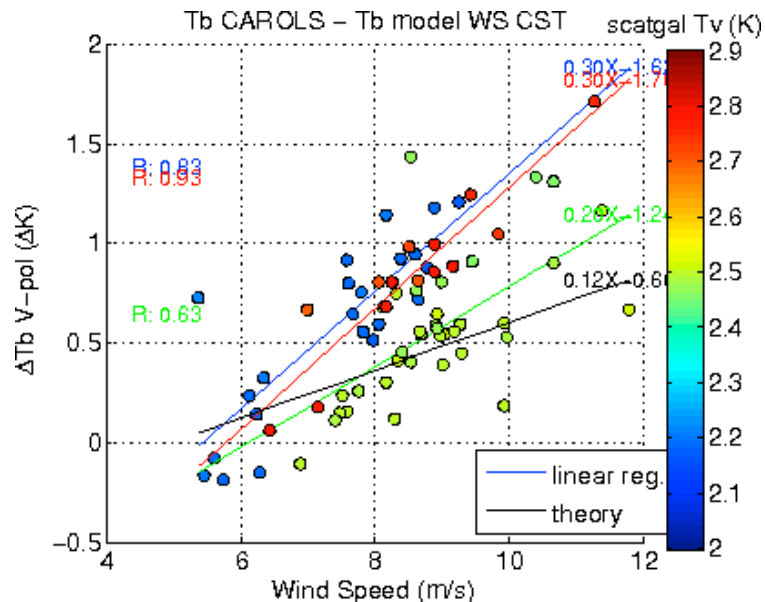
Etude des variations de  $T_v$  et  $T_h$  en fonction du vent (issu de STORM) pour différentes configurations le long du vol (bruit galactique variable)



# Radiomètre CAROLS- résultats - 7/7



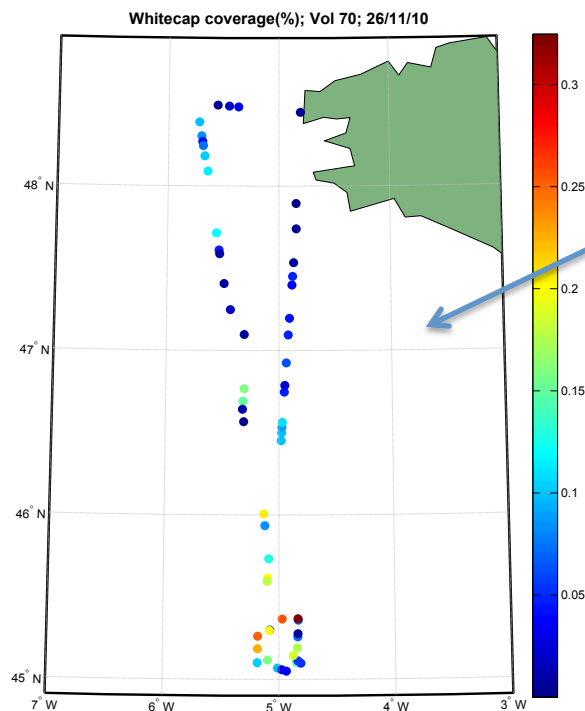
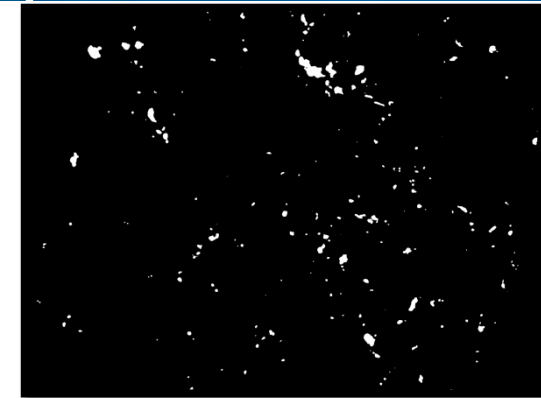
$T_b = T_{b\text{measured}} - T_{b\text{modeled}}$  (WS = 5m/s)



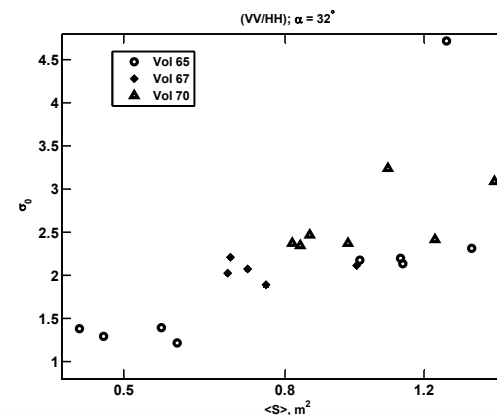
Dépendance au vent varie avec la configuration du signal galactique  
Erreur possible dans l'estimation de la contribution du bruit galactique?  
Autre ? (analyse en cours)  
 $T_v \Rightarrow$  Dépendance au vent plus forte que valeurs théoriques  $\Rightarrow$  lié à utilisation du vent « diffusiométrique »?

# Impact du déferlement sur signaux micro-ondes (ANR SIMODE)

Campagne aéroporté (novembre 2010):  
Mesures simultanées par caméra video, radar  
STORM et radiomètre CAROLS



Estimation de la couverture d'écume  
du nombre et de la taille moyenne  
d'évènements déferlants



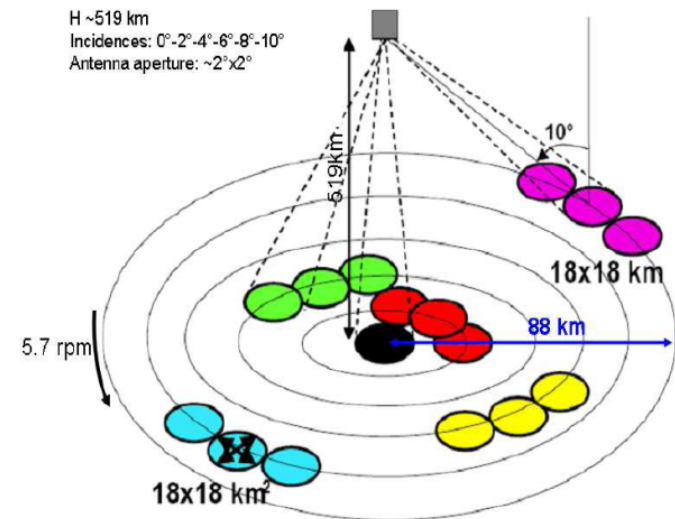
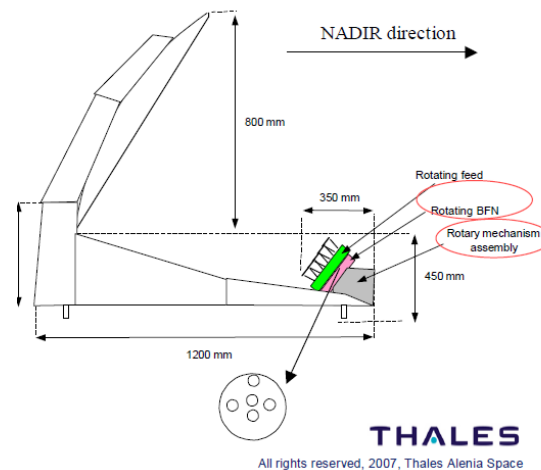
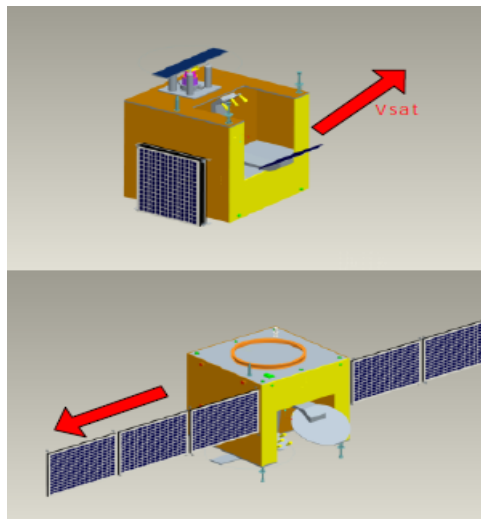
Rapport de polarisation VV/HH dans la direction  
« upwind » => augmente avec la taille moyenne des  
éléments déferlants (mais décroît avec le vent -)



# Radar KuROS (mission CFOSAT)



Dans le cadre de la mission spatiale franco-chinoise CFOSAT (vent et vagues à partir de deux radars) => radar démonstrateur aéroporté en bande Ku (13.5 GHz)



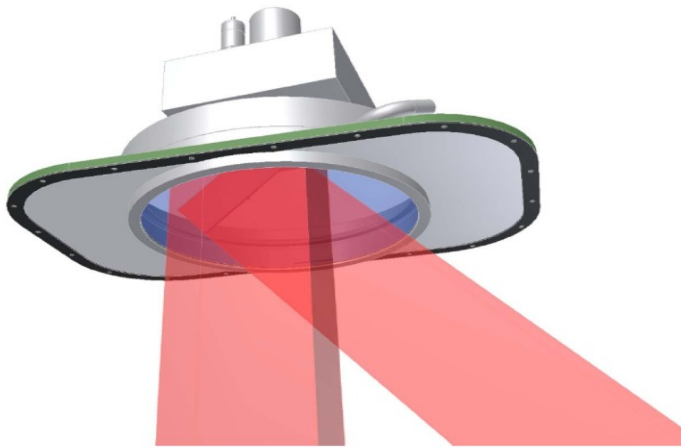
Choix: la même géométrie d'observation que les 2 radars embarqués sur CFOSAT:  $0^\circ$  à  $10^\circ$  et  $30^\circ$  à  $50^\circ$ , et donner accès aux mêmes paramètres que CFOSAT :

- la section efficace de rétrodiffusion en Bande Ku
- le spectre directionnel des vagues
- le vent de surface sur l'océan

# Radar KuROS (mission CFOSAT)

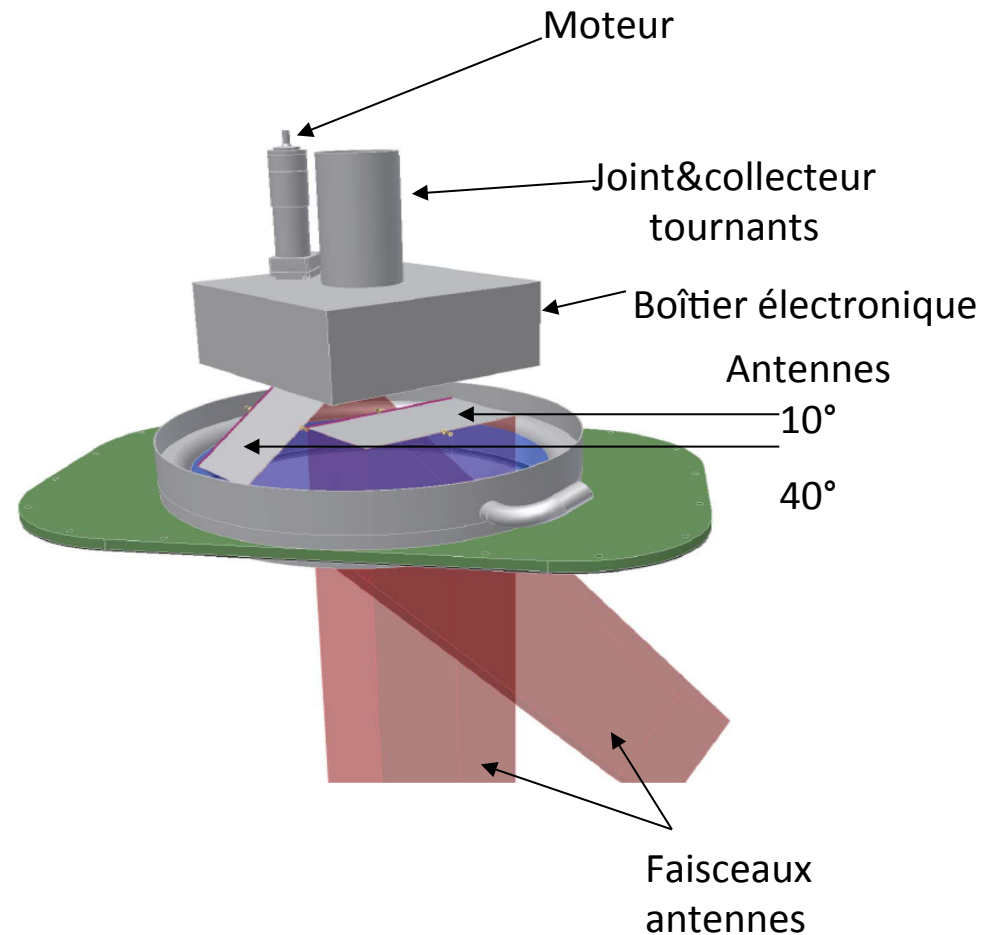


	Résolution $\delta r$	Bande du signal B
Faisceau à 10°	1.5 m	100 MHz
Faisceau à 40°	5 m	30 MHz



Incidence 10° : (coeff de rétrodiffusion, spectre de vagues...)

Incidence 40° : diffusiomètre ( vent de surface)



# Radar KuROS /STORM



De STORM (Bande C, conception héritée des années 90)  
vers KuROS (Band Ku, années 2010)

- Evolution du choix de fréquence liée au contexte spatial (Bande C pour ERS, ENVISAT, Bande Ku pour CFOSAT)
- KuROS plus facilement utilisable en mode vent et vagues (incidences 0 à 50°)
- Plus de radôme sous fuselage/ joint tournant
- Mesure Doppler pour KuROS
- utilisation combinée des deux instruments: intérêt pour complémentarité des réponses à la rugosité de surface, et à des milieux pénétrants (glaces) => informations complémentaires sur les milieux étudiés

# Conclusions / perspectives



- Expertise en France (et au LATMOS en particulier)
  - développement d'instruments micro-ondes aéroportés et méthodes d'analyse associées
  - mise au point d'algorithmes d'inversion
  - campagnes de mesures (coordinations avec mesures in situ)
  - utilisation à des fins d'étude en physique de la mesure et/ou du milieu géophysique
  - utilisation pour surfaces marines ET continentales
- Perspectives
  - Synergie mesures STORM/CAROLS, radar/radiomètre sur Aquarius
  - campagnes de mesures KuROS 2012, 2013 et au-delà
  - Observations combinées bande C et Ku pour l'étude de la rugosité de surface à petite échelle
  - Combinaison lidar/radar (?)



*MERCI*