

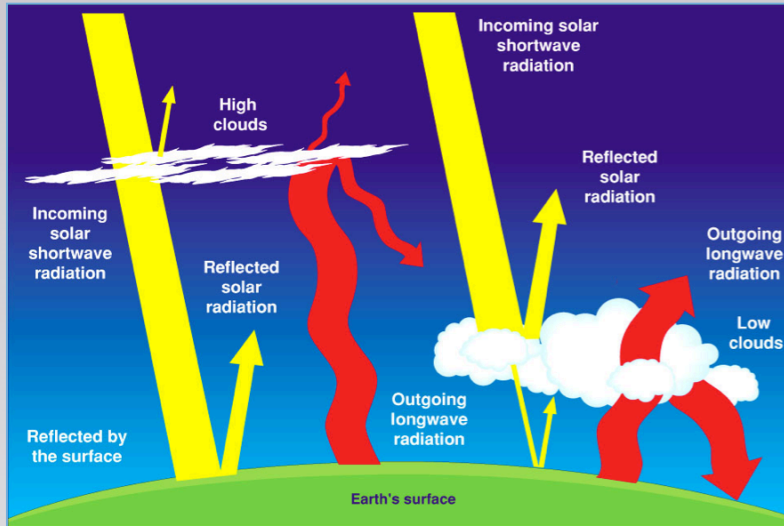
# Transfert Radiatif dans une atmosphère nuageuse 3D : modélisation et implications pour la télédétection des nuages

Céline Cornet

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

# Contexte (1/3)

Dans un contexte de changement climatique, rôles des nuages ?



## Paramètres clés d'origine anthropique :

- ① Augmentation de la température globale (GES)
- ② Variation de la quantité d'aérosols



## Rétroactions nuageuses sur le bilan radiatif :

- ① Rétroaction vraisemblablement  $> 0$
- ② Entre 1750 et 2010, forçage radiatif semble  $< 0$



## Incertitudes importantes (GIEC, 2013)

- Evolution de la couverture nuageuse et de ses caractéristiques
- Effets indirects des aérosols

Nuages bas = effet parasol = effet radiatif négatif



Nuages haut = effet de serre = effet radiatif positif

Globalement, les nuages ont un effet radiatif négatif =  $-20\text{W/m}^2$

(CERES, Loeb et al. 2009)

# Contexte (2/3)

## Observations des nuages par télédétection

### Globalement

Ex : Mission A-Train:

#### Radiomètre passifs:

POLDER/PARASOL: (2005-13)

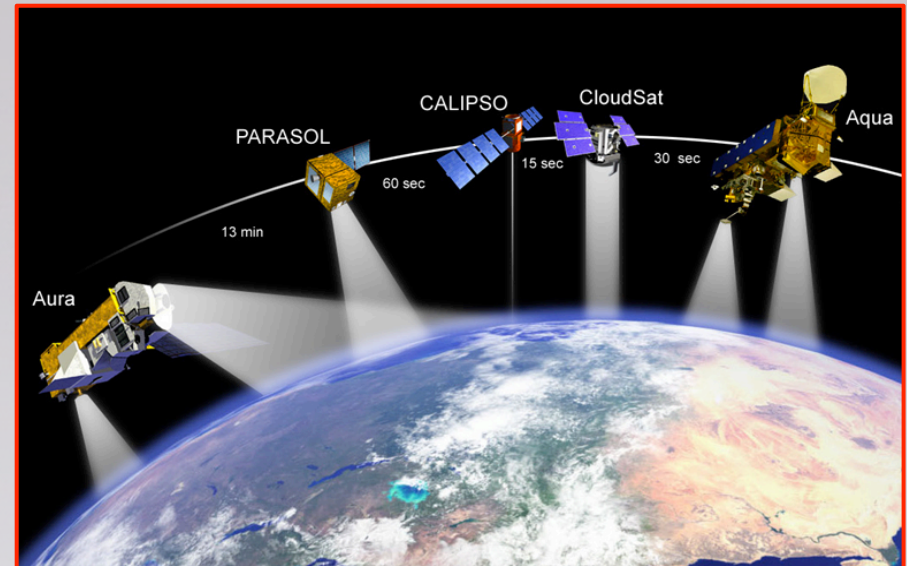
MODIS/AQUA: (2002- )

IIR/CALIPSO: (2006- )

#### Radiomètres actifs

CALIOP/CALIPSO (2006- )

CPR/CLOUDSAT (2006- )

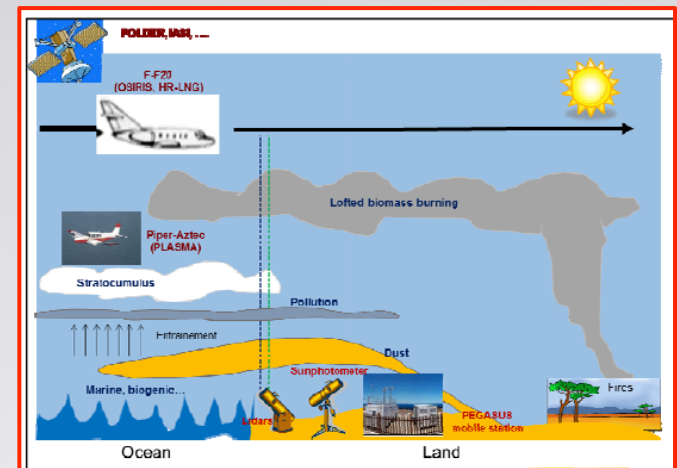


Dans un futur proche:

Mission EarthCARE, Mission 3MI

Régionalement, pour étudier les processus dynamiques ou interactions aérosols-nuages dans des zones clés: Ouest Afrique, Sud Asie, zone d'alizés, Arctique...

Ex: campagne AEROCLO-SA pendant Eté 2017



# Contexte (2/3)

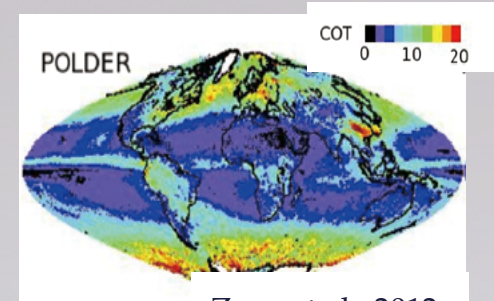
## Observations des nuages par télédétection

### Radiomètre passifs:

Quantités intégrées : COT, LWP ou flux montant

où niveaux supérieures : Reff

=> Couverture globale 2D selon horizontal



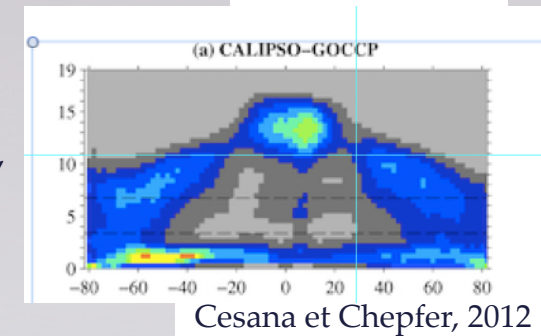
Zeng et al., 2012

### Radiomètres actifs CALIOP/CALIPSO; CPR/CLOUDSAT

ATLID/Earthcare; CPR/Earthcare

Profils verticaux : positionnement des couches d'aérosols/nuages, profils d'extinction

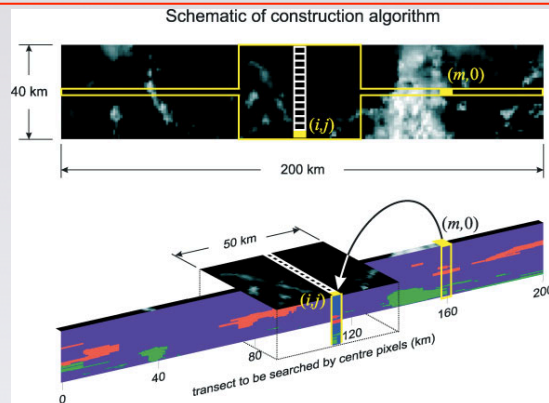
=> Couverture globale 2D selon vertical



Cesana et Chepfer, 2012

=> **Globalement:** structures 3D moyennes des nuages

=> **Localement :** Reconstruction 3D, ex Barker et al., 2011 (Lidar + Radar + MODIS ou MSI)



=> **Reconstruction 3D**

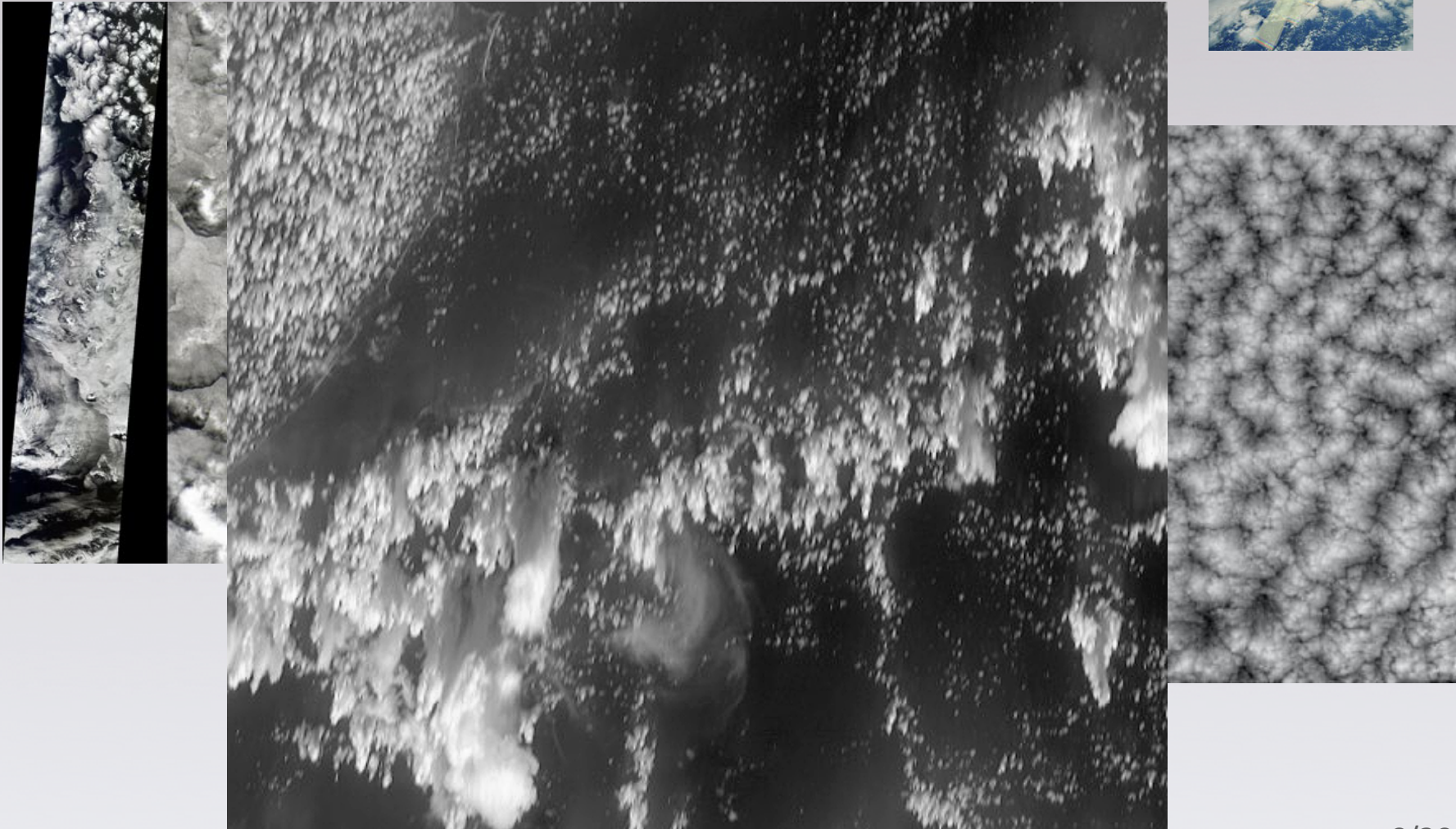
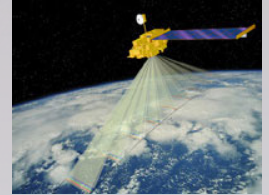
**Sans Transfert Radiatif 3D (TR3D)**

# Effets des hétérogénéités nuageuses - Observation (1/5)

Restitution de paramètres nuageux par télédétection:  
**Hypothèse du nuage homogène, plan-parallèle et infini**

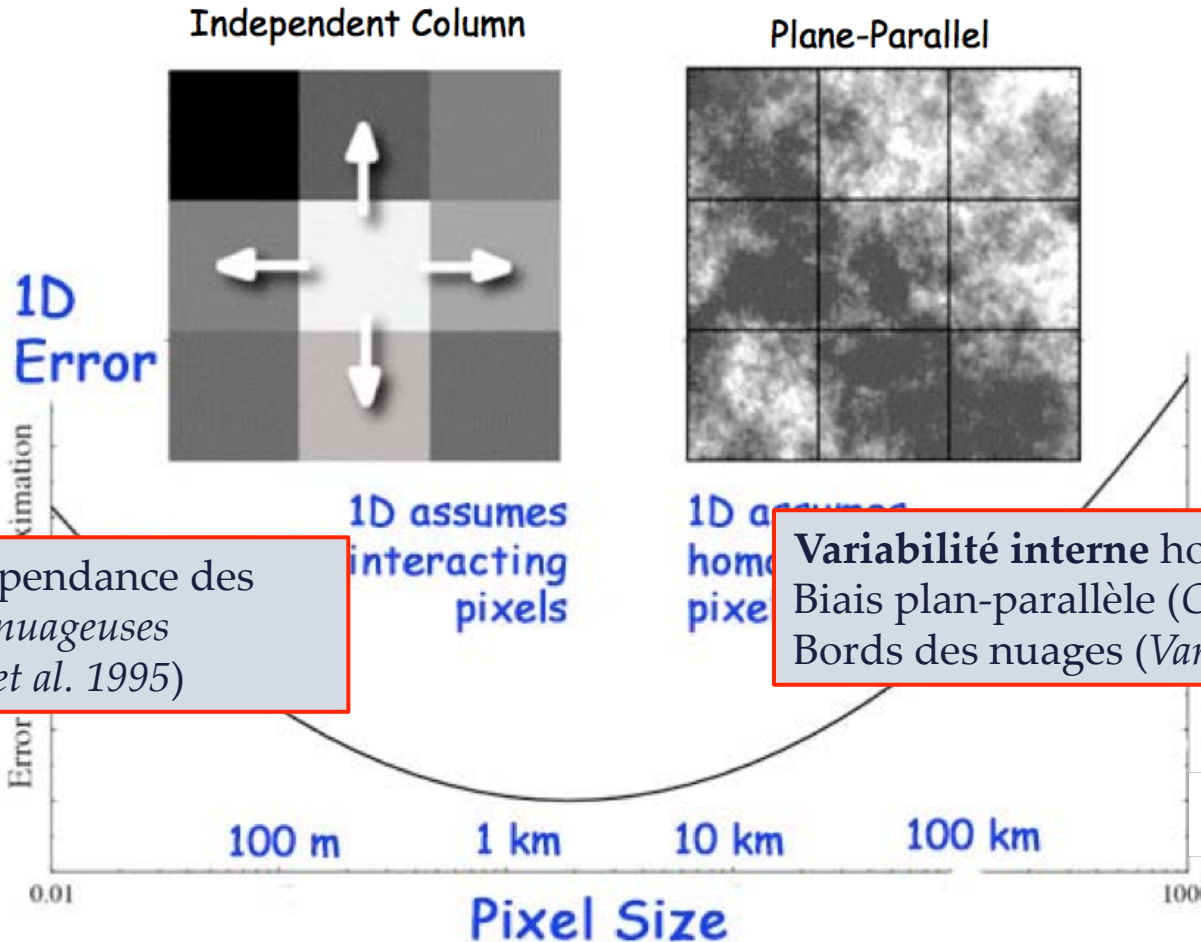
Nuages observés par MISR/TERRA (275m de résolution):

MISR



# Effets des hétérogénéités nuageuses - Observation (2/5)

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006)



Non-indépendance des colonnes nuageuses (Marshak et al. 1995)

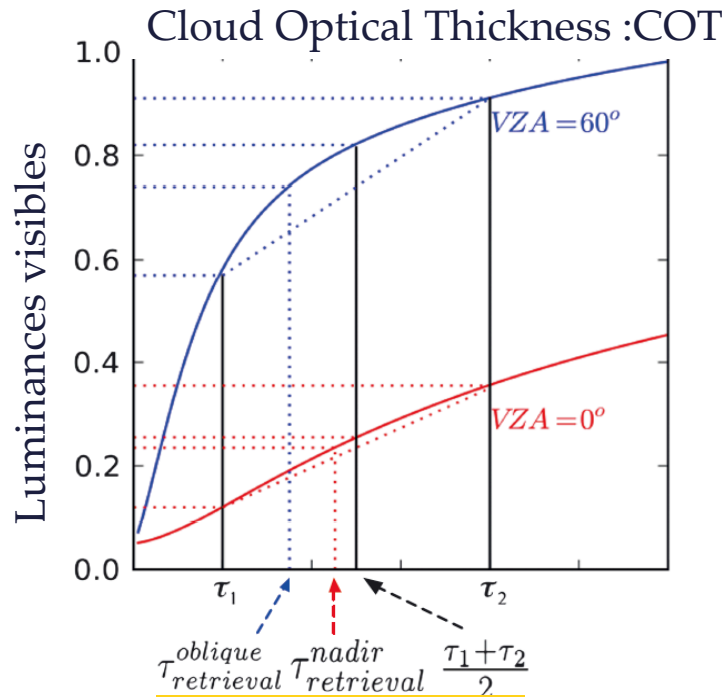
Variabilité interne horizontale et verticale  
Biais plan-parallèle (Cahalan et al. 1994)  
Bords des nuages (Varnai et Marshak, 2007)

Schéma emprunté dans une présentation de Warren Wiscombe

+ Effets de surbrillance et d'ombrage (Loeb et Davies, 1996, 1997, 1998; Varnai et Davies, 1999)

# Effets des hétérogénéités nuageuses - Observation (3/5)

Biais plan-parallèle en fonction des angles d'observation



$COT_{ret} < COT_{mean}$

COT

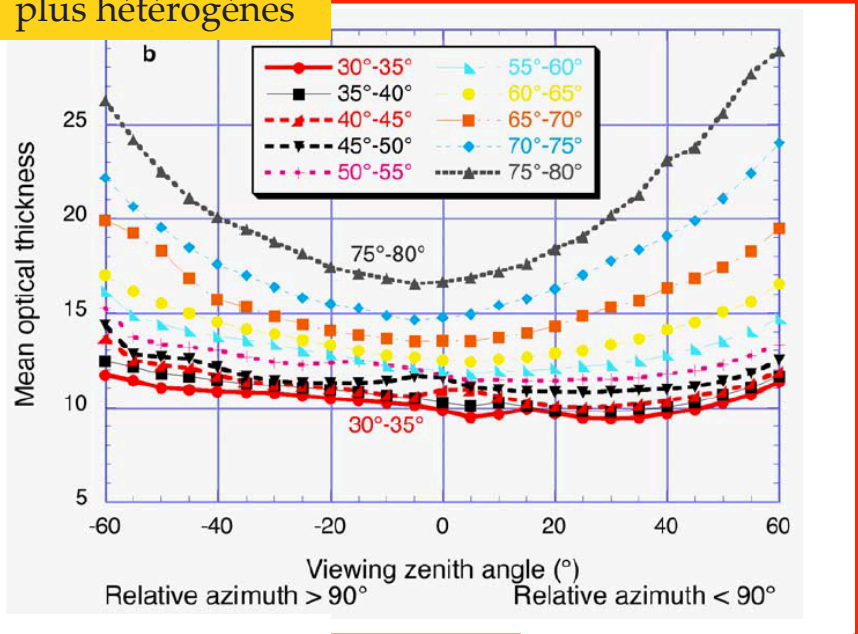


Biais plan-parallèle = Forme en cloche

Dépendance angulaire observée par MODIS:

1/3 des nuages les plus hétérogènes

Varnai et Marshak, 2007



Diffusion avant

Rétrodiffusion

Forme en U

$\Theta_v \nearrow$ , « trous » deviennent moins visible donc COT  $\nearrow$

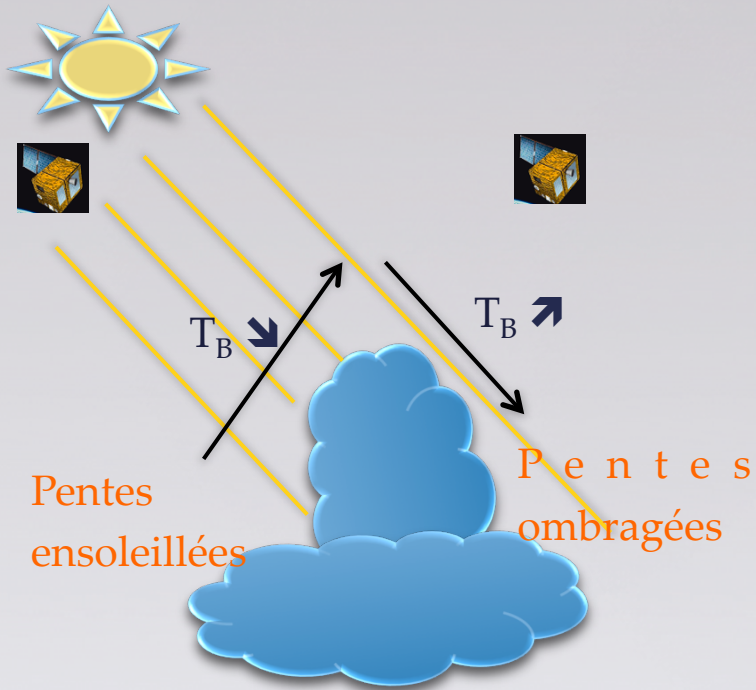
# Effets des hétérogénéités nuageuses - Observation (4/5)

Principe à partir de MODIS: *Varnai et Marshak, 2002*

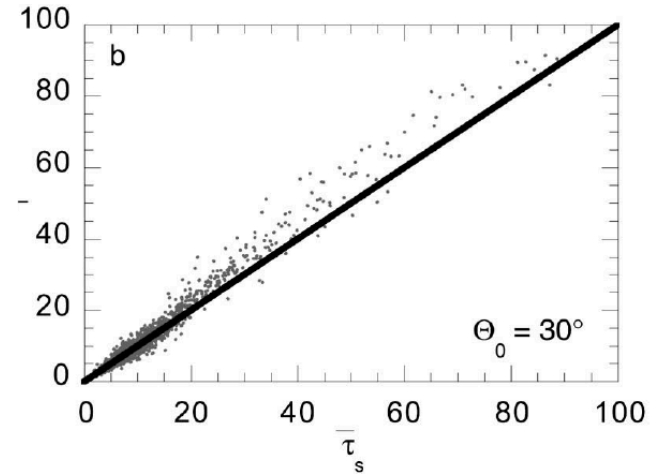
Détection des pentes nuageuses

ensoleillées ou ombragées

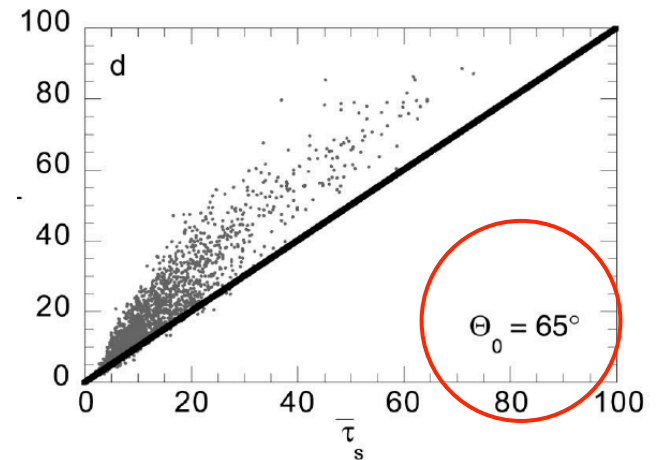
grâce aux températures de brillance IR



COT  
ensoleillées



COT  
ensoleillées

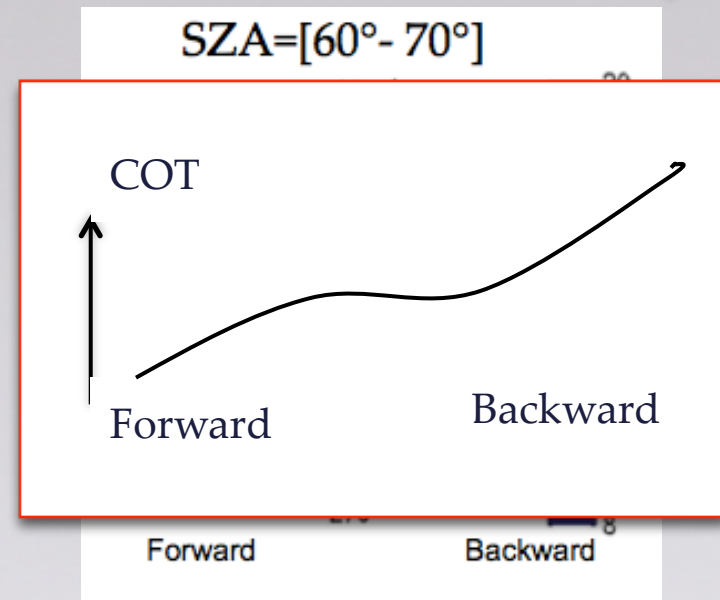
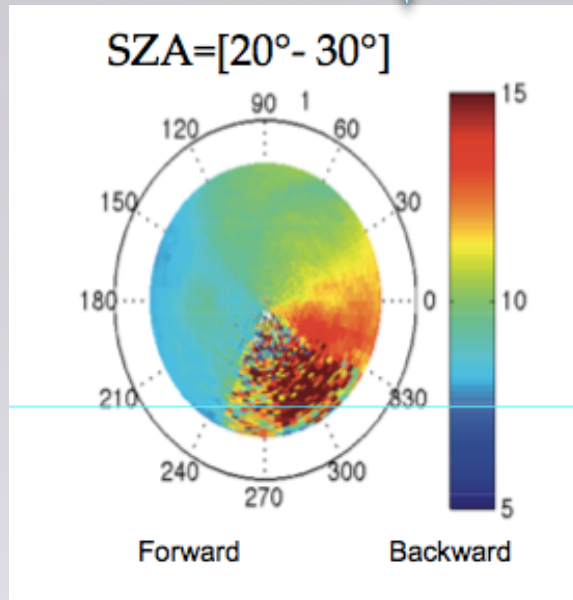


COT ombragées



# Effets des hétérogénéités nuageuses - Observation (5/5)

Effets angulaires observés par POLDER



Épaisseur optique (COT) directionnelle restituée par POLDER pour deux classes d'angles solaires

# Simulation des effets des hétérogénéités nuageuses sur les paramètres nuages inversés

## I. Méthodologie

### II. Radiomètre passif : ex POLDER/PARASOL (multi-angulaire + polarisation)

Effets sur épaisseur optique et albédo des nuages et l'albedo

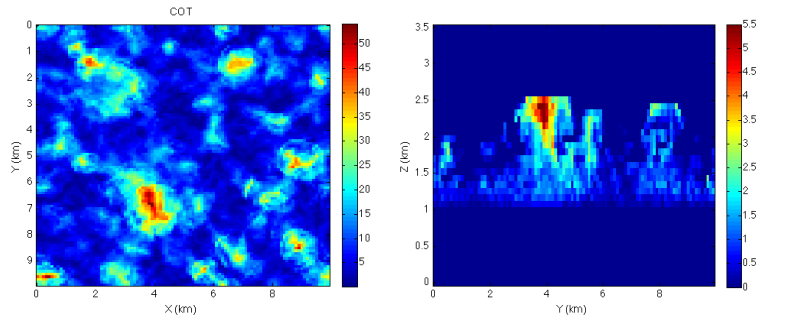
Effets sur la restitution des aérosols au dessus des nuages

### I. Radiomètre actif : ex CALIOP/CALIPSO

Effets

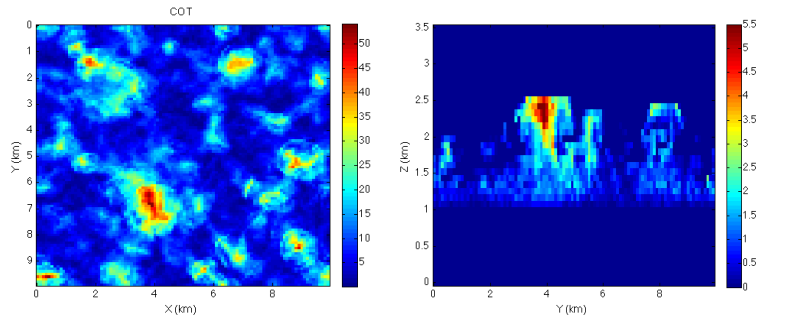
# Simulation - Méthodologie suivie

Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (RAMS)



# Simulation - Méthodologie suivie

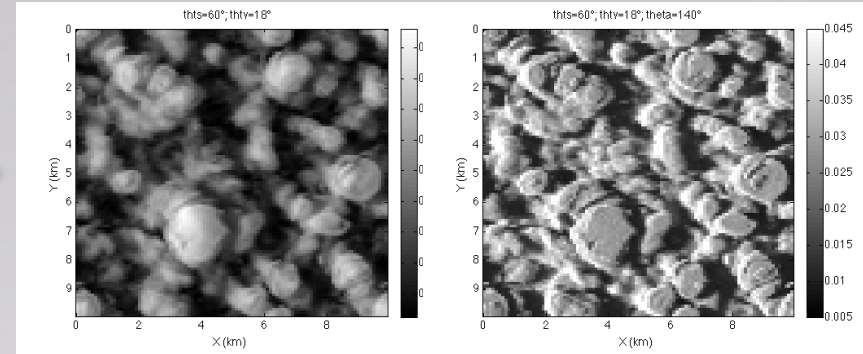
Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (RAMS)



3D RT

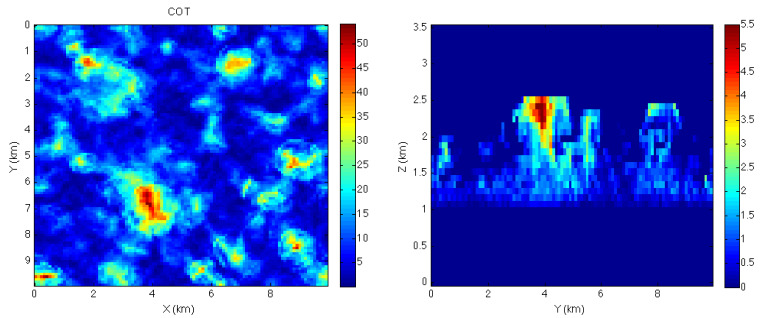


Simulation des luminances  
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*

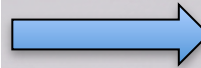


# Simulation - Méthodologie suivie

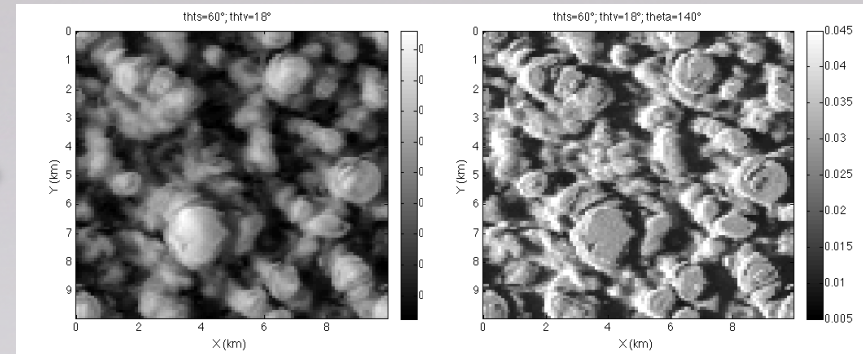
Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances  
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ  
nuageux + 1DRT



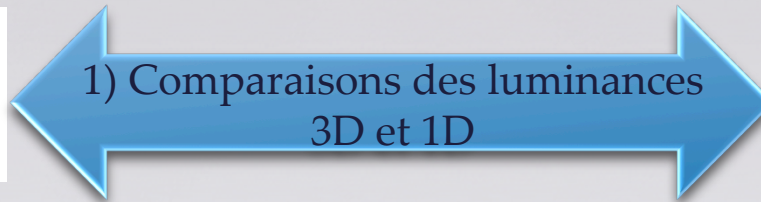
Moyenne le champ  
de luminances



**R1D** : Luminance 1D à la  
résolution de l'instrument  
(6x7km ou 1x1km)

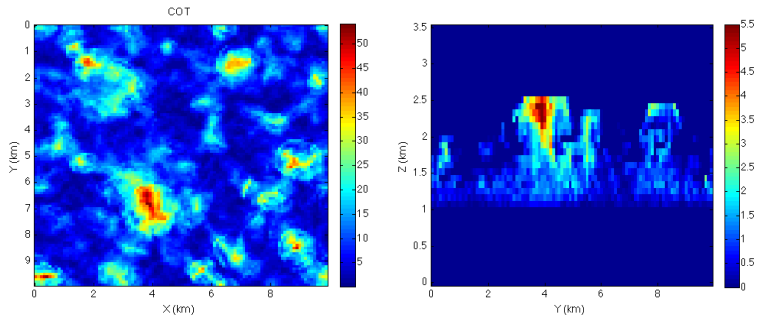
1) Comparaisons des luminances  
3D et 1D

**R3D**: Luminance 1D à la  
résolution de l'instrument  
(6x7km ou 1x1km)



# Simulation - Méthodologie suivie

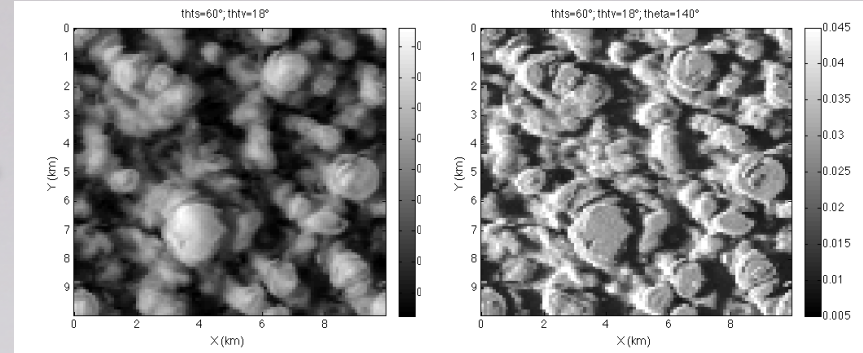
Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances  
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ nuageux + 1DRT



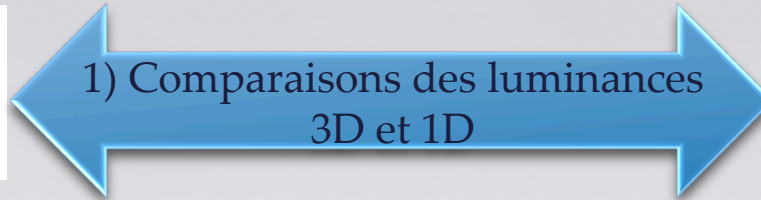
**R1D** : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

Moyenne le champ de luminances



**R3D**: Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances 3D et 1D



Applique l'algorithme opérationnel

**Propriétés nuageuses 1D** :  
COT, Reff, Veff,  
Albedo



2) Comparaisons des paramètres restitués

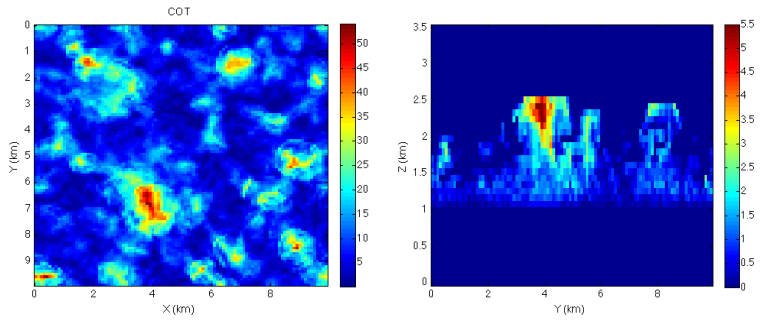


**Propriétés nuageuses 3D**: COT,  
Reff, Veff,  
Albedo



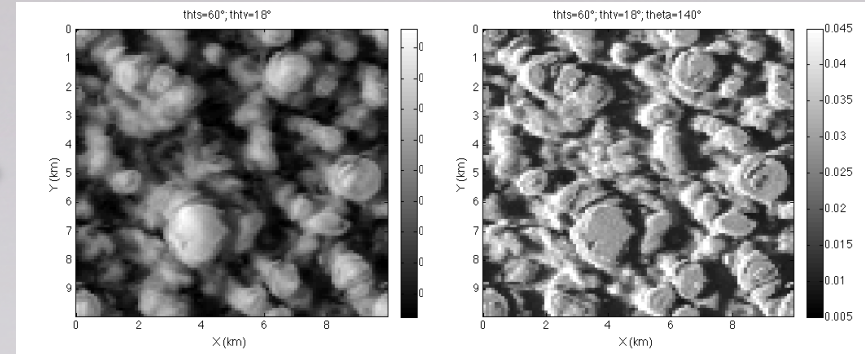
# Simulation - Méthodologie suivie

Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
ou LES model



Moyenne champ nuageux + 1DRT

Simulation des luminances  
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne le champ de luminances

**R1D** : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances 3D et 1D

**R3D**: Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

Applique l'algorithme opérationnel

**Propriétés nuageuses 1D** :  
COT, Reff, Veff,  
Albedo

2) Comparaisons des paramètres restitués

**Propriétés nuageuses 3D**: COT,  
Reff, Veff,  
Albedo

# Simulation - Méthodologie suivie

## Génération de champs nuageux 3D

- Modèle type LES (Large Eddy Simulation)
- Modèle 3DCLOUD: *Szczap et al., 2014*

Combine approche physique et stochastique

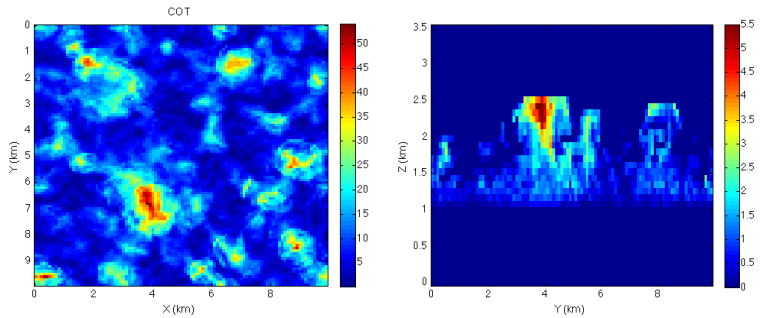
1. Résolution très simplifiée des équations de Navier-Stokes et thermodynamiques
2. Ajustement des propriétés statistiques du champs nuageux (pente  $-5/3$ , distribution)

Entrée du modèle : taille/résolution du domaine, profils atmosphériques, épaisseurs optiques moyennes et paramètre d'hétérogénéité



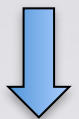
# Simulation - Méthodologie suivie

Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (BRAMS)



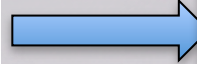
Moyenne champ nuageux + 1DRT

**R1D** : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)

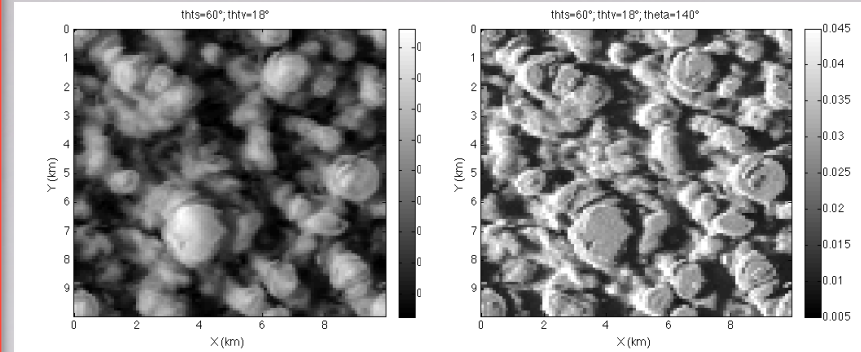


**Propriétés nuageuses 1D** :  
COT, Reff, Veff, Albedo

3D RT



Simulation des luminances  
3DMPCOL- *Cornet et al., 2010*



Moyenne le champ de luminances

**R3D** : Luminance 1D à la résolution de l'instrument (6x7km ou 1x1km)



**Propriétés nuageuses 3D** : COT, Reff, Veff, Albedo

1) Comparaisons des luminances 3D et 1D

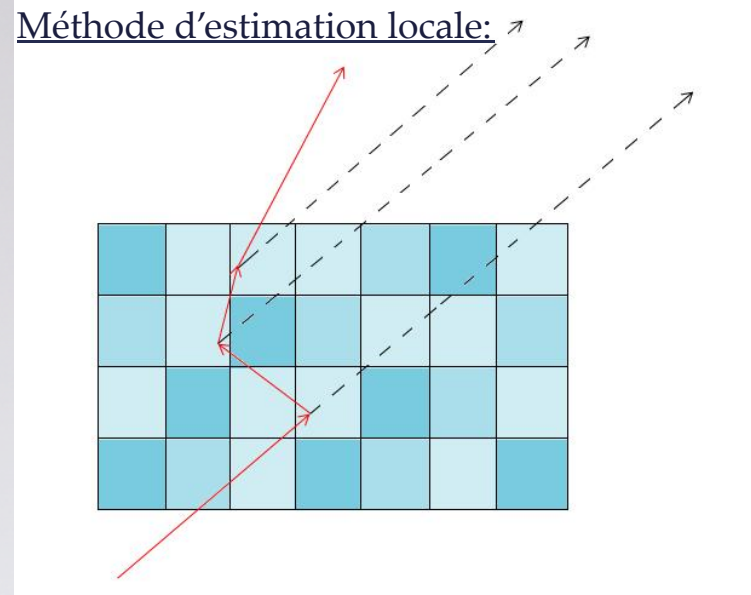
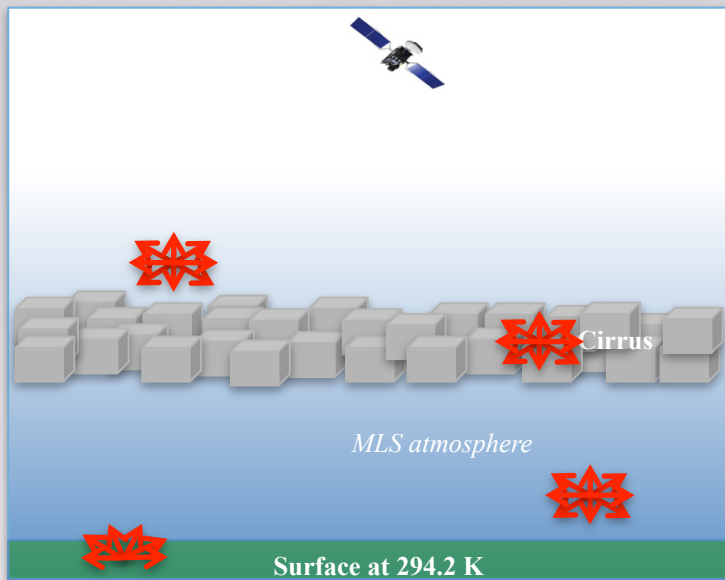
Applique l'algorithme opérationnel

2) Comparaisons des paramètres restitués

# Simulation - Méthodologie suivie

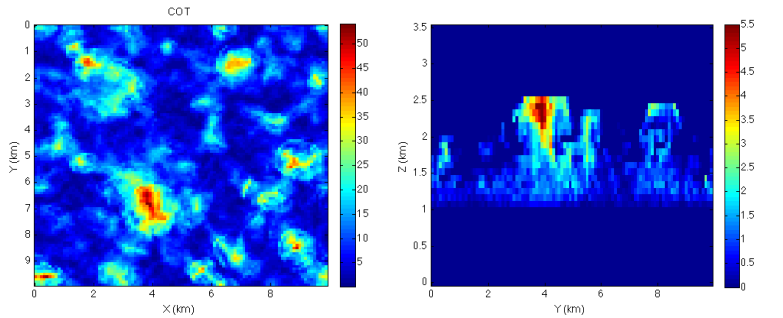
## Transfert radiatif atmosphérique 3D , Principe:

- Calcul du vecteur de Stokes (I,Q,U,V) et des flux en réflectances et transmittances
- Suivi des photons à travers un milieu tridimensionnel
- Méthode d'estimation locale (*Marshuk, 1980; Marshak et Davis; 2005, Mayer, 2009*)



# Simulation - Méthodologie suivie

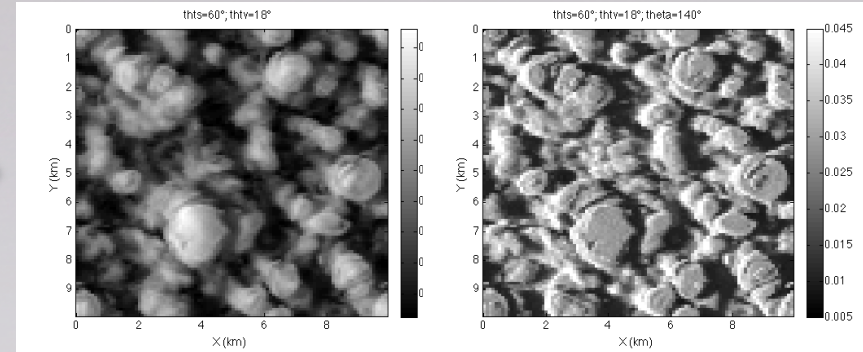
Génération d'un champ nuageux (100m)  
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*  
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances  
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ  
nuageux + 1DRT

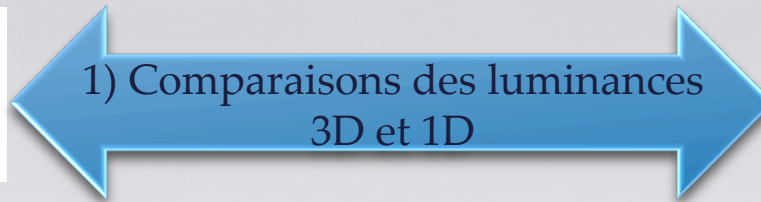


Moyenne le champ  
de luminances



**R1D** : Luminance 1D à la  
résolution de l'instrument  
(6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances  
3D et 1D

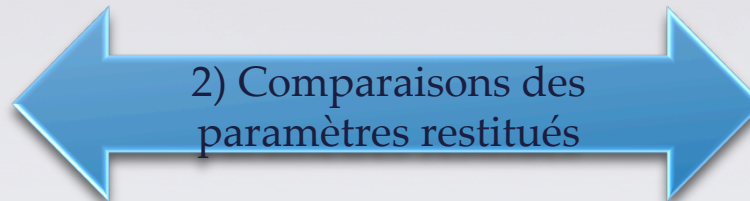


**R3D**: Luminance 1D à la  
résolution de l'instrument  
(6x7km ou 1x1km)

Applique l'algorithme opérationnel

**Propriétés  
nuageuses 1D** :  
COT, Reff, Veff,  
Albedo

2) Comparaisons des  
paramètres restitués



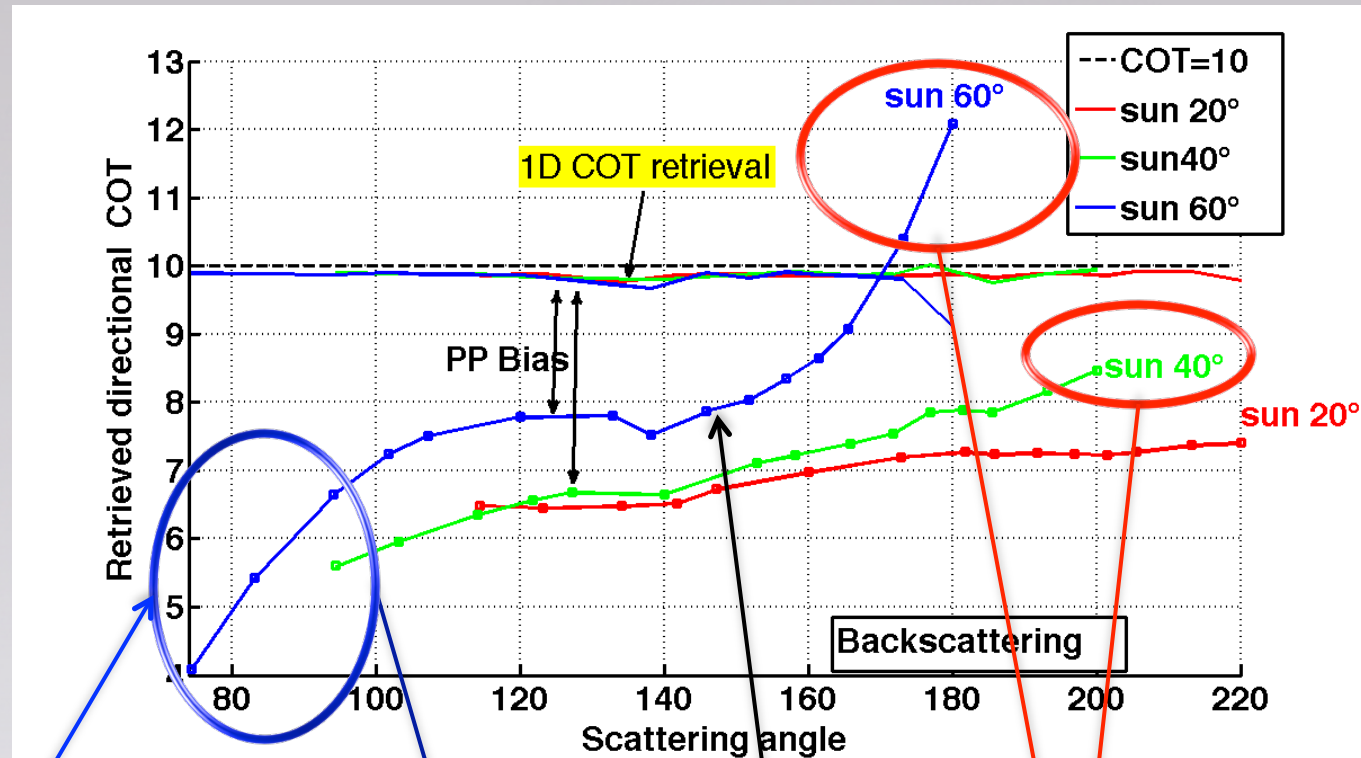
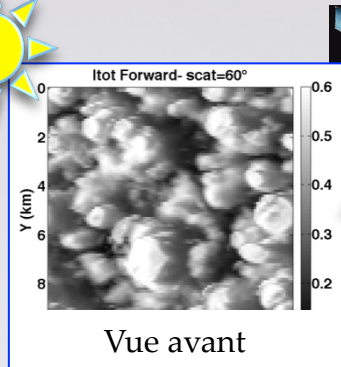
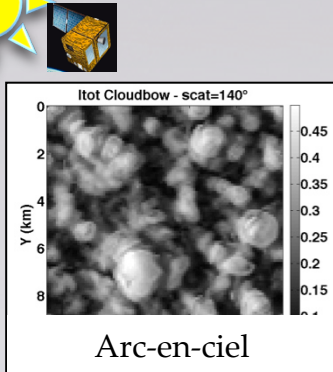
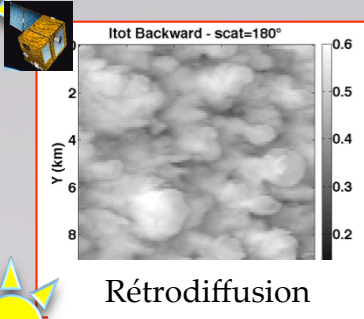
**Propriétés  
nuageuses 3D**: COT,  
Reff, Veff,  
Albedo

# Simulation des effets des hétérogénéités nuageuses sur les paramètres nuages inversés

- I. Méthodologie
- II. Radiomètre passif : ex POLDER/PARASOL (multi-angulaire + polarisation)
  - Effets sur épaisseur optique et albédo des nuages
  - Effets sur la restitution des aérosols au dessus des nuages
- III. Radiomètre actif : ex CALIOP/CALIPSO

# Simulation: Effets sur l'épaisseur optique restituée

Algorithme POLDER : R (670/865nm) --> COT - *Buriez et al., 1997*



Biais plan-parallèle pour toutes les vues  
=>  $COT_{3D} < COT_{1D}$

Ombrage  
 $COT_{3D} \ll COT_{1D}$

Illumination  
 $COT_{3D} \geq COT_{1D}$

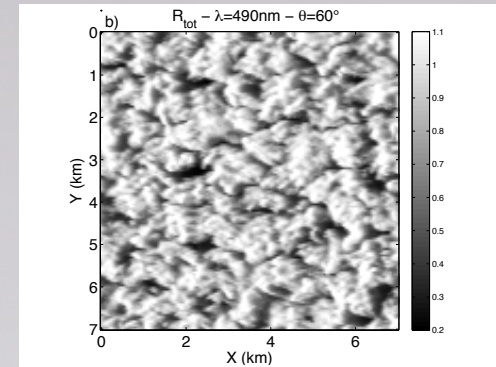
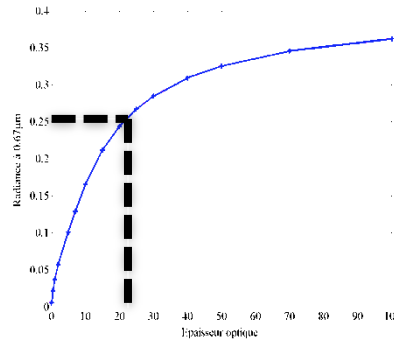
# Simulation: Effets sur l'albédo du nuage restitué

## Albédo du nuage:

Albédo modélisé suivant hypothèse 1D:

Mesures de Luminances  $R(\theta_s; \theta_v; \phi_v) \rightarrow$

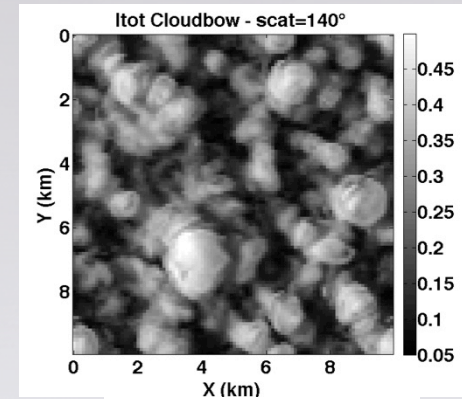
COT  $\rightarrow$  Flux  $F(\theta_s)$



Nuage plat

Différence relative (%) entre albédo restitué avec algorithme opérationnel (1D) et l'albédo simulé avec modèle RT 3D (COT =10)

Différence relative (%)	$\theta_s=20^\circ$	$\theta_s=40^\circ$	$\theta_s=60^\circ$
Nuage plat (%)	-2.09	-2.80	2.35
Nuage bosselé (%)	-2.94	0.87	5.78



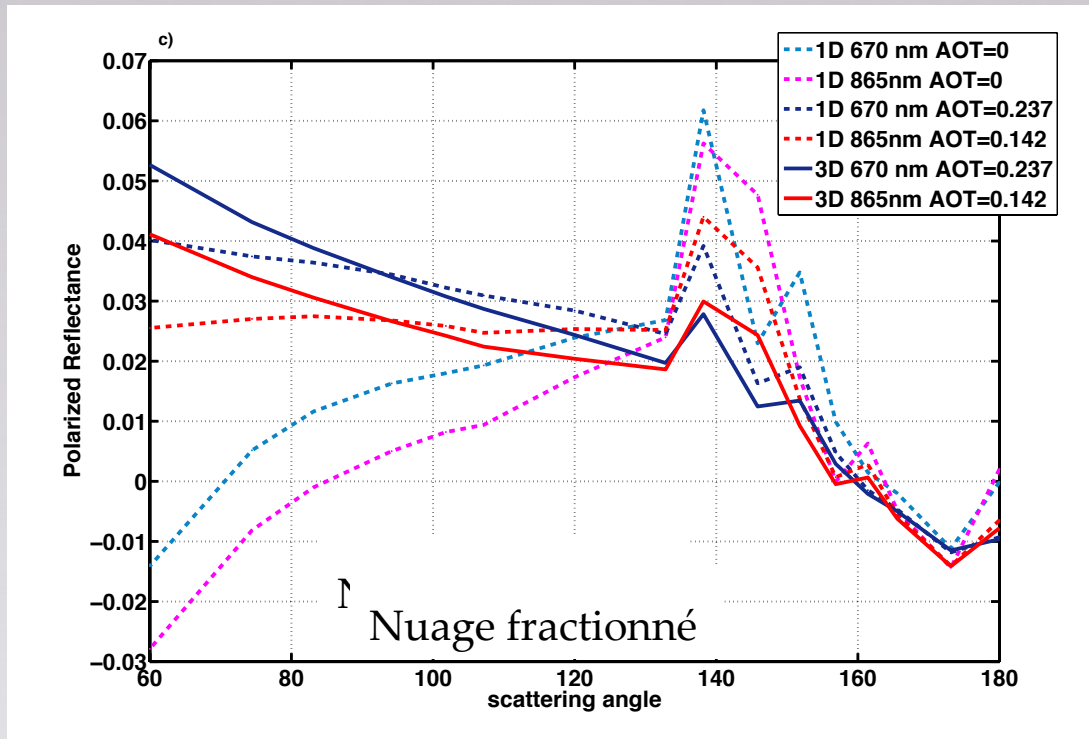
Nuage bosselé

- Différences faible pour le nuage plat
- Différence plus importante pour nuage bosselé
  - $\theta_s=20^\circ \Rightarrow$  légère sous-estimation  $\approx 3\%$
  - $\theta_s=60^\circ \Rightarrow$  surestimation  $\approx 6\%$

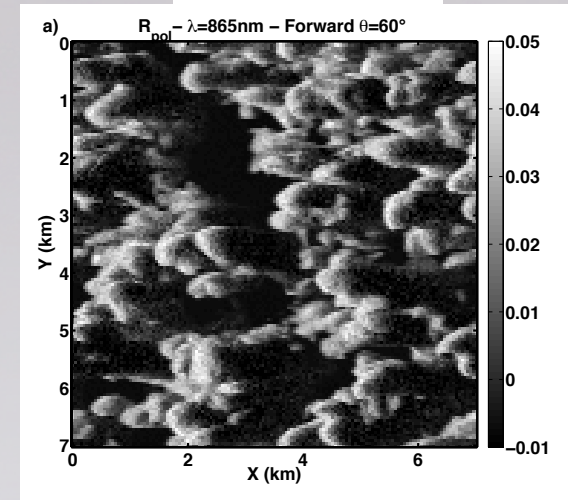
# Effets sur restitution aérosols au dessus des nuages

## Luminances polarisées multi-angulaires

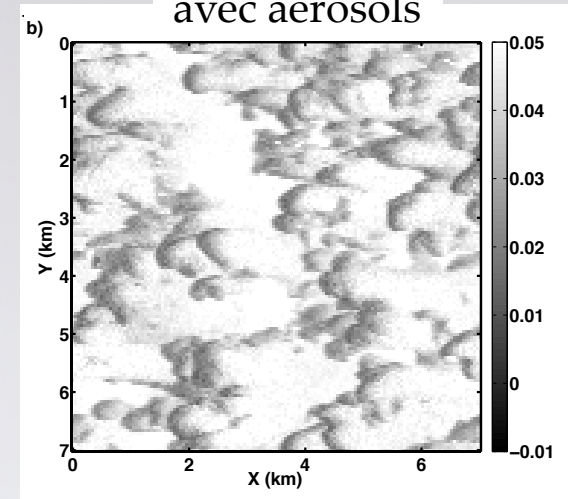
Présence d'aérosols au dessus des nuages = diminution luminance dans l'arc principal ( $\Theta \approx 140^\circ$ ) et augmentation en diffusion avant ( $\Theta < 120^\circ$ ) = effets 3D



sans aérosol



avec aérosols



Algorithme aérosols au dessus des nuages (Waquet et al., 2013)

	AOT670	AOT865	Angstrom
1D	0.28	0.16	2.20
3D	0.46	0.28	1.95

# Simulation des effets des hétérogénéités nuageuses sur les paramètres nuages inversés

I. Méthodologie

II. Radiomètre passif : ex POLDER/PARASOL (multi-angulaire + polarisation)

Effets sur épaisseur optique et albédo des nuages et l'albedo

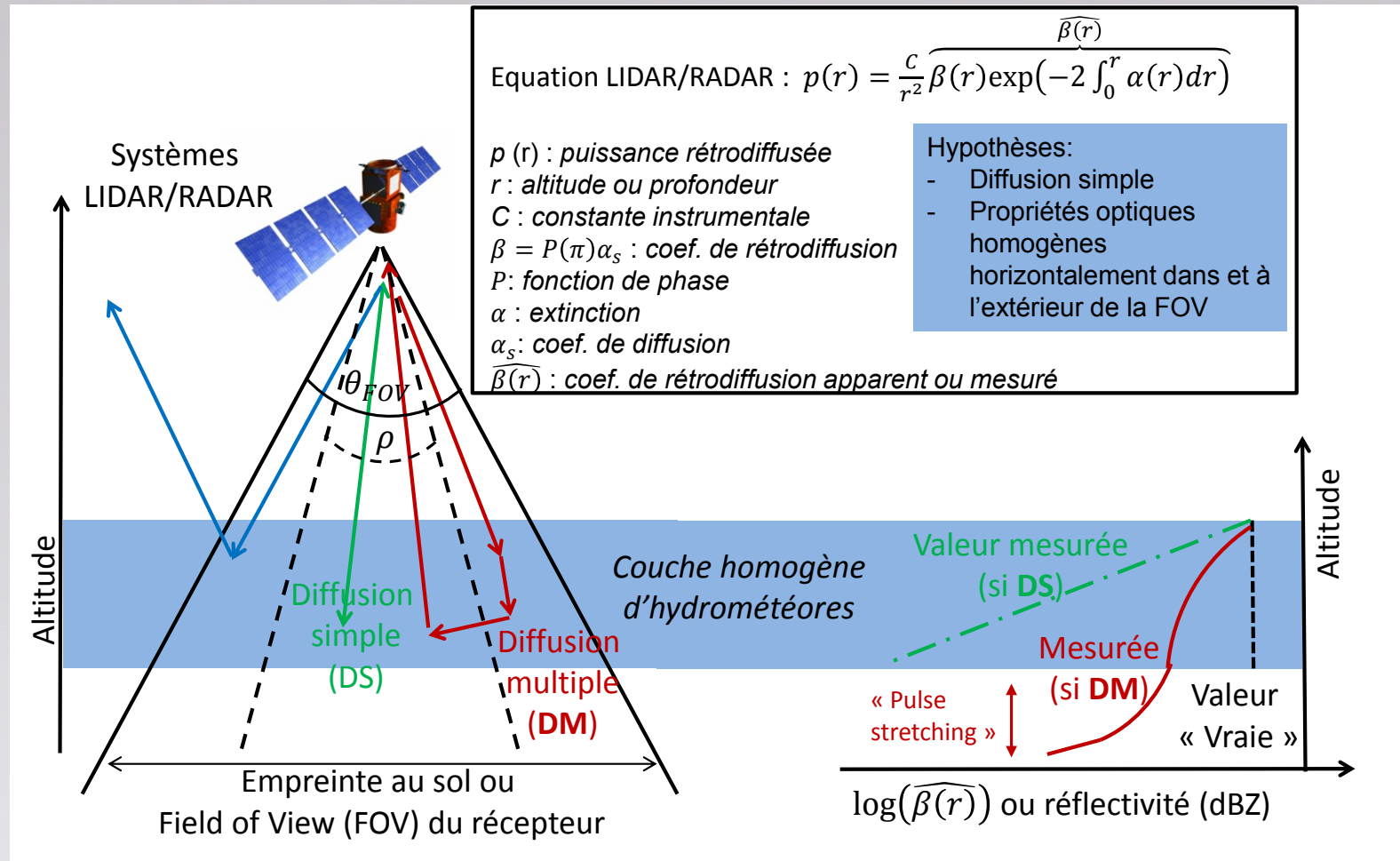
Effets sur la restitution des aérosols au dessus des nuages

III. Radiomètre actif : ex CALIOP/CALIPSO

**Effets**



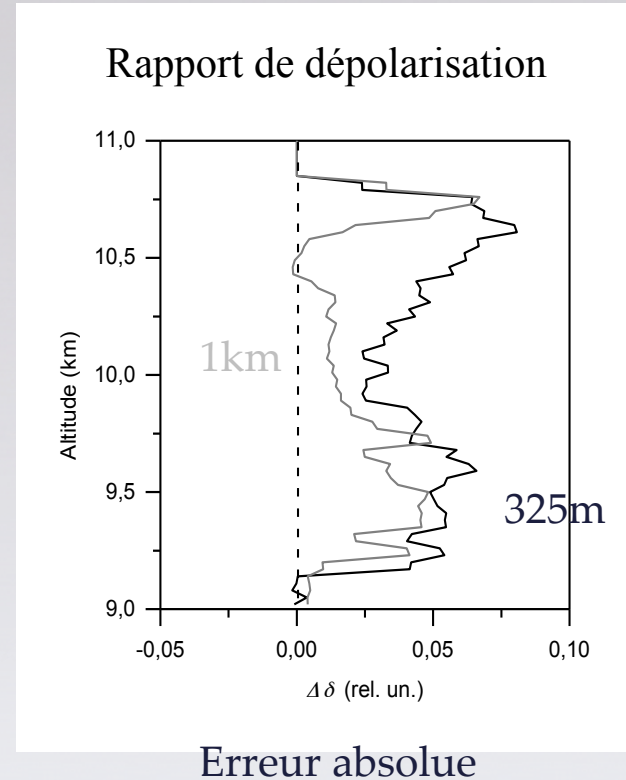
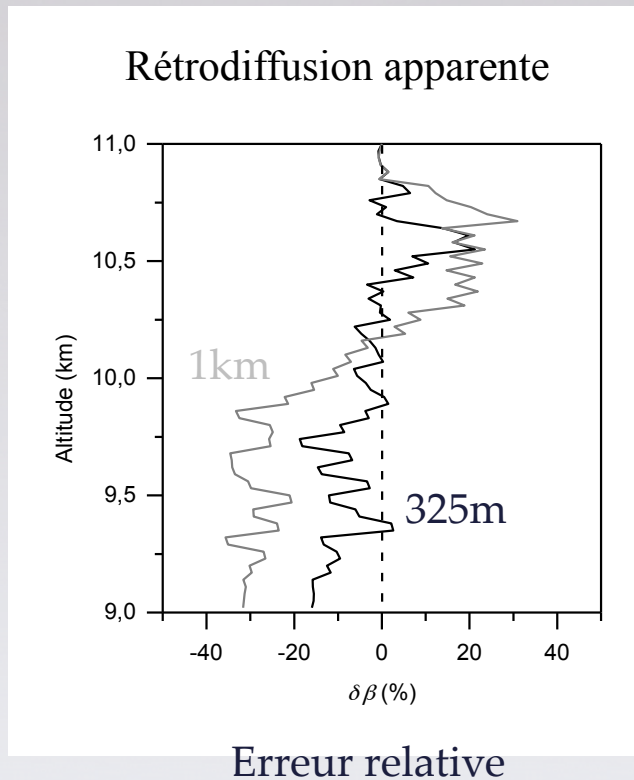
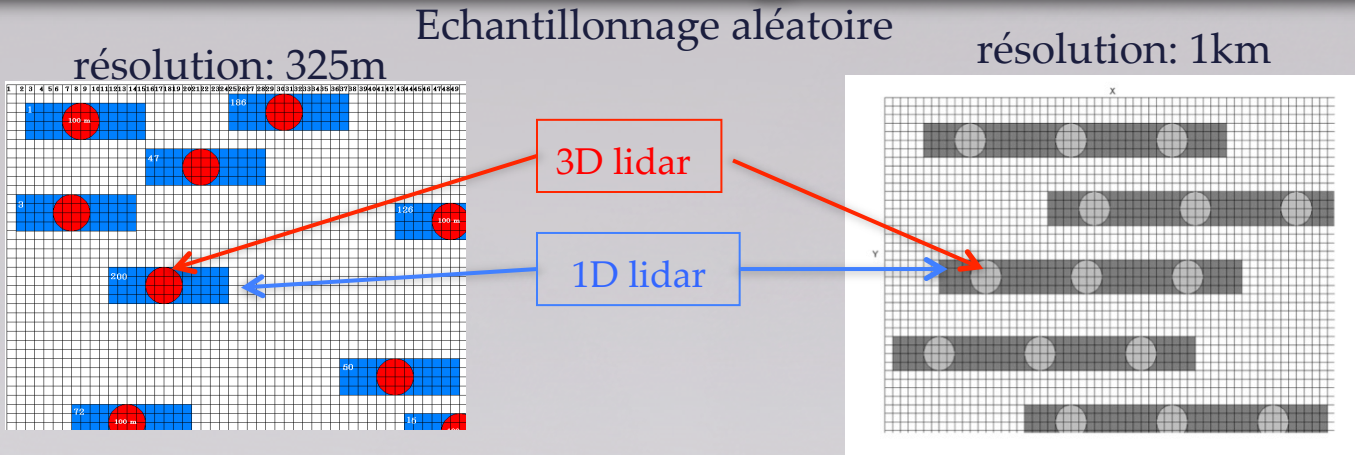
# Simulation - Effets hétérogénéités sur Lidar (1/2)



Problématique de l'interprétation de la puissance rétrodiffusée et mesurée par système lidar ou radar en régime de diffusion multiple

Travaux effectués au LaMP: Alkasem A., Mioche G., Szczap F., Shcherbakov V.

# Simulation - Effets hétérogénéités sur Lidar (2/2)



# Synthèse des effets des hétérogénéités

Paramètre restitué ou mesuré	MODIS	POLDER	IIR	CALIOP
Epaisseur optique	± 20% (Varnai and Marshak, 2001) + 40%/Nadir (Varnai and Marshak, 2007) - 10 % (Kato and Marshak, 2009) - 5% (Zinner and Mayer, 2006) ± 20 % (Fauchez et al., 2016)	-40% à -20 % (Cornet et al., 2013) -70% à +43 % (Cornet et al., en prep.)	-20% (Fauchez et al., 2015)	-10% à -20 % (Alkasem et al., soumis, JQSRT)
Rayon effectif	+ 60% (Marshak et al., 2006) + 5 % (Zinner and Mayer, 2006) + 0% à 50% (Fauchez et al., 2016)	0% (Cornet et al., 2013; en prep.)	+ 50 % (Fauchez et al., 2015)	
Rapport de dépolarisation				- 30%

*Biais (%) dus aux hétérogénéités des nuages sur leurs paramètres restitués (Application A-train)*

# Vers une prise en compte des hétérogénéités 3D nuageuses ?

Effets des hétérogénéités peuvent être importants pour certains types de nuages

⇒ Nécessité de développer des méthodes pour prendre en compte (corriger) ces effets, **selon échelle d'observation et type de mesures:**

Mesures satellites : échelle  $\approx$  km (biais parallèle + effets surbrillance et d'ombrage)

mesures continues donc nécessite méthodes rapides

→ correction, paramétrisation des effets (info sous-pixels, multi-angulaire)

Mesures aéroportées: échelle  $\approx$  10s m (non indépendance des colonnes + effets surbrillance et ombrage)

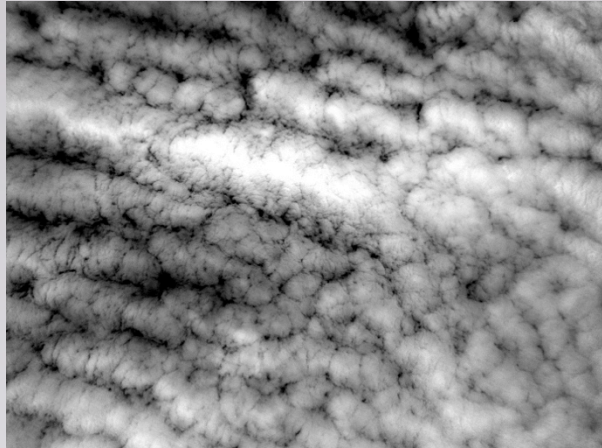
Mesures ponctuelles donc moins contraint par le temps

→ Possibilité de TR3D mais quelle méthode inverse ?

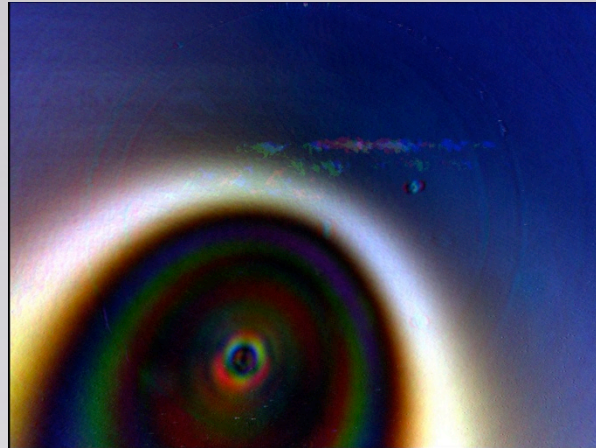
# Radiomètre aéroporté OSIRIS

Avantages: résolution spatiale 20m(visible) et 60m (nir)

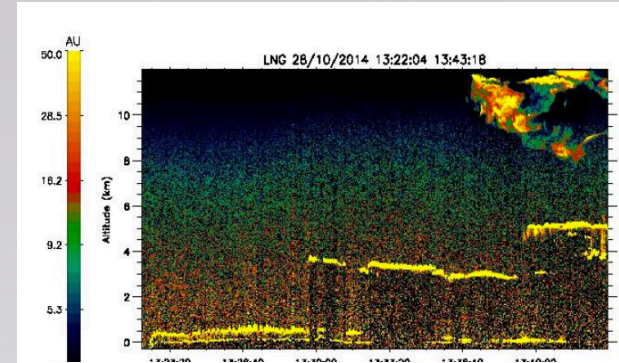
=> Étude de processus fins comme **interactions aérosols nuages**



Luminance totale à 865nm



Luminance polarisée RGB



Lidar LNG:

Variabilité du sommet des nuages

Difficulté: colonnes nuageuses ne sont pas indépendantes

⇒ Nécessité de développer une méthode d'inversion de l'ensemble du champ nuageux :

- Méthode type GRASP (Dubovik et al., 2011)
- Méthode de l'adjoint (Martin et al., 2014)
- Méthode tomographique (Levis et al., 2015)

# Inversion de champs nuageux (OSIRIS)

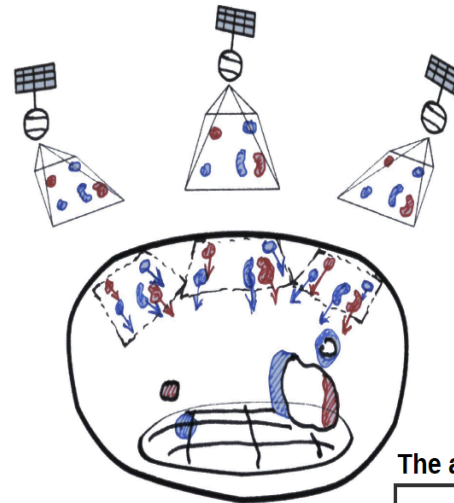
Martin W, Cairns B., Bal G., 2014:

*Adjoint methods for adjusting three-dimensional atmosphere and surface properties to fit multi-angle/multi-pixel polarimetric measurements*

Plusieurs étapes :

1. Inversion 1D → COT1D
2. Simulation TR 3D avec COT1D
3. Calculs des différences:  
 $\Delta R = R_{3D} - R_{1D}$
4. Simulation TR3D avec  $\Delta R$  comme source  
→ adjoint (schéma)
5. Ajustement des paramètres nuageux
6. Retour à l'étape 3 si nécessaire

## Adjoint method: solve the adjoint 3D VRTE



The measurement residual is on the wrong domain

- 2D images in space

The adjoint solution is on the right domain

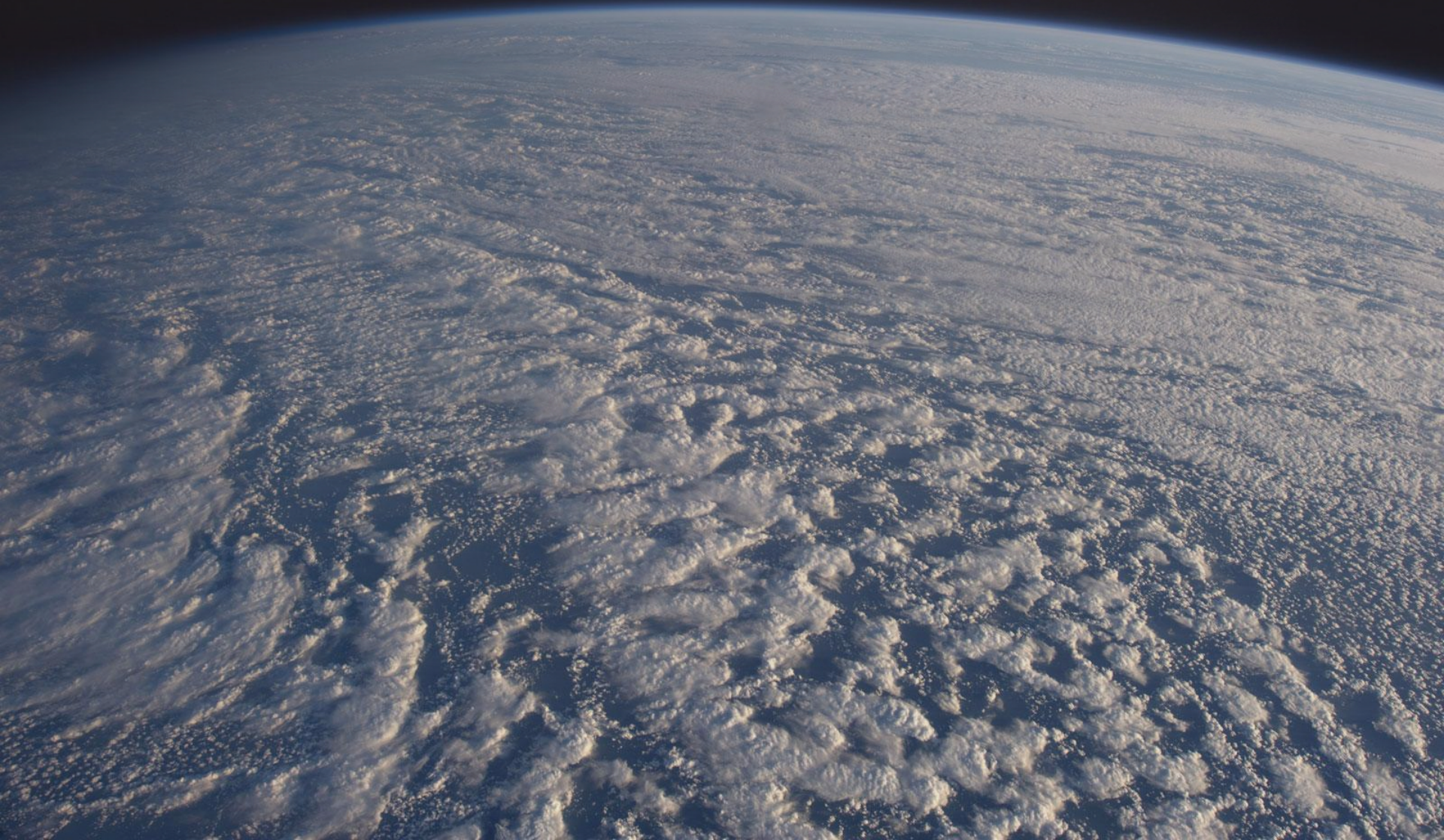
- 3D atmosphere and surface

The adjoint solver calls the forward solver

$$U_a^* \begin{Bmatrix} p_{\odot} \\ q_{\odot} \end{Bmatrix} = \alpha Q U_a \begin{Bmatrix} \alpha Q p_{\odot} \\ \alpha Q q_{\odot} \end{Bmatrix}$$

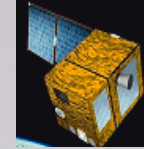
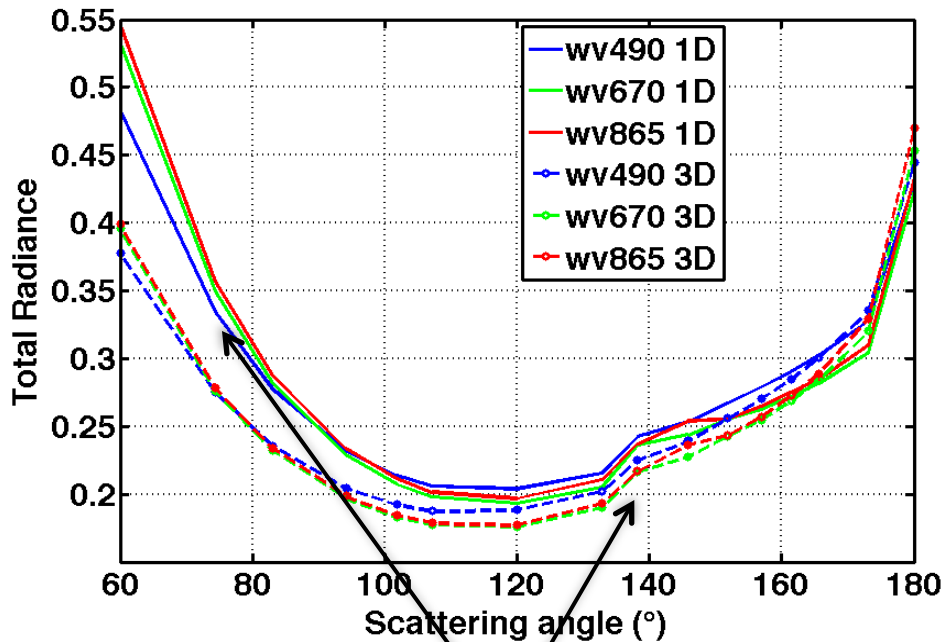
Crédit: William Martin

*Merci pour votre attention*

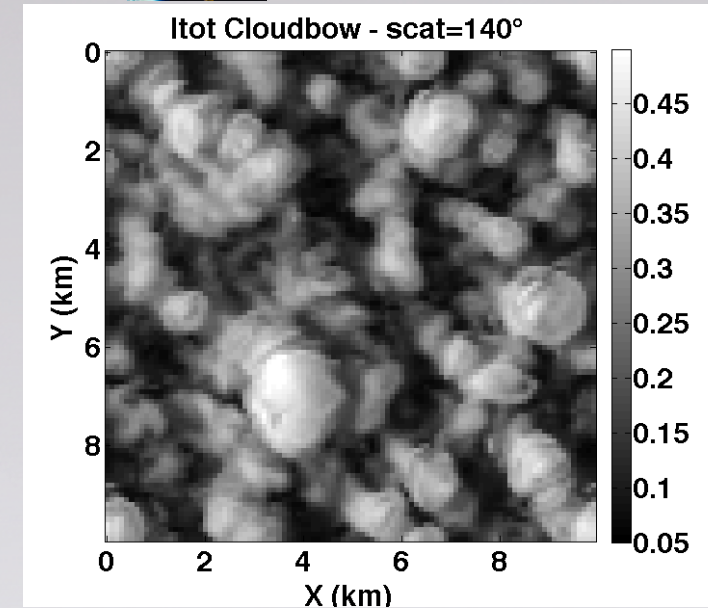


# Effets sur les luminances totales

1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion.  $\theta_s=60^\circ$



Vue dans l'arc en ciel  
 $\Theta=140^\circ$

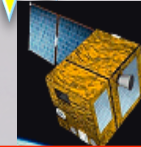
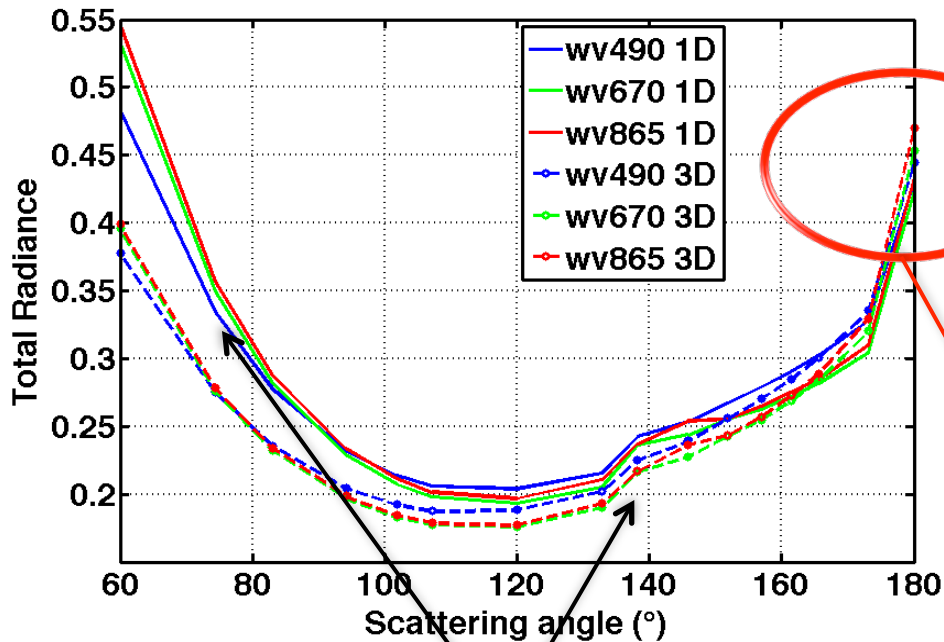


Généralement  $R_{3D} < R_{1D}$ ,  
Biais plan-parallèle dû à l'hétérogénéité sous pixel

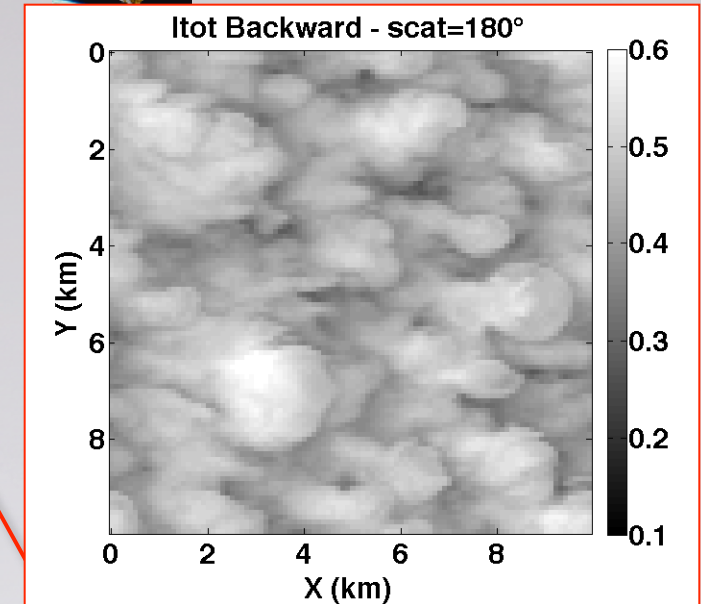


# Effets sur les luminances totales

1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion.  $\theta_s=60^\circ$



Rétrodiffusion  
 $\Theta=180^\circ$



Généralement  $R_{3D} < R_{1D}$ ,  
Biais plan-parallèle dû à l'hétérogénéité sous pixel

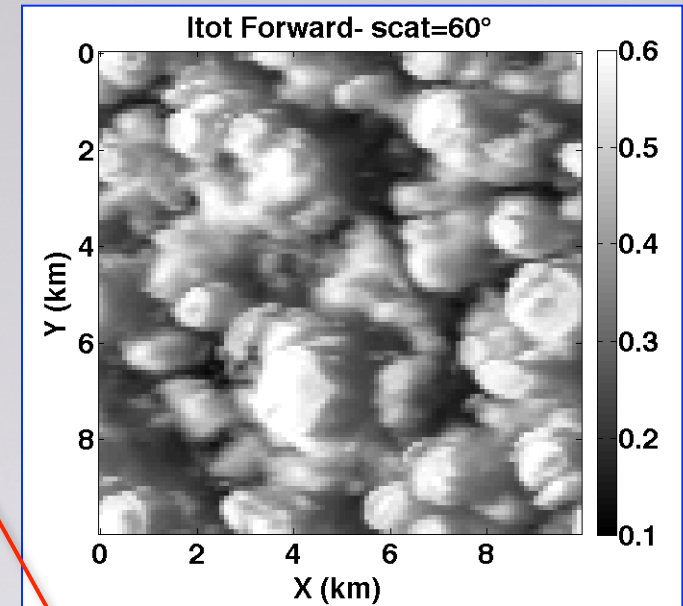
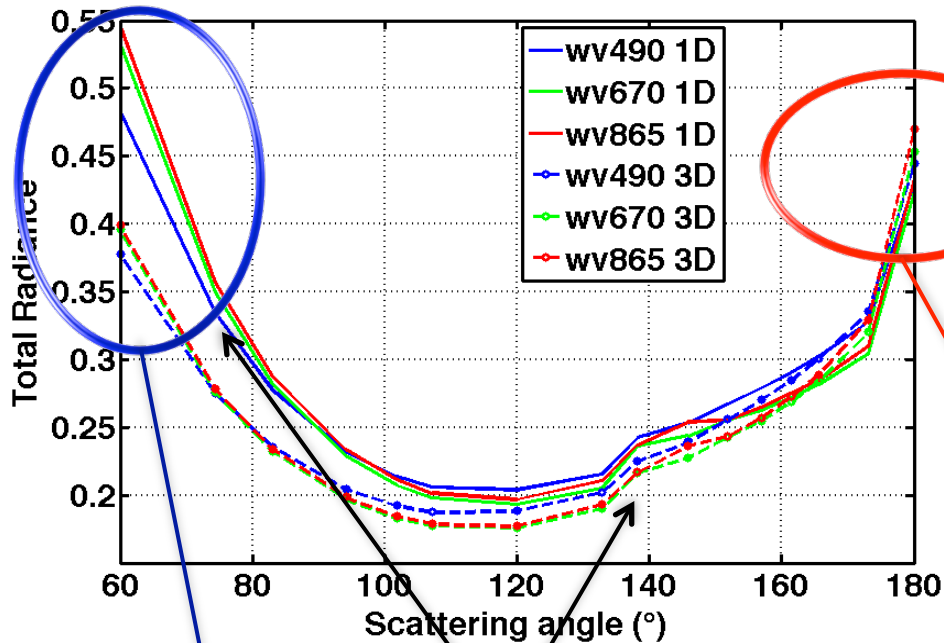
$R_{3D} \geq R_{1D}$ , les cotés et/ou bosses nuageuses sont éclairés = surbrillance

# Effets sur les luminances totales



1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion.  $\theta_s=60^\circ$

Vue avant  
 $\Theta=60^\circ$

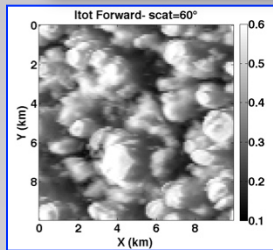


Généralement  $R_{3D} < R_{1D}$ ,  
Biais plan-parallèle dû à l'hétérogénéité sous pixel

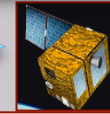
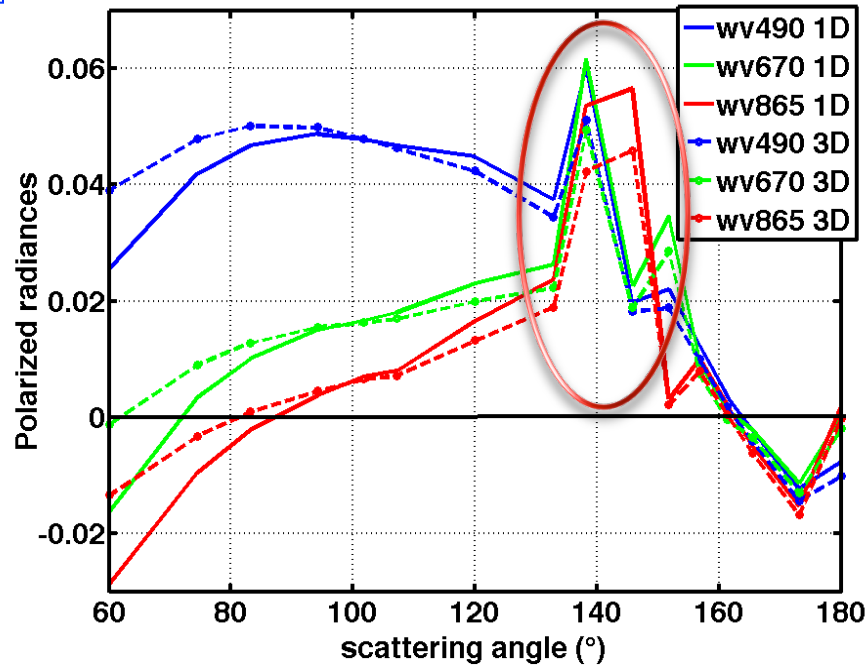
$R_{3D} \ll R_{1D}$ , effets  
d'ombrage des cotés

$R_{3D} \geq R_{1D}$ , les cotés et/ou bosses nuageuses sont  
éclairés = surbrillance

# Effets sur les luminances polarisées (1/3)

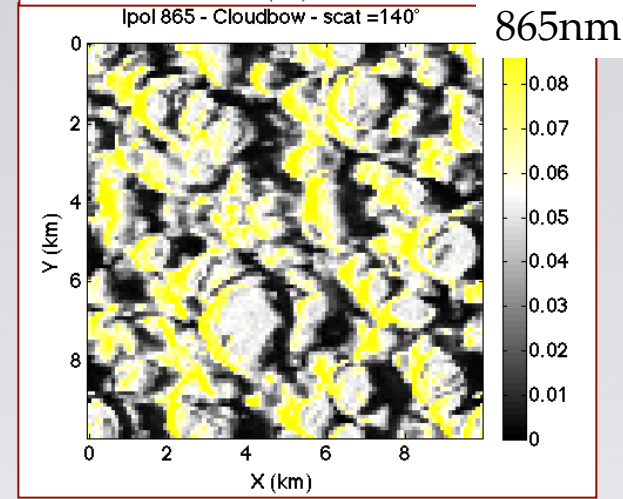
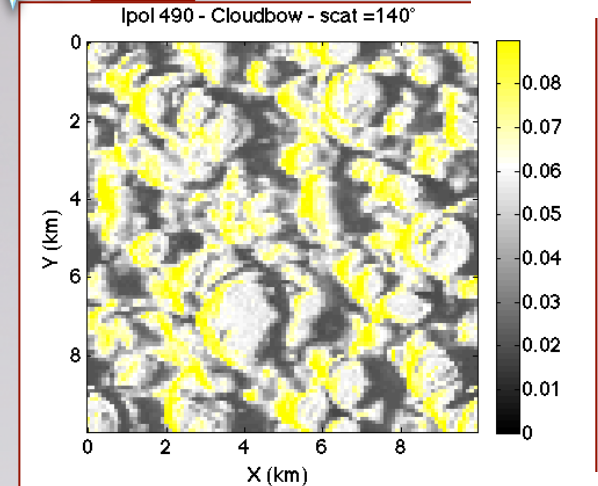


1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion.  $\theta_s=60^\circ$



Arc-en-ciel

490nm

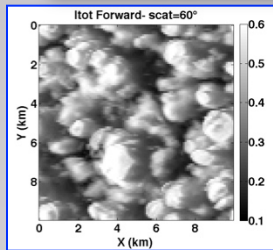


- At 100m, effets d'ombrages et de surbrillances

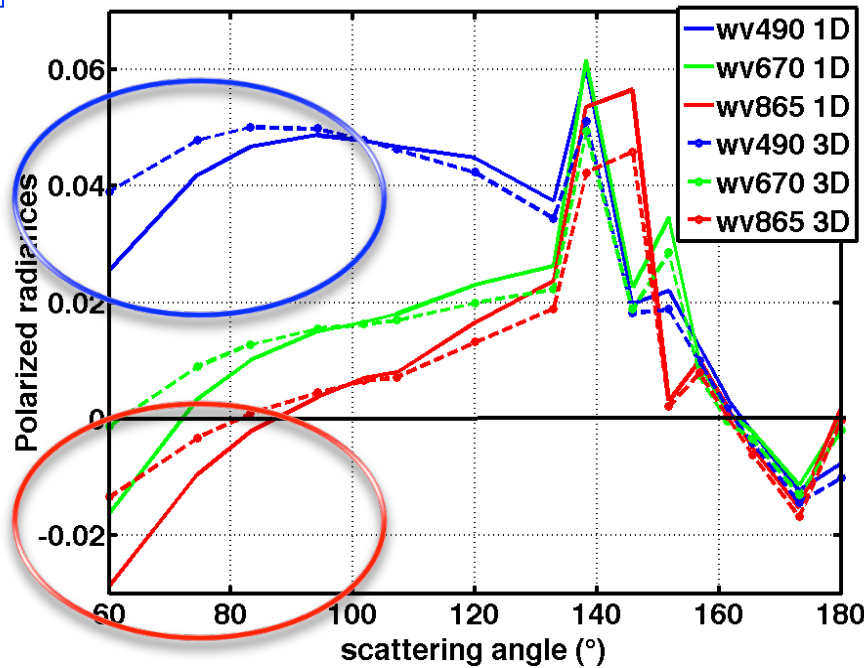
Ipolar3D > Ipolar1D (max)=0.0537 => **modèle 1D ne permet pas d'obtenir les valeurs en jaune**

- En moyenne (10km), biais plan-parallèle et les effets d'ombre diminuent l'effet de polarisation

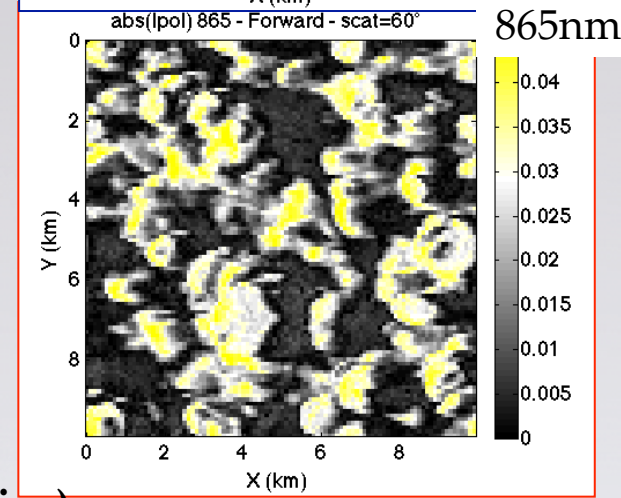
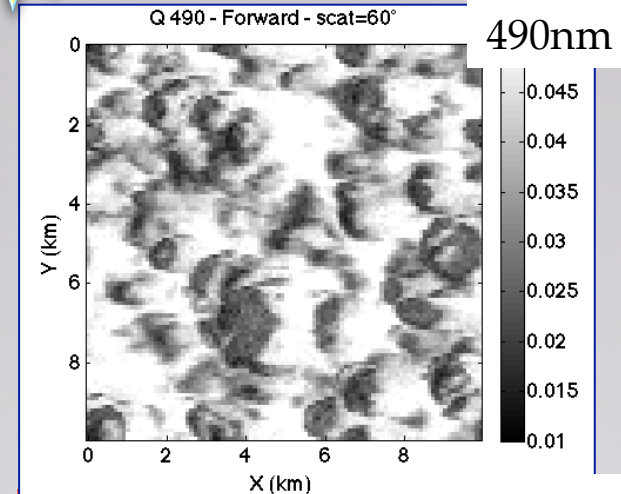
# Effets sur les luminances polarisées (2/3)



1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion.  $\theta_s=60^\circ$



Vue avant



A 865nm, pas de polarisation moléculaire

⇒ Zones d'ombre diminuent la polarisation du nuage (negative)

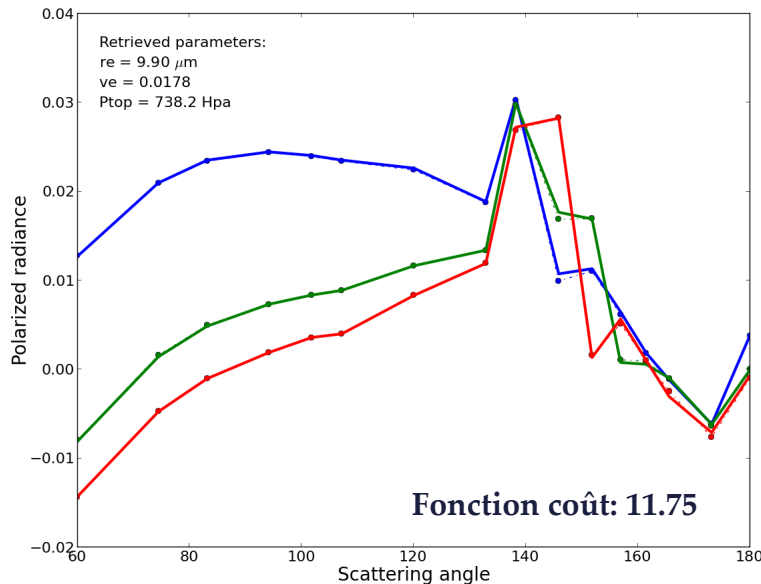
⇒ A 100m, valeurs supérieures à celles obtenues avec l'hypothèse 1D

# Effets sur les luminances polarisées (3/3)

Inversion du **rayon effectif** ( $R_{eff}$ ) et de **variance effective** ( $V_{eff}$ ) d'une distribution lognormal

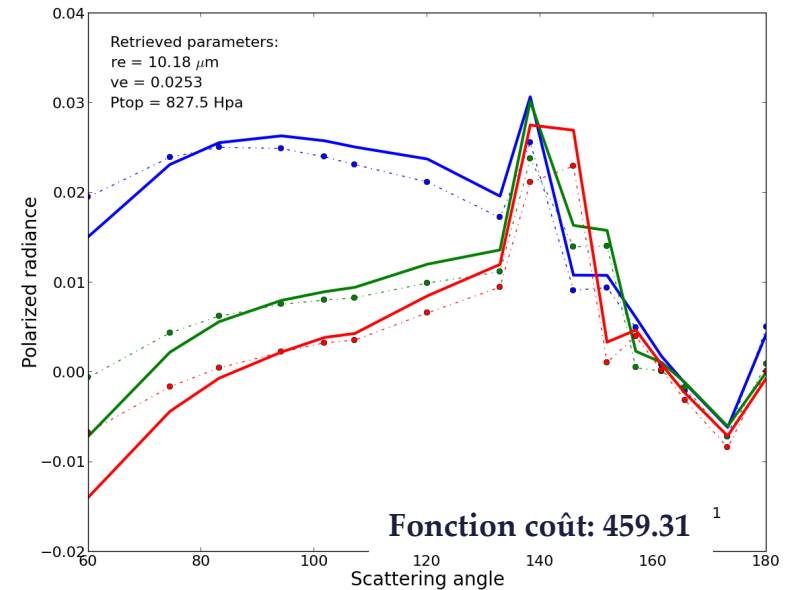
Utilise les **méthodes d'estimation optimale** - Bréon et Goloub, 1998; C-Labonnote et al. IRS 2012

Nuage homogène (test)



Out:  $R_e=9.90\mu\text{m}$ ,  $V_{eff}= 0.0178$ ; CTP= 738hPa

Nuage hétérogène, sommet bosselé



Out:  $R_e=10.18\mu\text{m}$ ,  $V_{eff}= 0.0253$ ; CTP= 827hPa

- Les erreurs sur  $R_{eff}$  et  $V_{eff}$  sont très faibles car position de l'arc non modifiée par effets 3D
- Différences importantes pour la pression du sommet (Pression Rayleigh):  $\Delta H=910\text{m}$

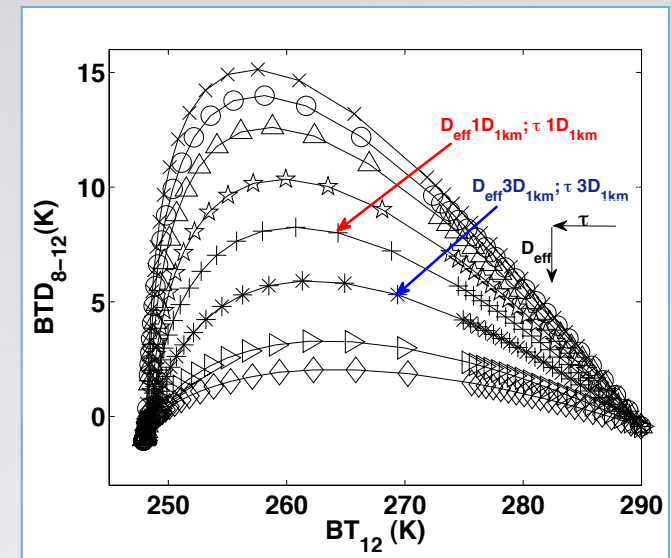
# Effets des hétérogénéités dans l'IR (1/5)

Etude dans le cadre de IIR/CALIPSO, applicable à MODIS:

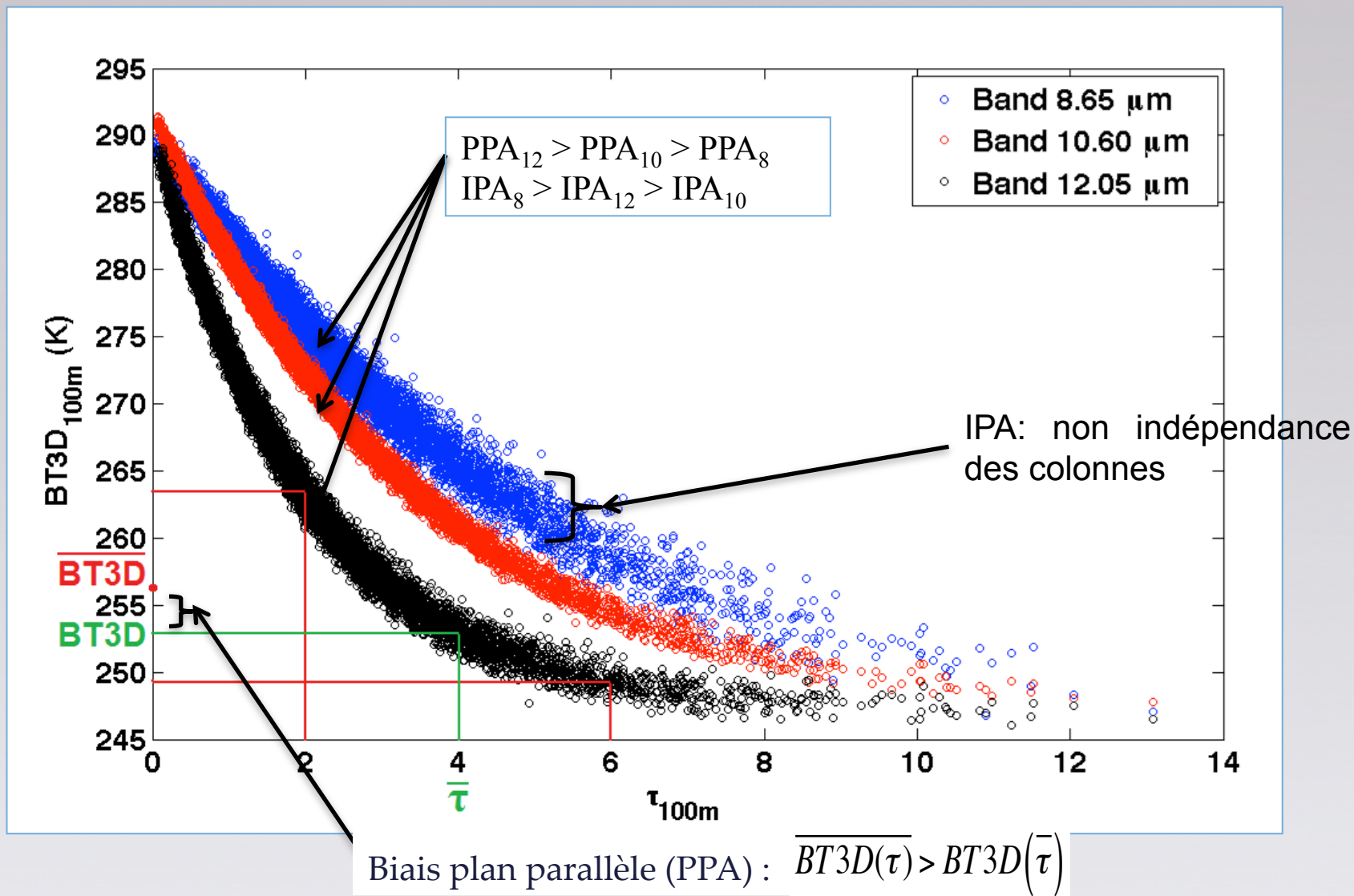
- Mon-angulaire : visée Nadir
- 3 Bandes spectrales (8.65 $\mu\text{m}$ , 10.60 $\mu\text{m}$  et 12.05 $\mu\text{m}$ )
- Résolution : 1kmx1km

Inversion des paramètres nuageux à partir de  $\Delta B_T = f(B_T)$

- Emissivités effectives à 8.65 $\mu\text{m}$ , 10.60 $\mu\text{m}$  et 12.05 $\mu\text{m}$
- **Épaisseurs optiques effectives** à 8.65 $\mu\text{m}$ , 10.60 $\mu\text{m}$  et 12.05 $\mu\text{m}$
- Indices microphysiques (non étudiés)
- **Diamètres effectifs**

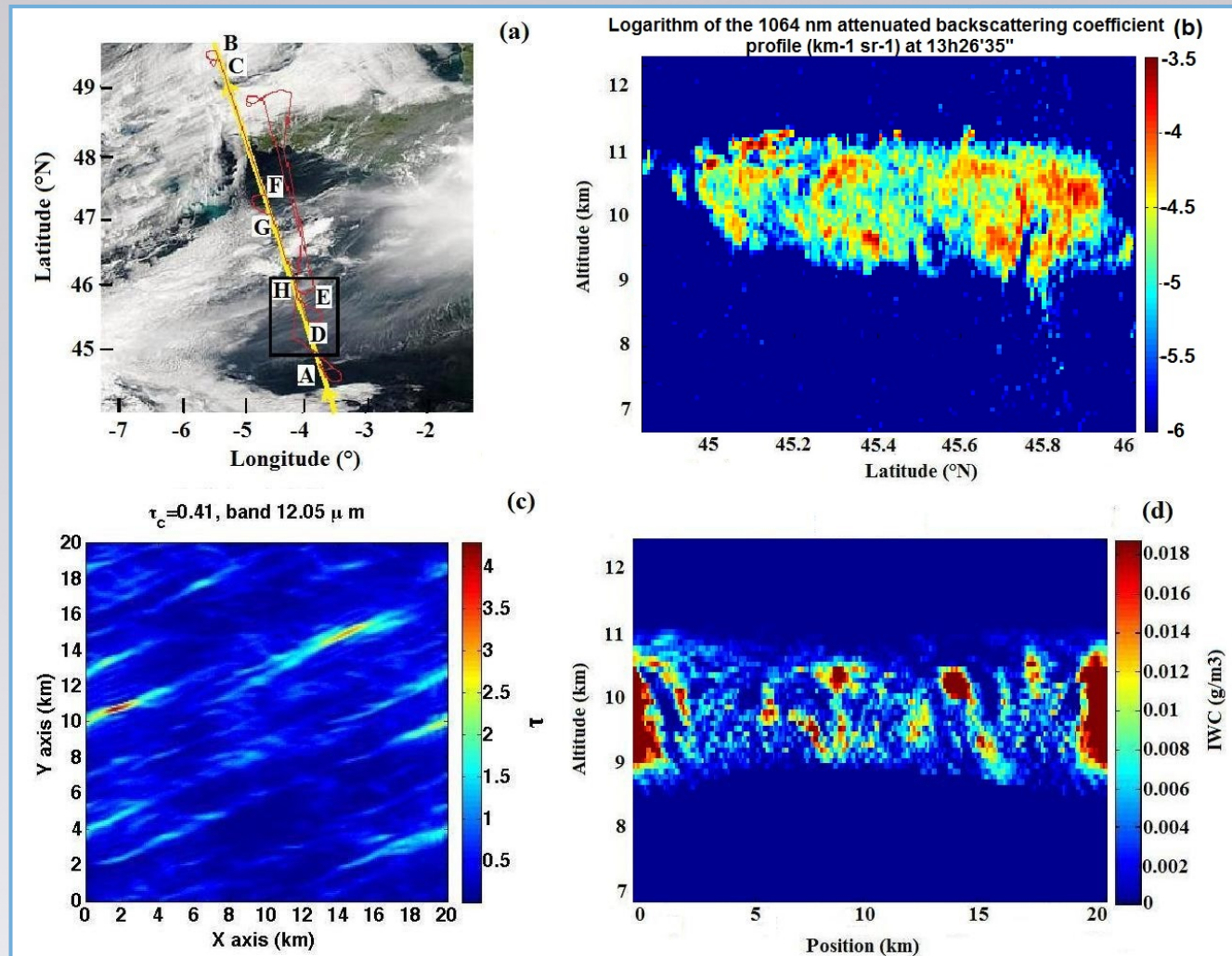


# Effets des hétérogénéités dans l'IR (2/5)



# Effets des hétérogénéités dans l'IR (3/5)

Cirrus généré avec 3DCLOUD à partir de mesures de la campagne aéroportée CIRCLE 2 (25 may, 2007): Mioche *et al.*, 2010; Fauchez *et al.*, 2014

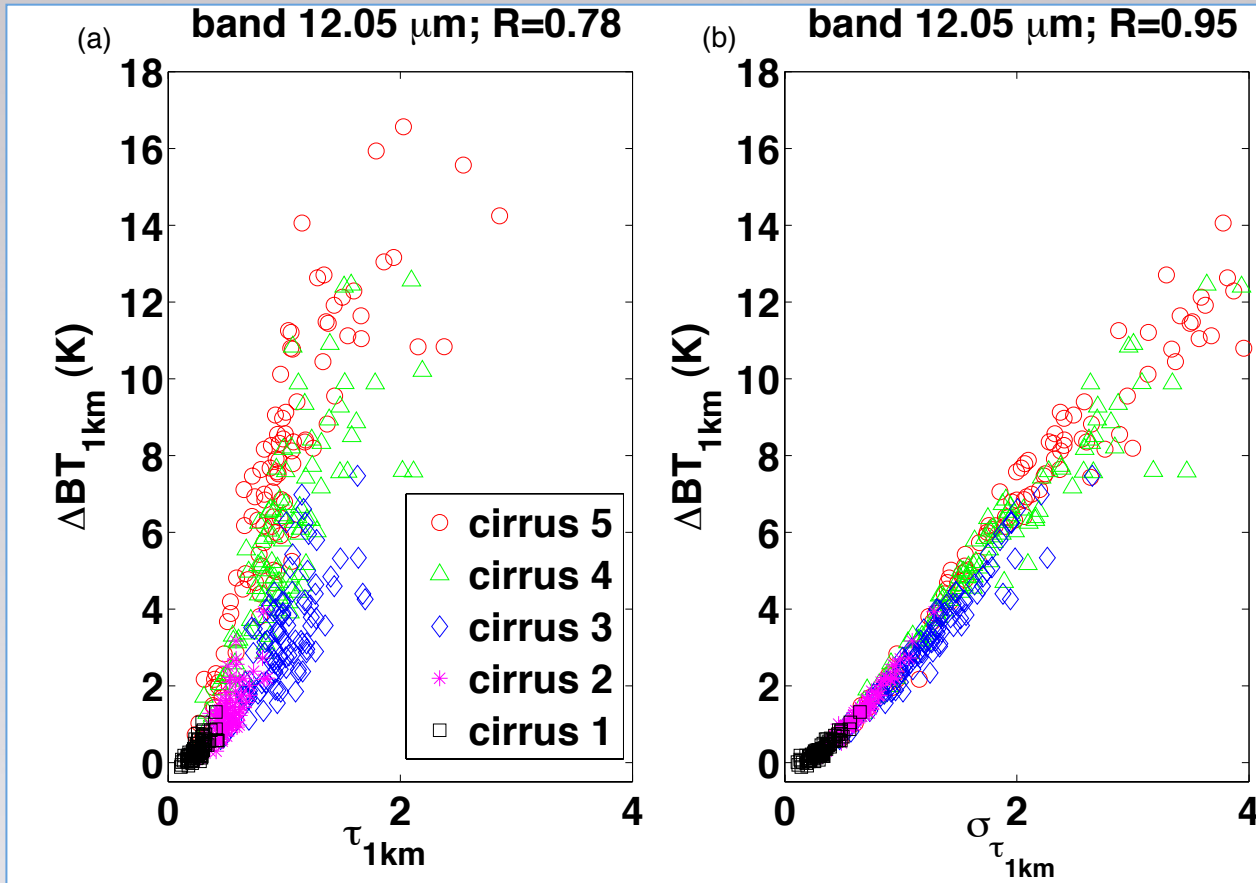




# Effets des hétérogénéités dans l'IR (4/5)

Propriétés microphysiques homogènes :  $D_{\text{eff}} = 9.95 \mu\text{m}$

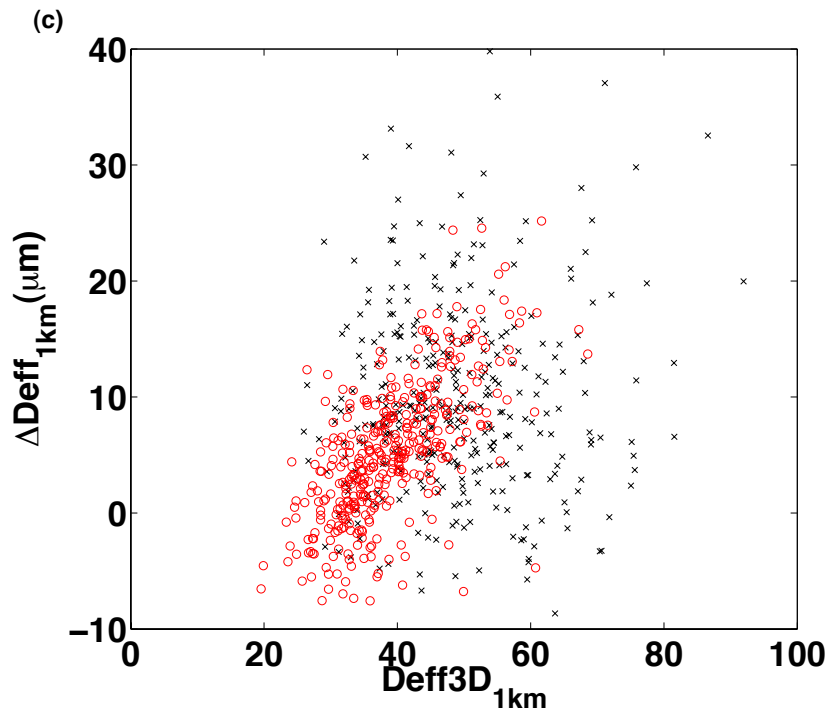
$$\Delta BT_{1\text{km}} = BT_{3D_{1\text{km}}} - BT_{1D_{1\text{km}}}$$



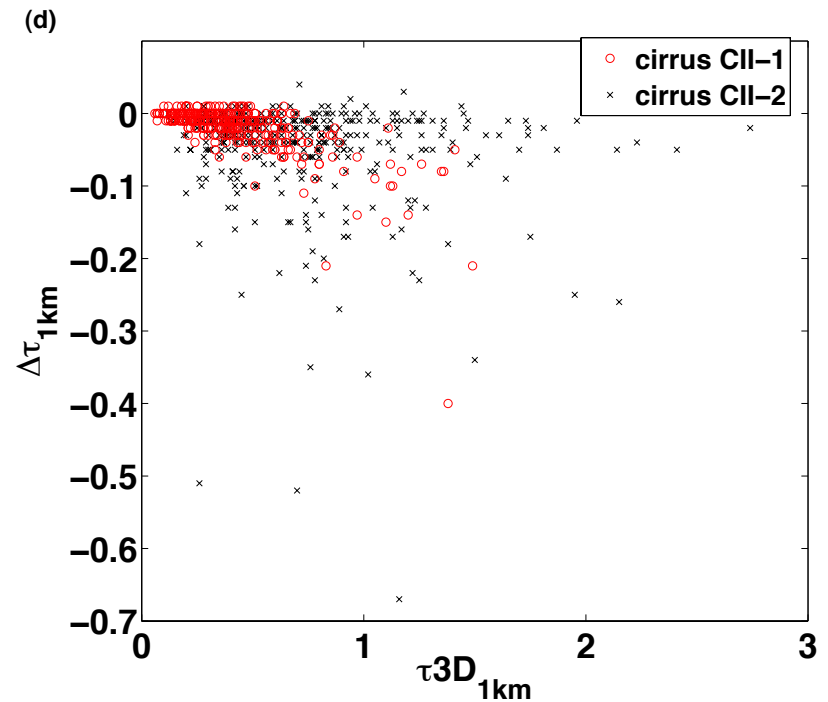
- $\Delta BT_{1\text{km}}$  très corrélé avec  $\sigma_{\tau_{1\text{km}}}$ .
- La distribution sous-pixel de l'hétérogénéité intervient peu

# Effets des hétérogénéités dans l'IR (5/5)

Erreurs sur diamètres effectifs

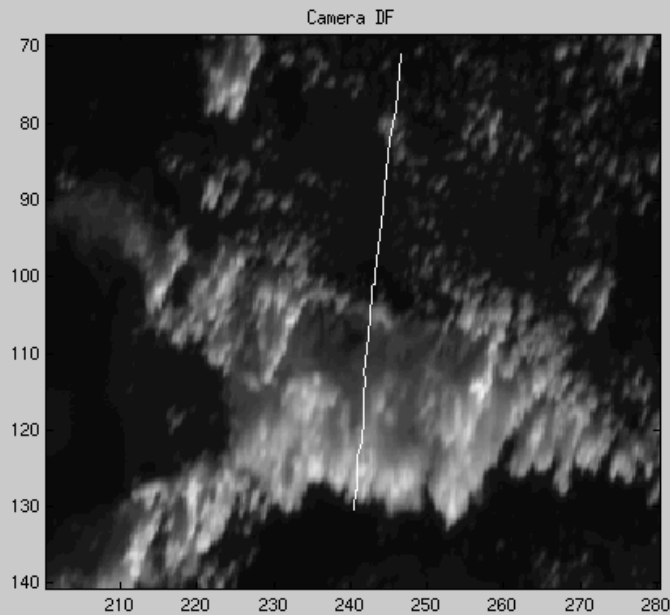


Erreurs sur épaisseurs optiques

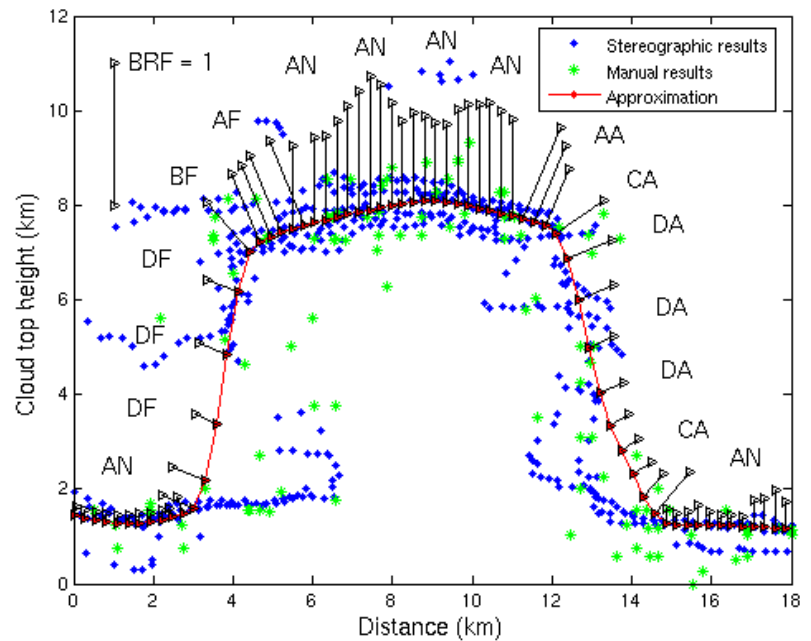


# Méthode itérative: nuage isolé (1/2)

Nuage convectif isolé dans le pacifique  
vu par MISR

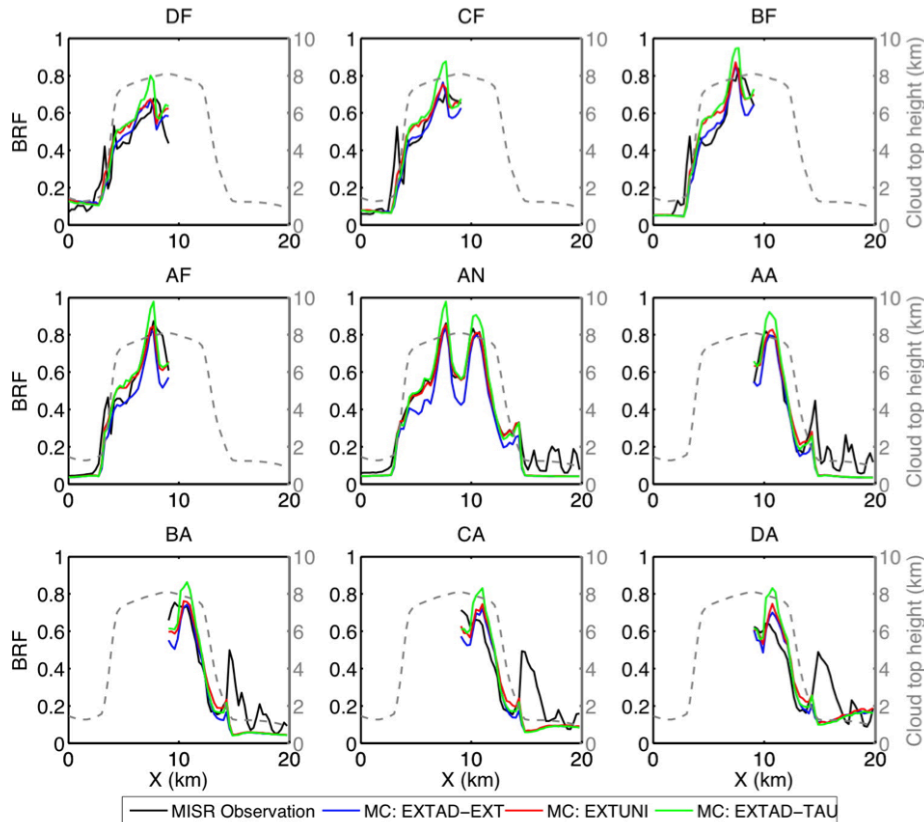


Reconstruction de l'enveloppe du nuage  
par stéréographie

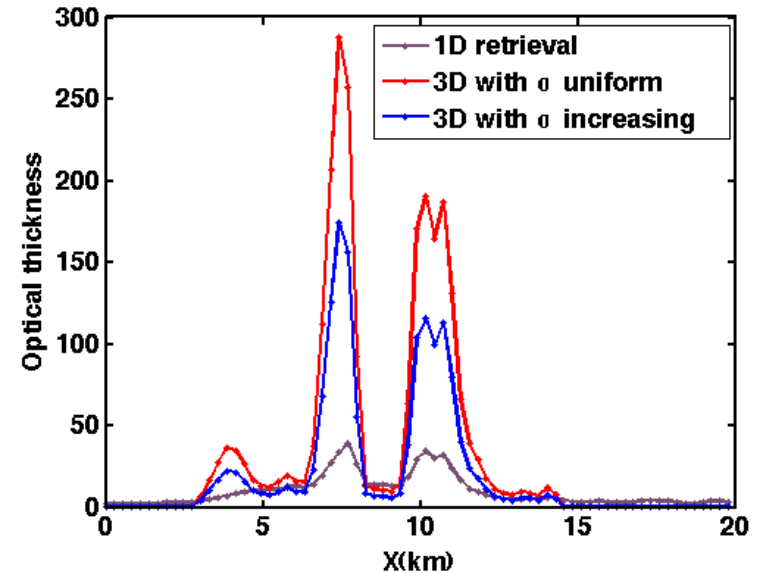


# Méthode itérative: nuage isolé (2/2)

Luminances issues des 9 caméras MISR



Ajustement itératif du coefficient d'extinction => Épaisseur optique



En moyenne, COT 3D=[35-58] ;  
COT 1D=14

Localement,  
1D sous-estimation importante

Méthode itérative:

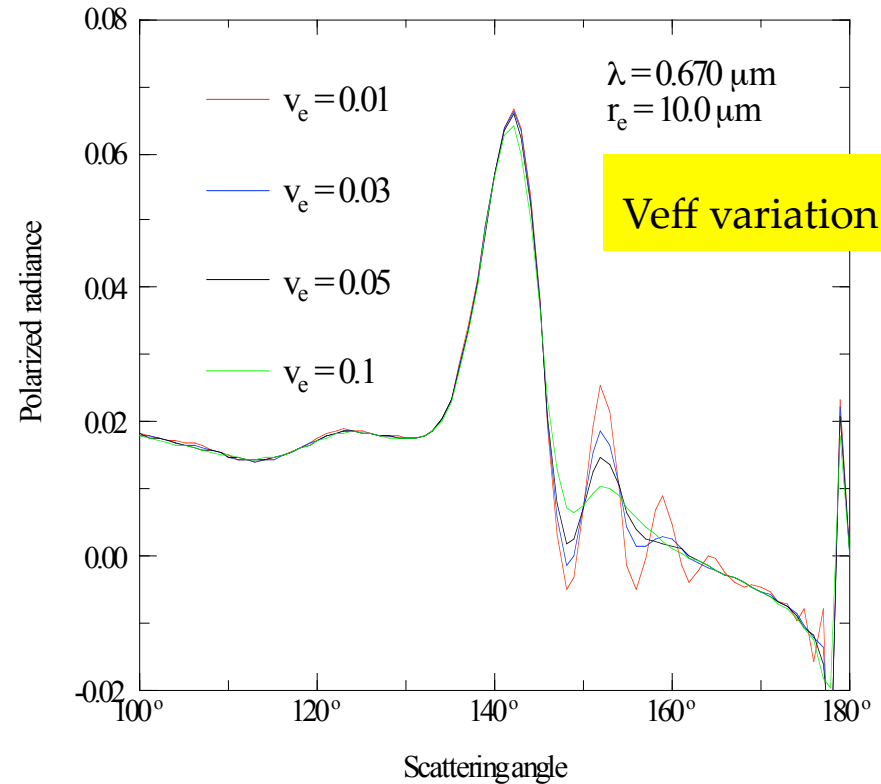
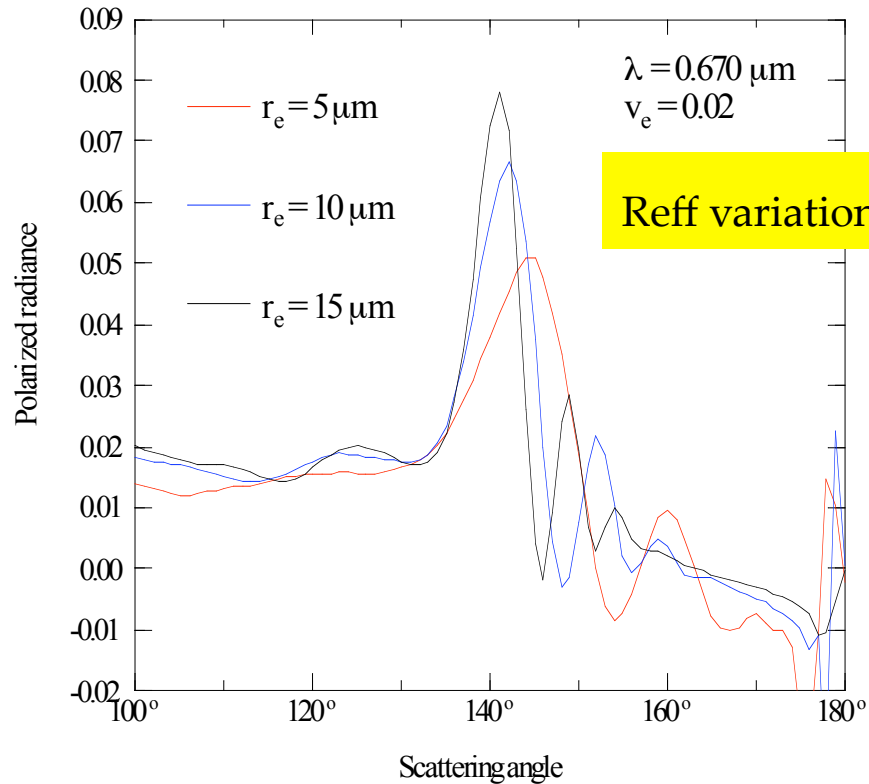
Avantage : modèle de nuage ajustable

Inconvénient: Très long en temps de calcul

*Cornet C. et Davies R., 2008, JGR*

# Use Rpol to retrieve size distribution ( $R_{eff}$ , $V_{eff}$ )

Assume log-normal distribution with effective radius ( $R_{eff}$ ) and effective variance ( $V_{eff}$ )  
Use an optimal estimation method (Rodgers, 2000)  
(Bréon et Goloub, 1998; C-Labonnote et al. IRS 2012)



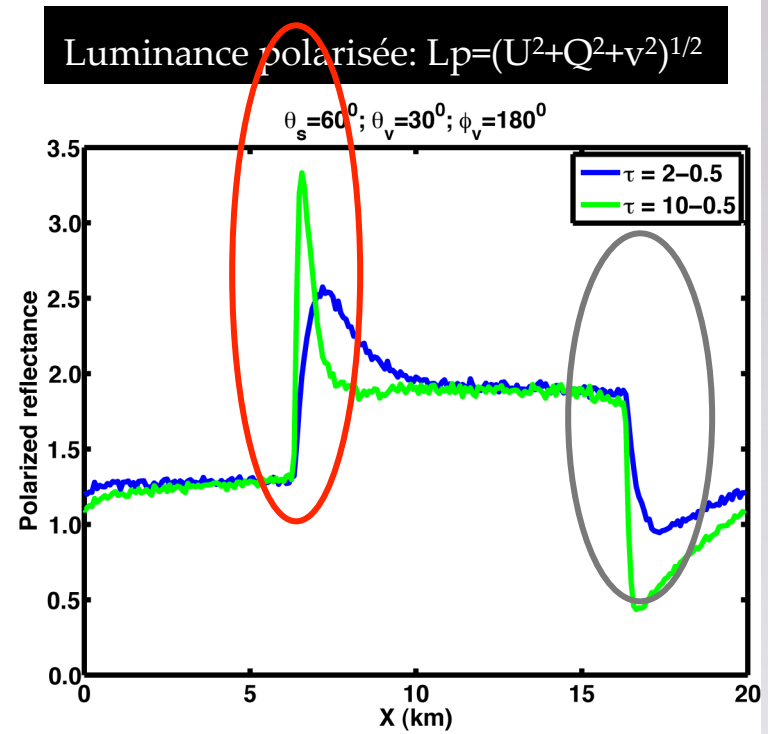
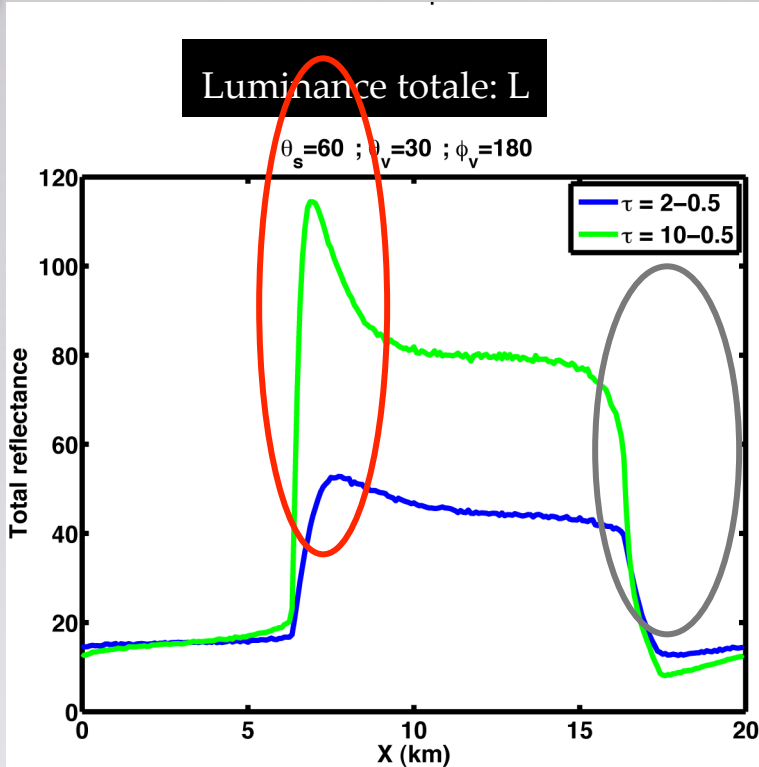
**Polarized radiances** for different effective radius  
=> Use angular position and size of the cloudbow to retrieve  $R_{eff}$

**Polarized radiances** for different effective variance  
=> Use angular position and size of the secondary bows to retrieve  $V_{eff}$

# Solaire : surbrillance et ombrage



Luminances d'1 nuage « escalier » :  $\Theta_s = 60^\circ$



**Bords des nuages :**

effets de **surbrillance** et d'ombrage pour incidence solaire oblique

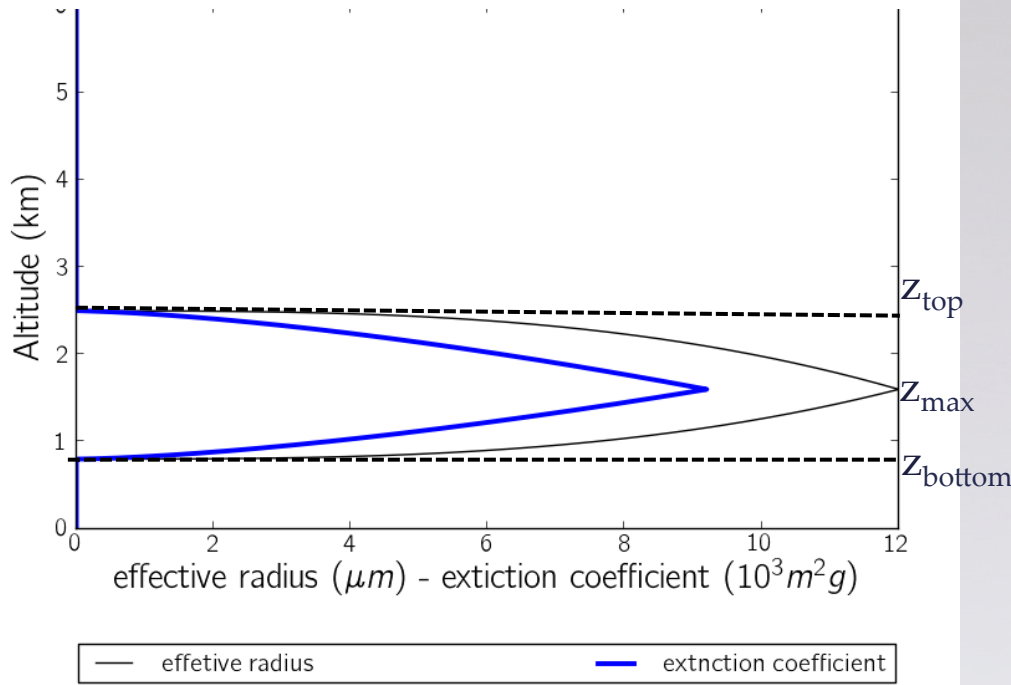
# Vers la restitution du profil vertical (3MI)

Modèle de nuage défini par 5 paramètres:

CGT, CTOP; COT; LWP et 
$$p = \frac{z_{top} - z_{max}}{z_{top} - z_{bottom}}$$

Profil type **stratocumulus** (Carbajal Henken, et al., 2014)

CGT=1.7km, CTOP=2.5km; COT=9.4; LWP=62.7g.m<sup>-2</sup>; p=0.52



Etude du contenu en information  
*Rodgers (2000)*

	CGT	CTOP	COT	LWP	p
Lvis totale	0.09	0.02	0.8	0.05	0
Lvis polarisée	0.64	0.2	0	0.04	0.03
Lswir totale	0.02	0.06	0.04	0.82	0.02
Lswir polarisée	0	0	0.05	0.05	0.9
Aband ratio	0.024	0.7	0.05	0.04	0.01
total	1	1	1	1	1