



Julien Delanoë\*  
Marie Ceccaldi\*  
Anthony Guignard\*  
Alfons Schwarzenboeck@  
Emmanuel Fontaine@  
Robin Hogan+  
Alain Protat#

# SYNERGIE RADAR-LIDAR-RADIOMÈTRE POUR L'ÉTUDE DES NUAGES+ OUTILS POUR L'INVERSION

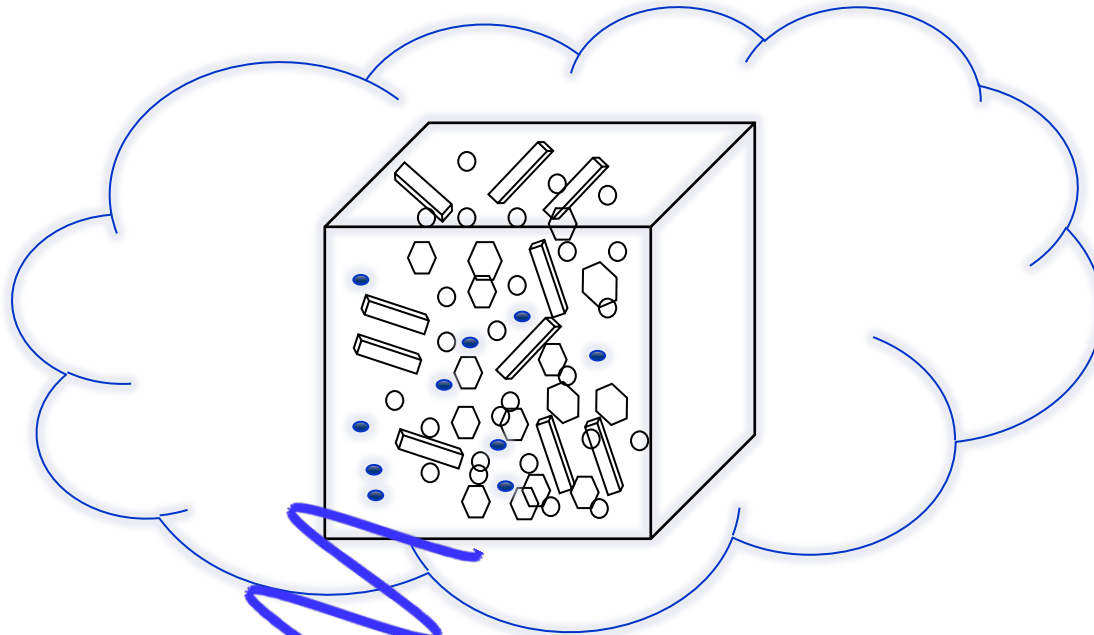
\*LATMOS (Fr)

@Lamp (Fr)

+University of Reading (UK)

#Centre for Australian Weather and Climate Research, (Australia)

# Nuages et télédétection

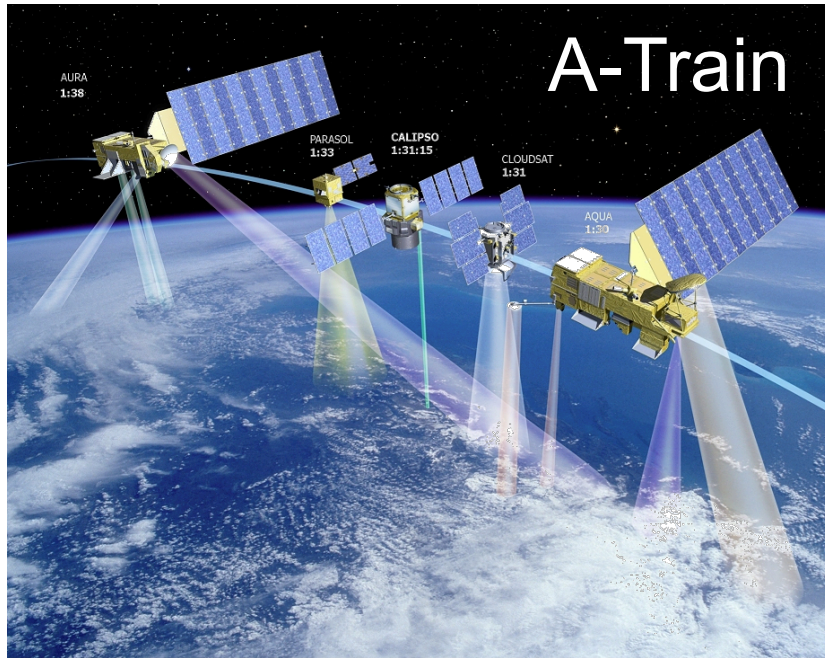


## Nuages et ondes électromagnétiques:

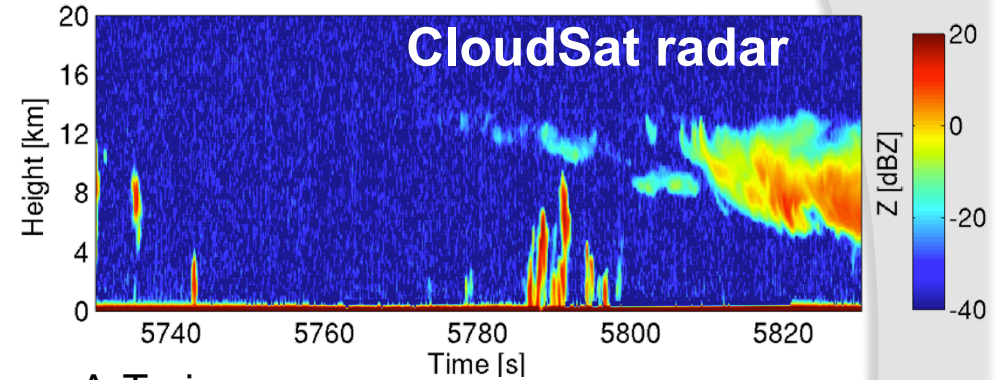
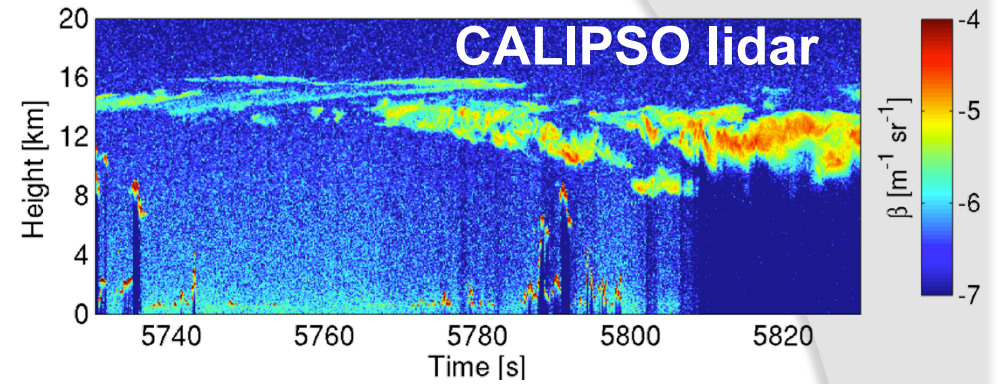
- En fonction de  $\lambda$  => interaction avec les constituants nuageux
- En fonction de  $\lambda$  => sensibilité différente

# Satellites

Depuis Avril 2006



© CNES - Avril 2005 / Illustration P.CARRIL



A-Train:

- CALIPSO:
  - Lidar : 532,1064 nm
  - WFC/IIR
- CloudSat: radar nuage (94GHz)
- Aqua/Terra: MODIS

## 2016 EarthCare



EarthCare:

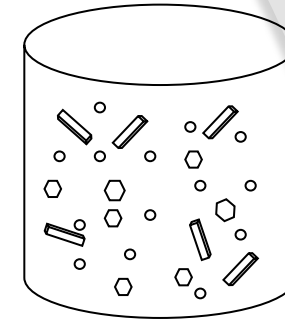
- ATLID: Lidar 355 nm (HRS)
- CPR: Radar nuage Doppler
- MSI : Imageur multi-spectral
- BBR: Radiomètre large bande

17 Avril 2014 – GDR – Observatoire de Paris

# Radar et lidar informations sur un volume échantillonné

## Relier les mesures aux constituants:

A partir de la distribution dimensionnelle des particules « N(D) » et de leur diamètre « D ».



$$Z = 10^{18} \int N(D) D^6 dD$$

Approximation de Rayleigh

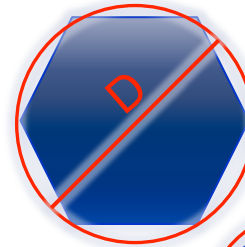
$$\alpha = 2 \cdot 10^3 \int N(D) A(D) dD$$

A(D) représente l'aire qui fait face au faisceau radar et lidar

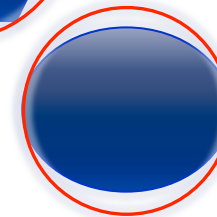
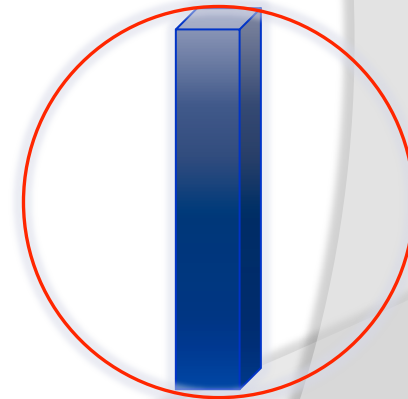
$$\beta(r) = \hat{\beta}(r) \exp \left[ -2 \int_0^r \alpha_v(r') dr' \right]$$

$$\hat{\beta} = \frac{\alpha_v}{S}$$

Plaquette hexagonale



Colonne



Goutte d'eau

# Les propriétés nuageuses

Pour les nuages, on s'intéresse à :

- ◉ Extinction => important pour les calculs de transfert radiatif
- ◉ IWC, LWC => contenus en eau sous forme de glace et liquide

$$LWC = \frac{\pi \rho_w}{6} \int N(D) D^3 dD \qquad IWC = \int N(D) M_{ice}(D) dD$$

$\rho_w$  est la densité de l'eau, ayant pour valeur  $10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

- ◉  $R_e$  => important pour les calculs de transfert radiatif et nous renseigne sur la taille des hydrométéores

$$r_e = \frac{3LWC}{2\rho_w \alpha} \qquad r_e = \frac{3IWC}{2\rho_i \alpha}$$

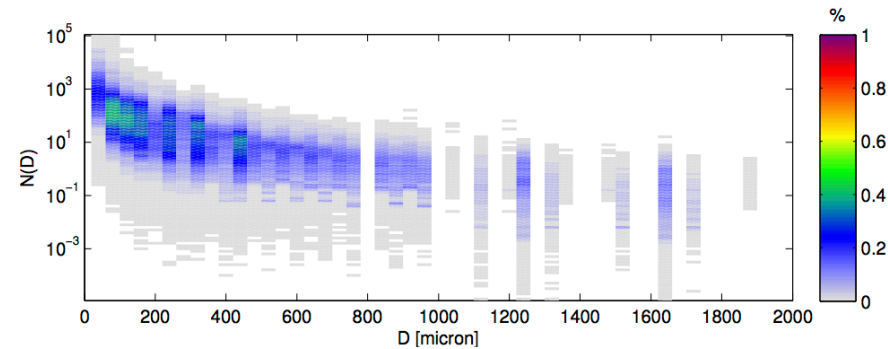
$\rho_i$  est la densité de la glace, ayant pour valeur  $917 \text{ kg.m}^{-3}$

# Distribution normalisée des particules de glace

- La distribution dimensionnelle des particules est extrêmement variable
- On utilise un artifice mathématique pour la représenter de la façon suivante:

$N(D) = N_0 * F(D/D_m)$  on peut fixer la forme  $F()$   
La connaissance de  $D_m$  et  $N_0^*$  permet d'avoir  $N(D)$

Delanoë et al. 2014



# Instruments complémentaires

# Exploitation de la différence de sensibilité des deux instruments

Radar et lidar différents par leur longueur d'onde

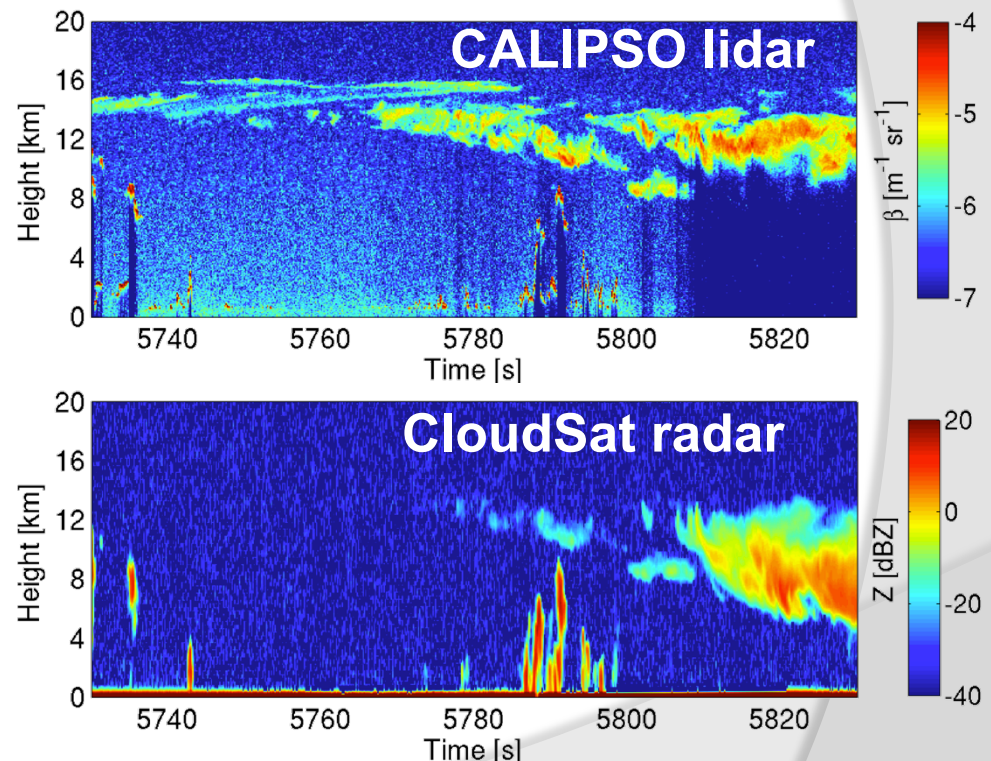
Moment d'ordre 6 (Rayleigh)

$$Z = 10^{18} \int N(D) D^6 dD$$

Moment d'ordre 2 (si A est un disque)

$$\alpha = 2 \cdot 10^3 \int N(D) A(D) dD$$

- pas sensibles aux mêmes constituants atmosphériques.
- le lidar est sensible
- le radar permet de pénétrer les nuages épais
  
- Identification des cibles observées
- Statistique de phase nuageuse
- On peut combiner les mesures





# Méthode de restitution des propriétés des nuages de glace

# Méthode de restitution des propriétés des nuages de glaces

- ⦿ Une classification identifie les nuages et leur phase
- ⦿ La combinaison radar/lidar/radiomètres est optimale pour la phase glace

Mais comment peut on combiner des mesures complémentaires mais différentes de manière optimale?

- ❁ Comment utiliser au mieux les capacités des instruments?
- ❁ Y-a-t-il un moyen de faire autrement que de combiner les résultats finaux des capteurs ?

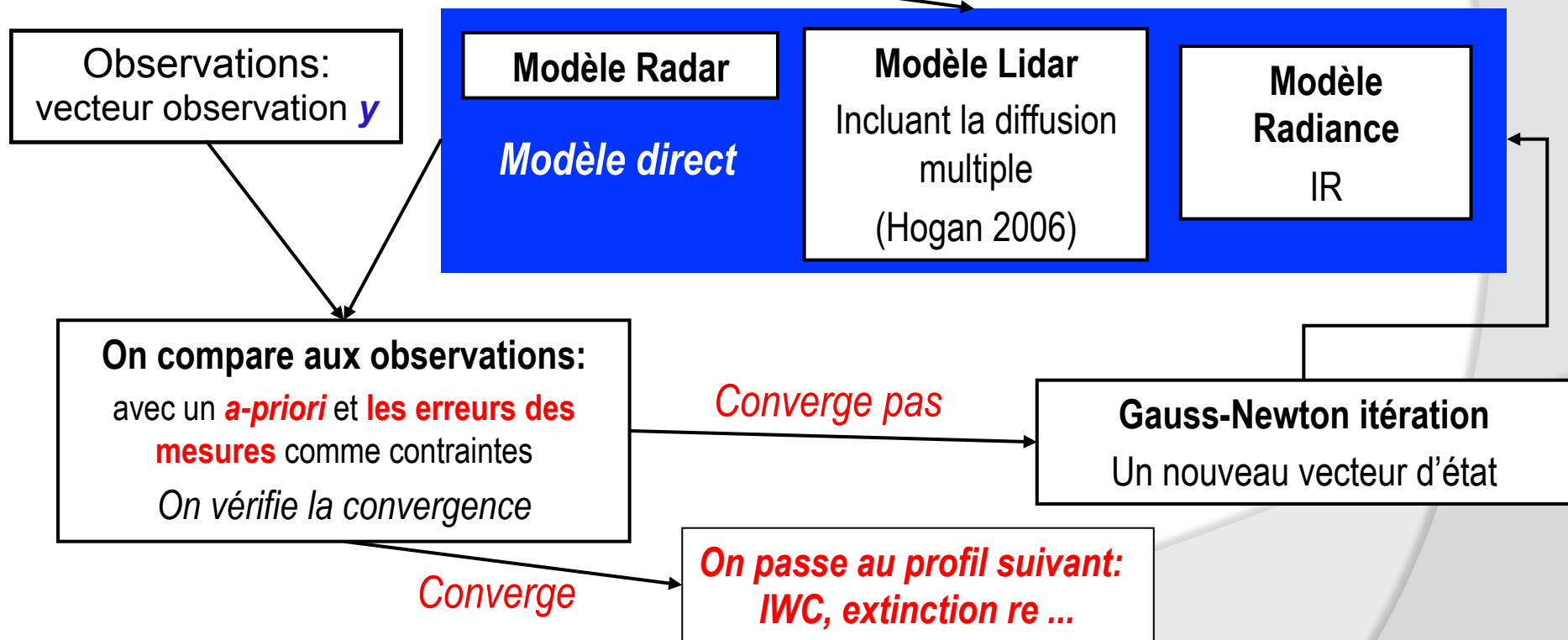
**=> Méthode variationnelle (estimation optimale)**

# Approche variationnelle

On connaît les **observations** (mesures instruments) et on veut connaître les propriétés des nuages de glace :  $\alpha$ , IWC,  $r_e$ ...

**Profil de données: définit un vecteur d'état  $x$**   
On utilise la **classification** pour spécifier les variables décrivant le nuage de glace à chaque porte

Delanoë and Hogan JGR, 2008-2010



Modèle direct, on inverse pas vraiment les mesures (très flexible mais nécessite des calculs)

# Approche variationnelle

Un peu de maths

- Prédire les mesures  $\mathbf{y}$  à partir du vecteur d'état  $\mathbf{x}$  en utilisant le modèle direct  $H(\mathbf{x})$ . Prédit également le *Jacobien*  $\mathbf{H}$
- Trouver  $\mathbf{x}$  qui minimise la fonction coût  $J$  de la forme
  - $J$  = déviation de  $\mathbf{x}$  par rapport a-priori
  - + déviation des observations par rapport au modèle direct
  - + "curvature" du profil d'extinction

## Méthode itérative Gauss-Newton

Prédiction du nouveau vecteur d'état:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{A}^{-1} \{ \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y} - H(\mathbf{x}_i)] - \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}^a) - \mathbf{T} \mathbf{x}_i \}$$

Où la matrice de *Hess* est

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{B}^{-1} + \mathbf{T}$$

$\mathbf{R}$  matrice de covariance des erreurs « observations »

$\mathbf{B}$  matrice de covariance des erreurs « variables d'état »

# Définir les vecteur x et y

- Le lidar

$$\beta(r) = \hat{\beta}(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha_v(r') dr'\right] \quad \hat{\beta} = \frac{\alpha_v}{S}$$

- Le radar

$$Z = 10^{18} \int N(D) D^6 dD$$

Approximation de Rayleigh

- Le radiomètre (IR)

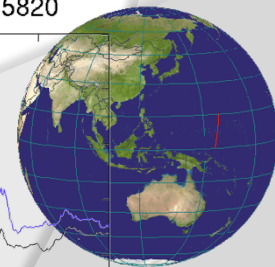
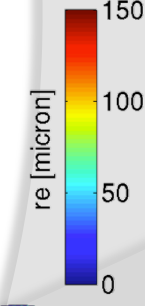
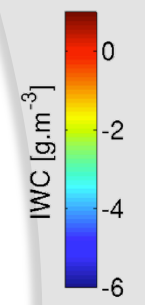
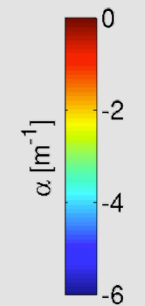
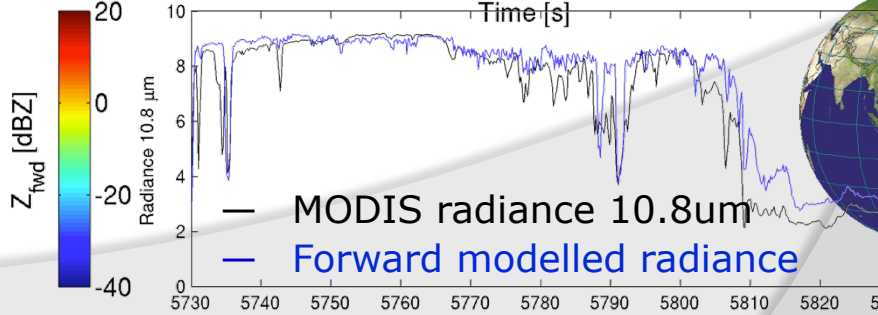
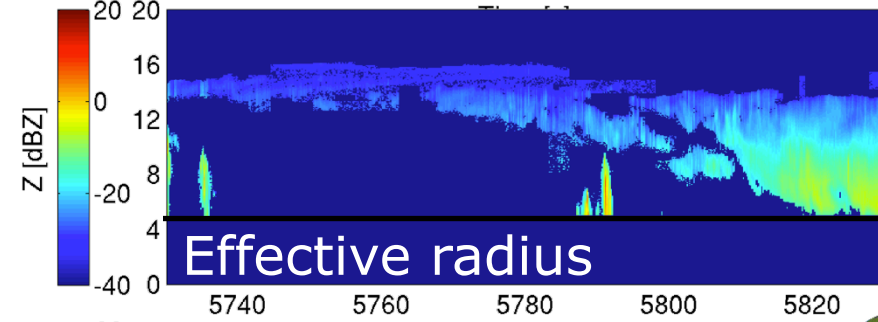
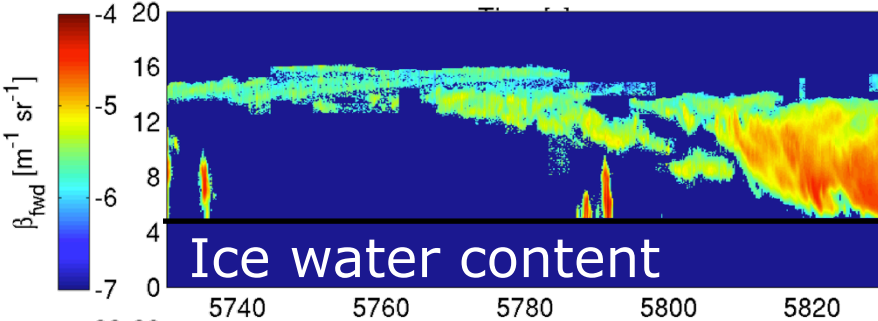
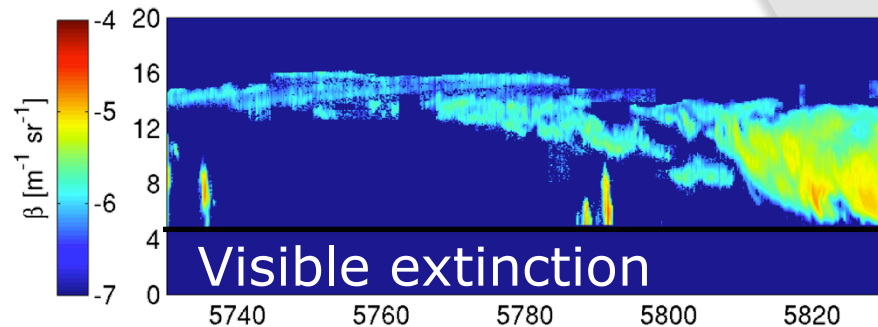
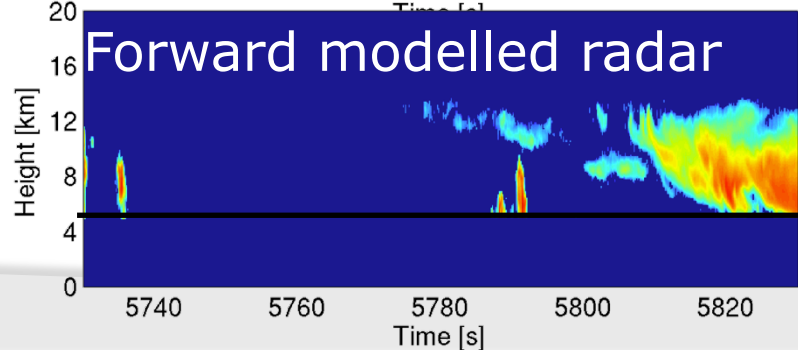
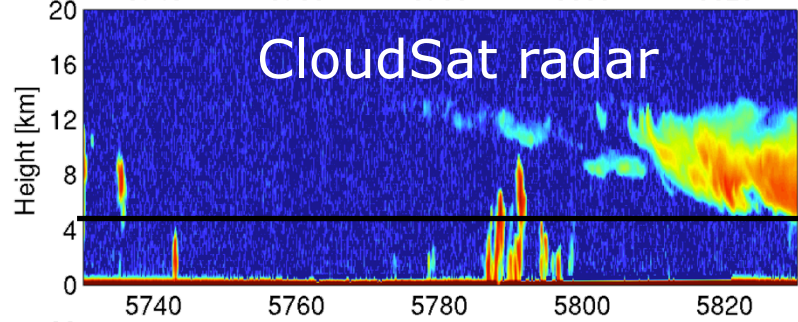
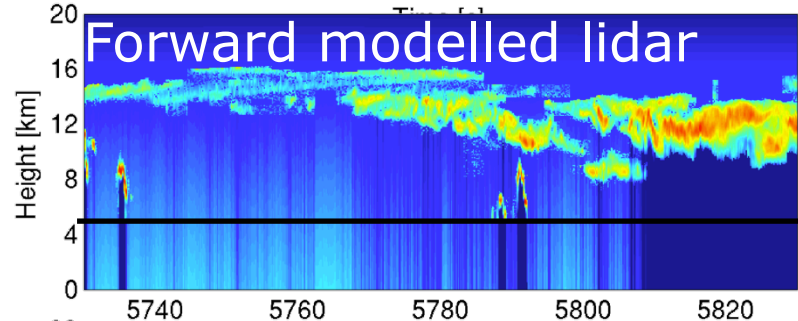
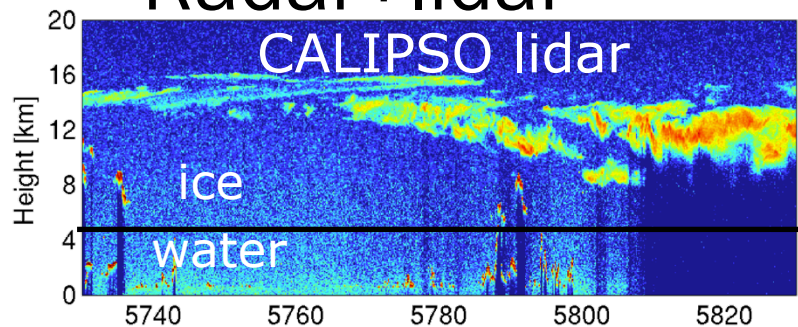
$$I_{\text{radiance}} = \text{Forward\_model}(N(D), \omega, g, \alpha_{\text{IR}})$$

\* Lorsque seulement un des instruments actifs est disponible notre *a priori*  $N'(T)$  prend le relais pour compenser le manque d'information.

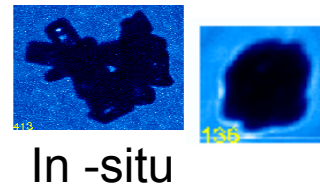
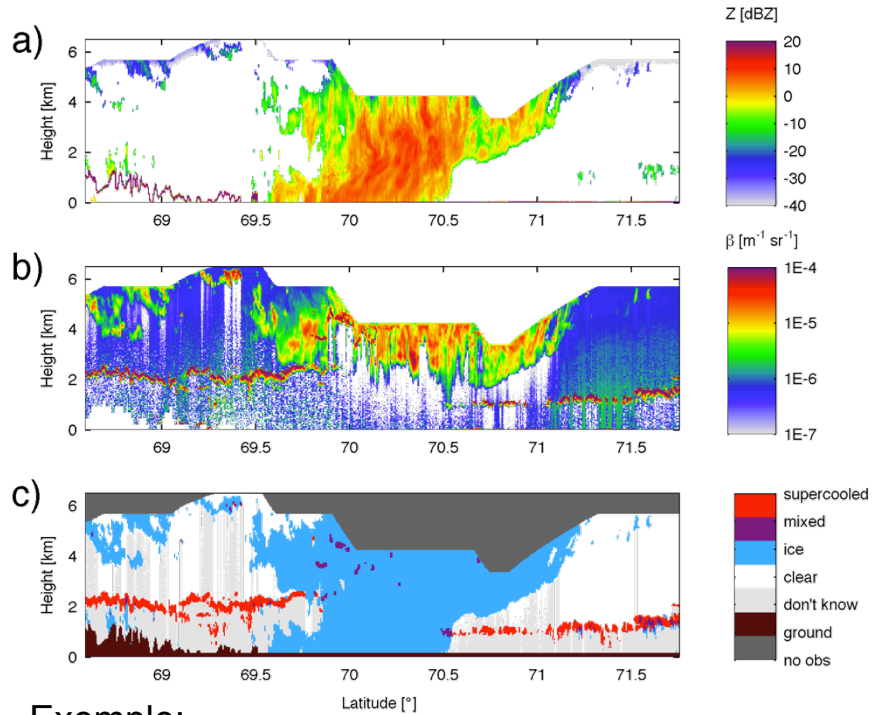
$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \ln \alpha_1^{\text{ice}} \\ \vdots \\ \ln \alpha_n^{\text{ice}} \\ \ln N'_1 \\ \vdots \\ \ln N'_m \\ a_{\ln S} \\ b_{\ln S} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \ln \beta'_1 \\ \vdots \\ \ln \beta'_n \\ Z_1 \\ \vdots \\ Z_m \\ I_{10\mu\text{m}} \\ \Delta I_{8.5-12.0\mu\text{m}} \end{pmatrix}$$

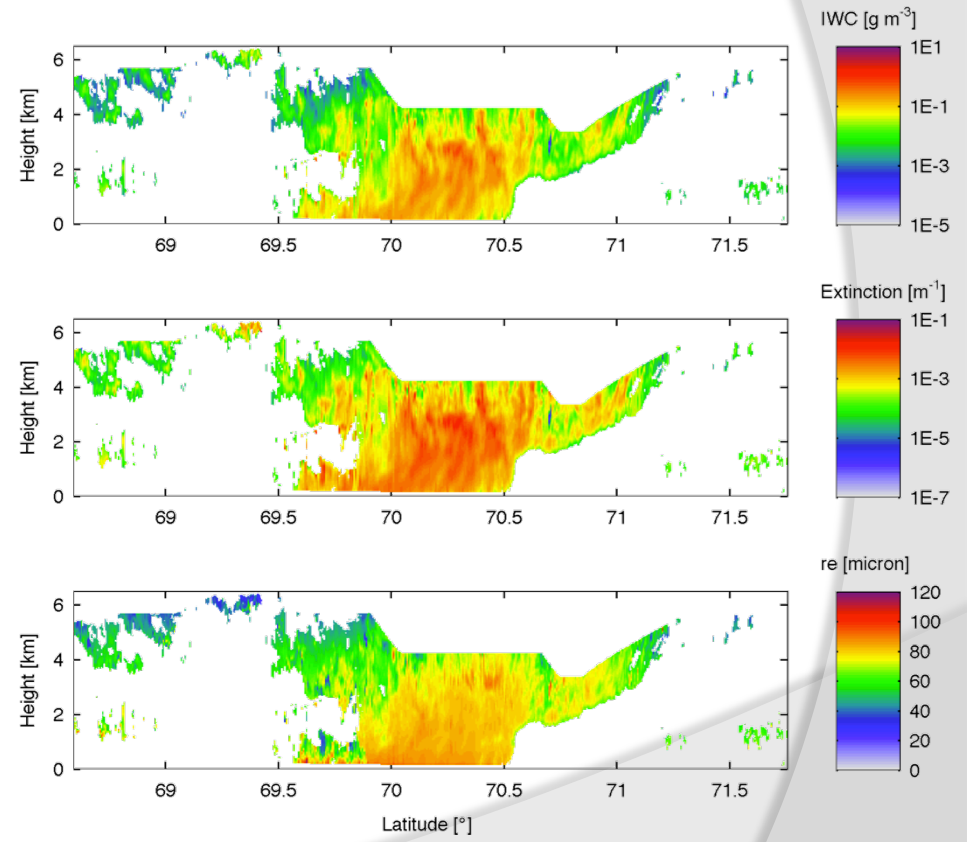
# Radar+lidar



# RALI



Mesures in-situ (LAMP)  
=>développement et validation de méthodes radar-lidar



Exemple:  
Campagne POLARCAT  
Latitudes Polaires  
★ Instruments LATMOS!

- ★ RASTA:  
Radar Doppler à 95GHz
- ★ LNG:  
Lidar (Leandre second génération)  
Rétrodiffusion à 532nm et 1064nm  
Haute résolution spectrale à 355nm, dépolarisation

Delanoë et al. 2013

# Passif micro-onde/subm

- ⊙ En complément du radar, la radiométrie micro-onde peut ajouter une contrainte intégrée forte sur la phase glace et la partie précipitante
- ⊙ RASTA+ISMAR/HAMP
- ⊙ Propositions de méthode?



Conclusion et discussion

# Amélioration des modèles directs

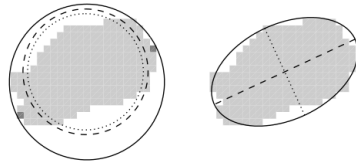
# La loi de masse ?

Lie la taille des particules à leur masse

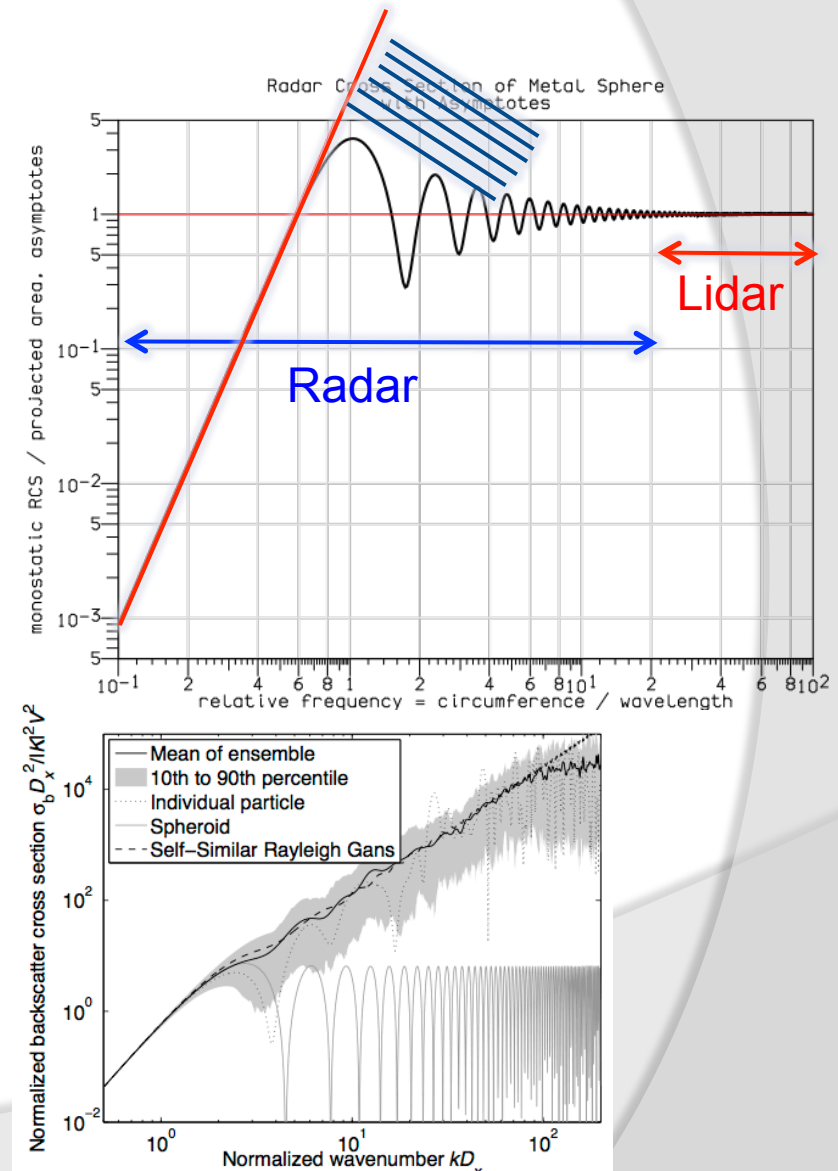
- ⊙ Important pour IWC, Z, ...
  - In-situ + analyse des images  $A(D) \Rightarrow M(D)$  (Lawson and Baker) ou bien en utilisant des classifications de particules et des lois « type »
  - In-situ + mesures bulk d'IWC (Heymsfield...)
    - Très peu de mesures bulk d'IWC de  $10^{-3}$  à  $10\text{g/m}^3$
  - In-situ + mesures radar ( $Z+V_d$ )
    - Bouniol et al. 2010, Fontaine et al. 2014
- ⊙ Objectifs:
  - Multiplier les jeux de données dans un maximum de configurations nuageuses
    - La statistique est extrêmement importante
    - Avoir de la télédétection pour se repérer dans le nuage et avoir une contrainte supplémentaire
- ⊙ LATMOS+LAMP  $\Rightarrow$  jeux de données assez vaste (POLARCAT/MT-Trop Africa+Maldives/HYMEX/HAIC+...)

# Les modèles de retro-diffusion?

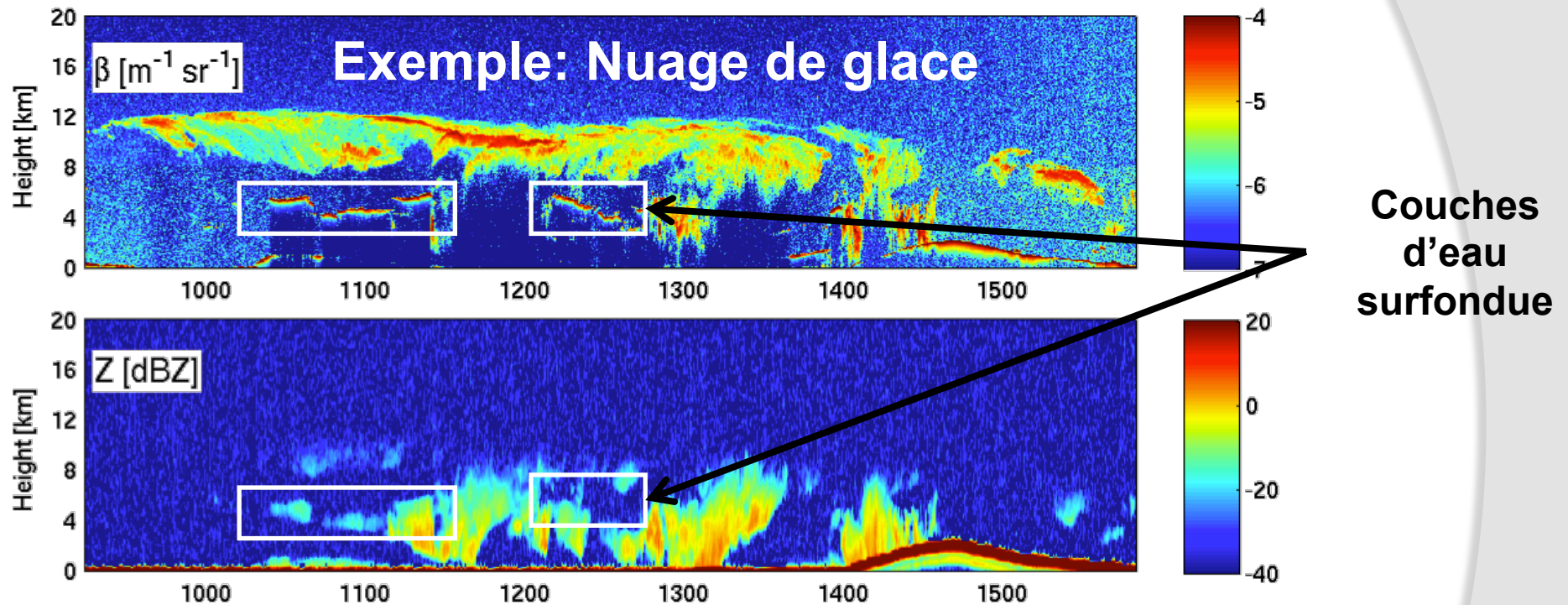
- ⊙ Rayleigh  $2\pi r/\lambda \ll 1$ 
  - D6 => approximation grossière
- ⊙ Mie
  - Hypothèse => sphères pleines
- ⊙ T-Matrix
  - Hypothèse => sphéroïdes



- ⊙ DDA
  - Discrete dipole approximation
  - => Bien si on a les détails de la particule... / cout calcul... on résoud les équations de Maxwell
- ⊙ Rayleigh-Gans
  - Basé sur la DDA pour créer une paramétrisation



# Identification de la phase nuageuse



Température du modèle (ECMWF) => Glace / Eau liquide

Idée simple :

En présence d'eau liquide surfondue, réponse différente du radar au lidar :

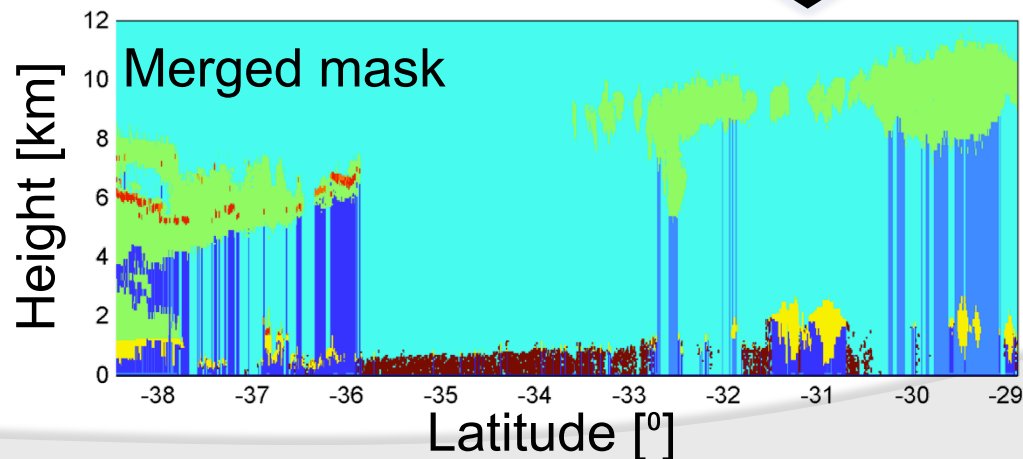
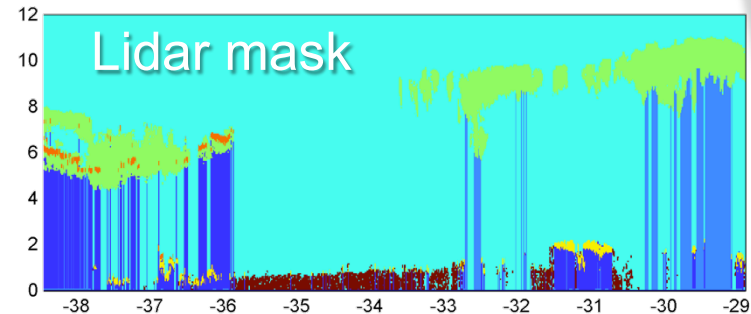
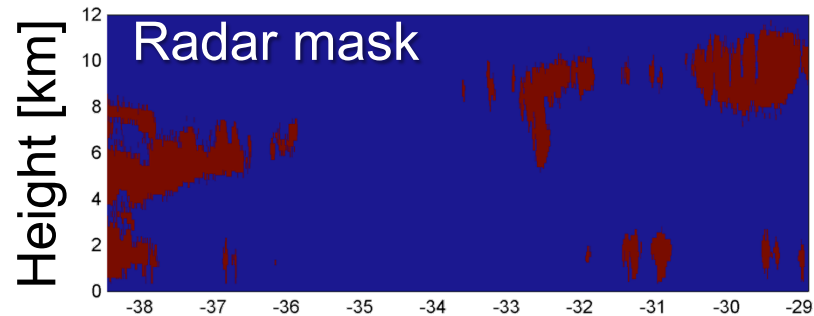
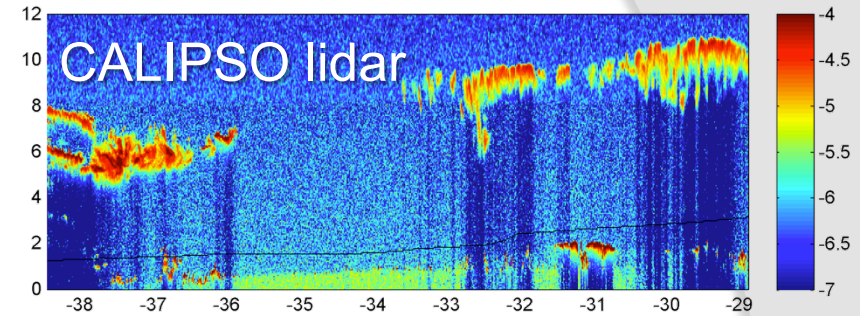
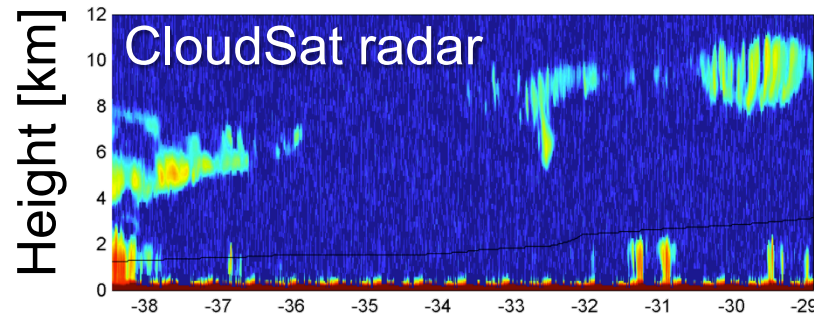
-Fort signal lidar

- Signal radar plus faible

Pour une couche de ~ 300m

# DARDAR-MASK: Exemple

Ceccaldi et al. JGR, 2013



- No signal
- Unreliable signal
- No feature
- Ice cloud
- Liquid cloud (warm)
- Supercooled
- Mixed phase
- Aerosol