Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Étude des propriétés optiques des cristaux de glace composant les cirrus. Influence de la variabilité verticale de la distribution granulométrique des cristaux sur les propriétés radiatives de ces nuages.

Benjamin Marchant

Thèse dirigée par :
Gérard Brogniez (directeur de thèse)
Jérôme Riedi (co-directeur de thèse)

Laboratoire d'Optique Atmosphérique
Université Lille 1 : Sciences et Technologies

Le 11 décembre 2009

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

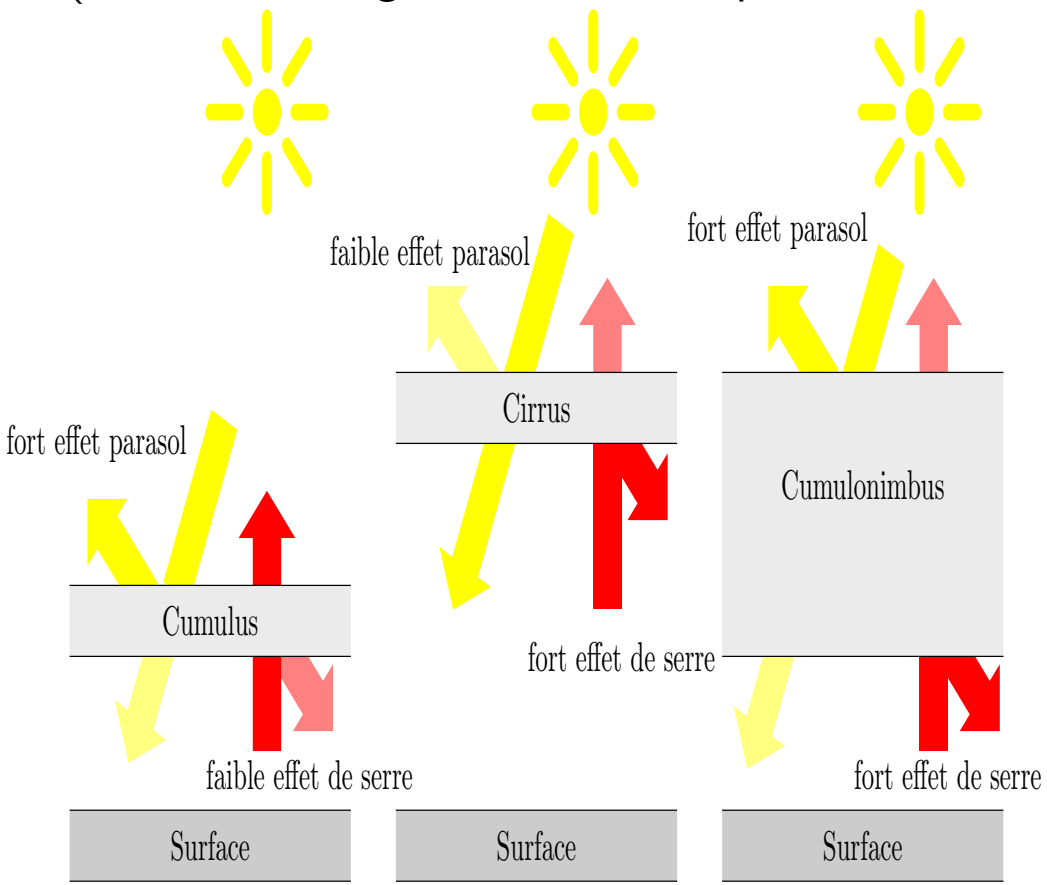
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Contexte Général : Pourquoi s'intéresser aux nuages ?

- Impact important sur le bilan radiatif de la Terre :
  (couverture nuageuse terrestre en permanence $\sim 60\%$).



Propriétés radiatives des nuages qui dépendent de leurs :

.

- propriétés macrophysiques (altitudes, épaisseurs géométriques, ...)

.

- propriétés microphysiques (dimensions des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace, contenu en eau, contenu en glace . . .)

- Rôles importants dans le cycle hydrologique

Plan

Contexte Général

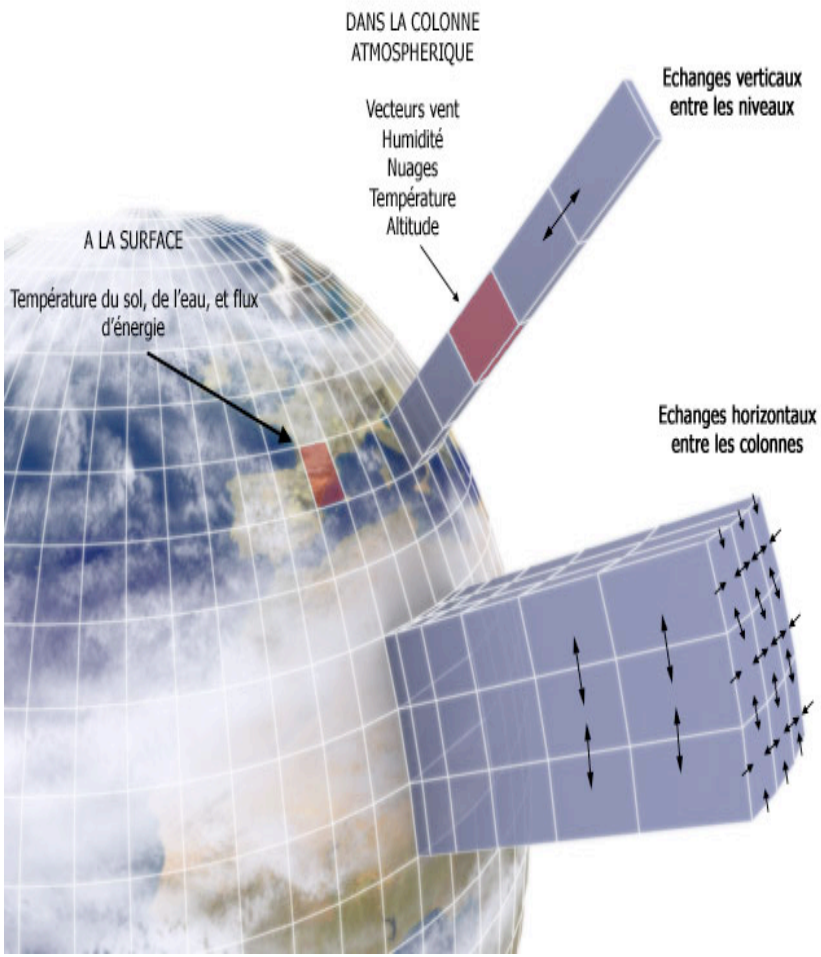
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Problème : Les nuages restent difficiles à intégrer dans les modèles climatiques.



Description toujours plus détaillée de la physique

Rétroactions des nuages : source principale d'incertitudes dans les modèles (*Rapport de l'IPCC 2007*).

.

Pourquoi ? :

- Décomposition de l'atmosphère en maille $\sim 100\,km$ de coté (pour un GCM)
- impossibilité d'intégrer toute la complexité d'un nuage

.

Comment y remédier ?

- Développer des paramétrisations
- $\Rightarrow$ collecter un nombre important de données sur les propriétés macrophysiques et microphysiques des nuages.

Plan

Contexte Général

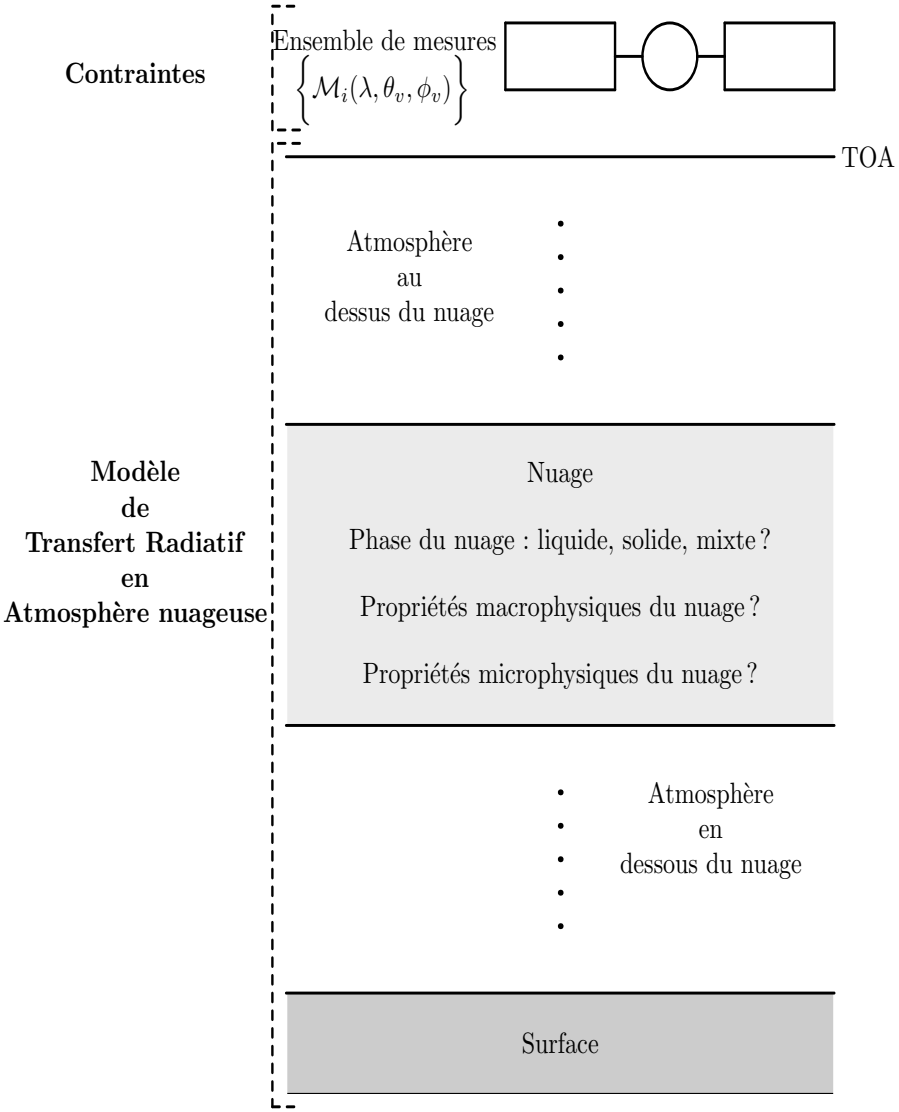
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comment collecter ces données ? :



A partir de campagnes de mesures *in situ* :

- avantage : information donnée directement.
- inconvénient : mesures locales.

A partir de mesures satelittaires :

- avantage : permet d'avoir une bonne restitution spatio-temporelle.
- inconvénient : l'information est parfois difficilement accessible (causes multiples : H_2O au dessus du nuage, albedo de surface, ...).

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

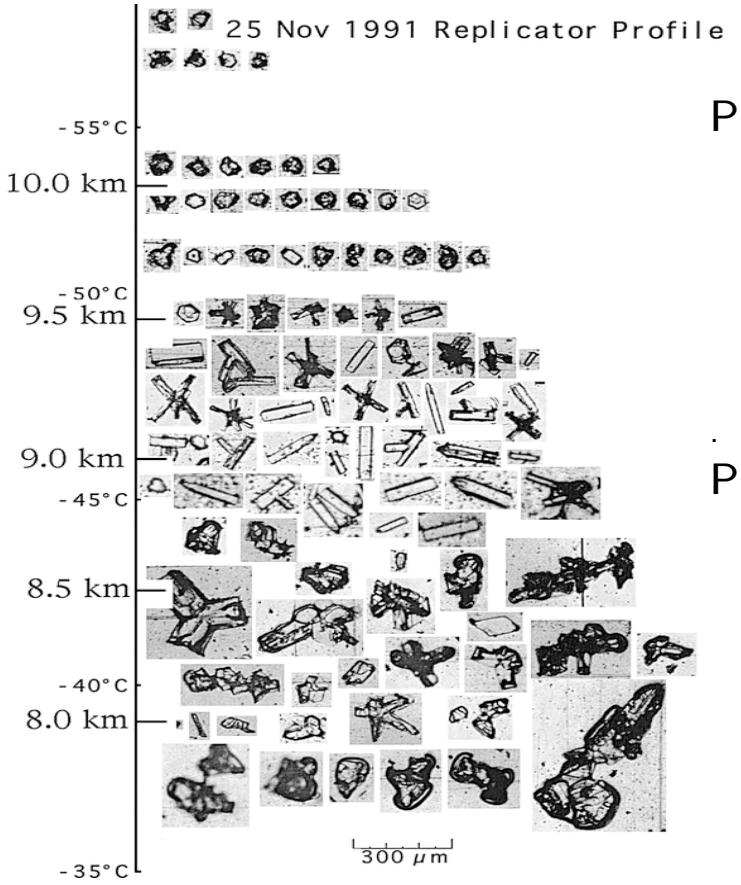
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Objectifs de la thèse :

Etude des propriétés optiques et radiatives des nuages de la haute troposphère :



Cristaux de glace observés dans un cirrus d'après : *Heymsfield and Iaquinta (2000).*

Problématique 1 :

- Calculer les propriétés optiques des cristaux de glace.
- ⇒ Implémentation de différentes méthodes.

Problématique 2 :

- Nuages présentant des hétérogénéités horizontales [*Mishchenko et al. (1996)*] et verticales [*Heymsfield and Iaquinta (2000)*] importantes.
- ⇒ Sensibilités des propriétés radiatives de ces nuages à la variabilité verticale de la distribution granulométrique des cristaux de glace.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Etude des propriétés optiques des cristaux de glace des nuages de la haute troposphère

(Problématique 1)

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

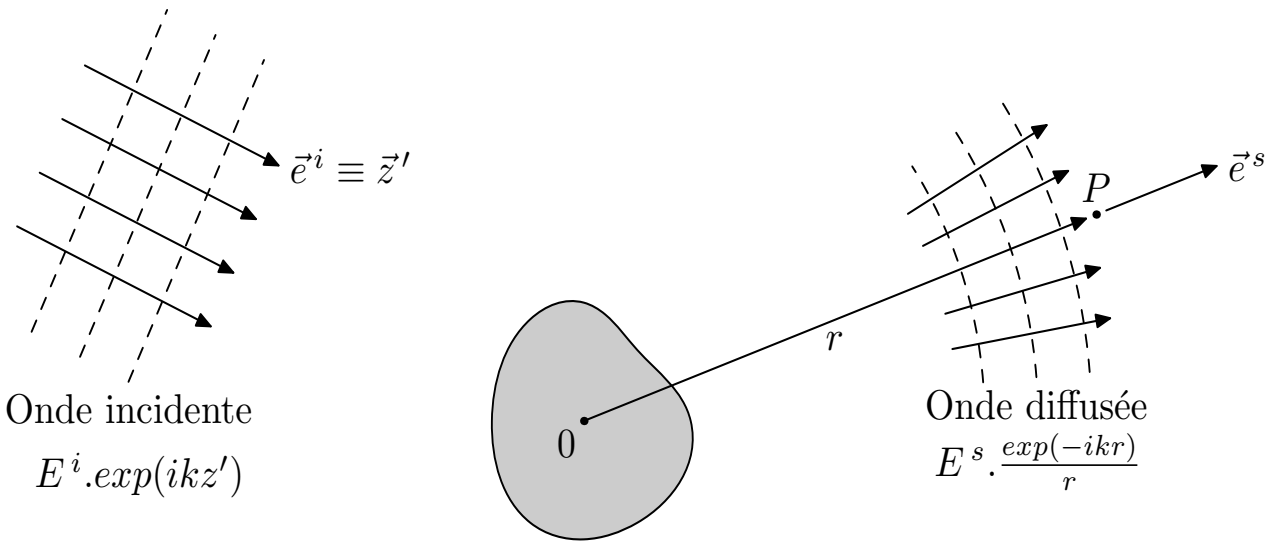
Questions

Propriétés Optiques :

But : Déterminer la matrice d'amplitude $\boldsymbol{S}$ reliant le champ diffusé $\vec{E}^s$ et le champ incident $\vec{E}^i$, telle que :

$$\vec{E}^s = \frac{exp(-ikr + ikz')}{ikr}.\boldsymbol{S}(\boldsymbol{n}(\boldsymbol{\lambda}), \boldsymbol{\Theta}, \boldsymbol{\Phi}).\vec{E}^i$$

où : - n : indice de réfraction de la particule.
- (Θ, Φ) : angle zénithal et azimutal de diffusion
- k : nombre d'onde $(= 2\pi/\lambda)$



$\boldsymbol{S} \Rightarrow$ l'ensemble des propriétés optiques : la section efficace d'extinction σ_e, l'albedo de diffusion simple $\bar{\omega}_0$, la matrice de phase $\boldsymbol{P}$, ...

Plan

Contexte Général

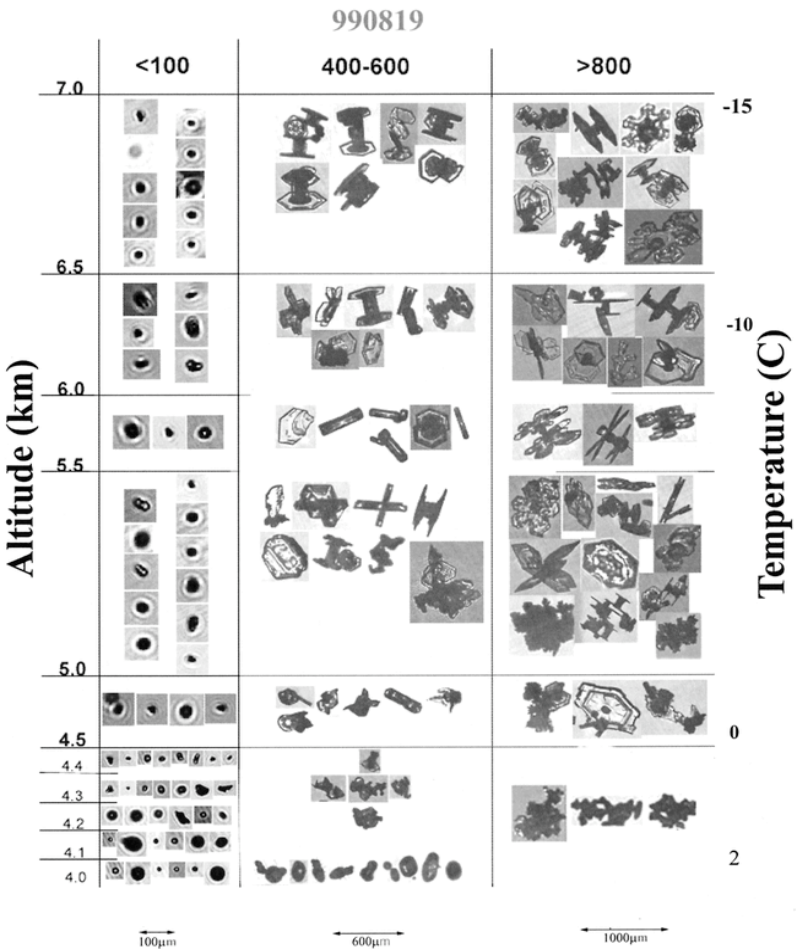
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Problématique : Quelles sont les contraintes ?



Cristaux de glace observés dans un cirrus d'après : *Heymsfield et al. (2002).*

Contraintes :

.

- Cristaux avec des formes très variées.
- Cristaux de dimensions D allant de $\sim 10\,\mu m$ à $\sim 1000\,\mu m$.
- Longueur d'onde λ du rayonnement incident allant de $\lambda \sim 0.5\,\mu m$ à $\lambda \sim 10\,\mu m$.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

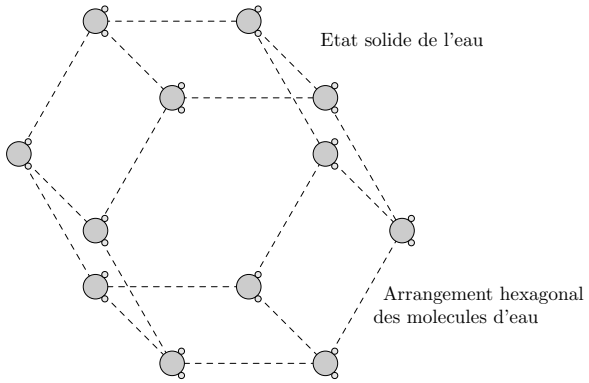
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

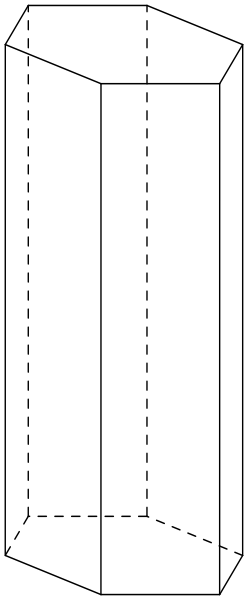
Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

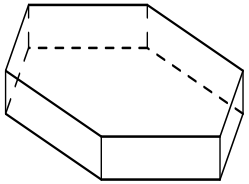
Questions

Cristaux avec des formes très variées

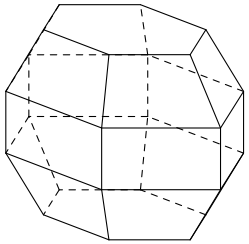
- ⇒ Impossible de calculer les propriétés optiques pour chaque forme de cristaux.
- ⇒ Développer des modèles microphysiques de cristaux :



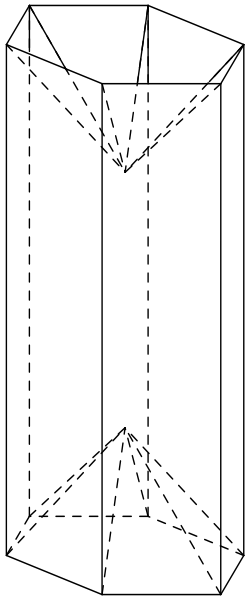




plaquette hexagonale.



droxtal



Exemples de modèles : colonne hexagonale,

colonne hexagonale creuse ("Hollow-Column")

Plan

Contexte Général

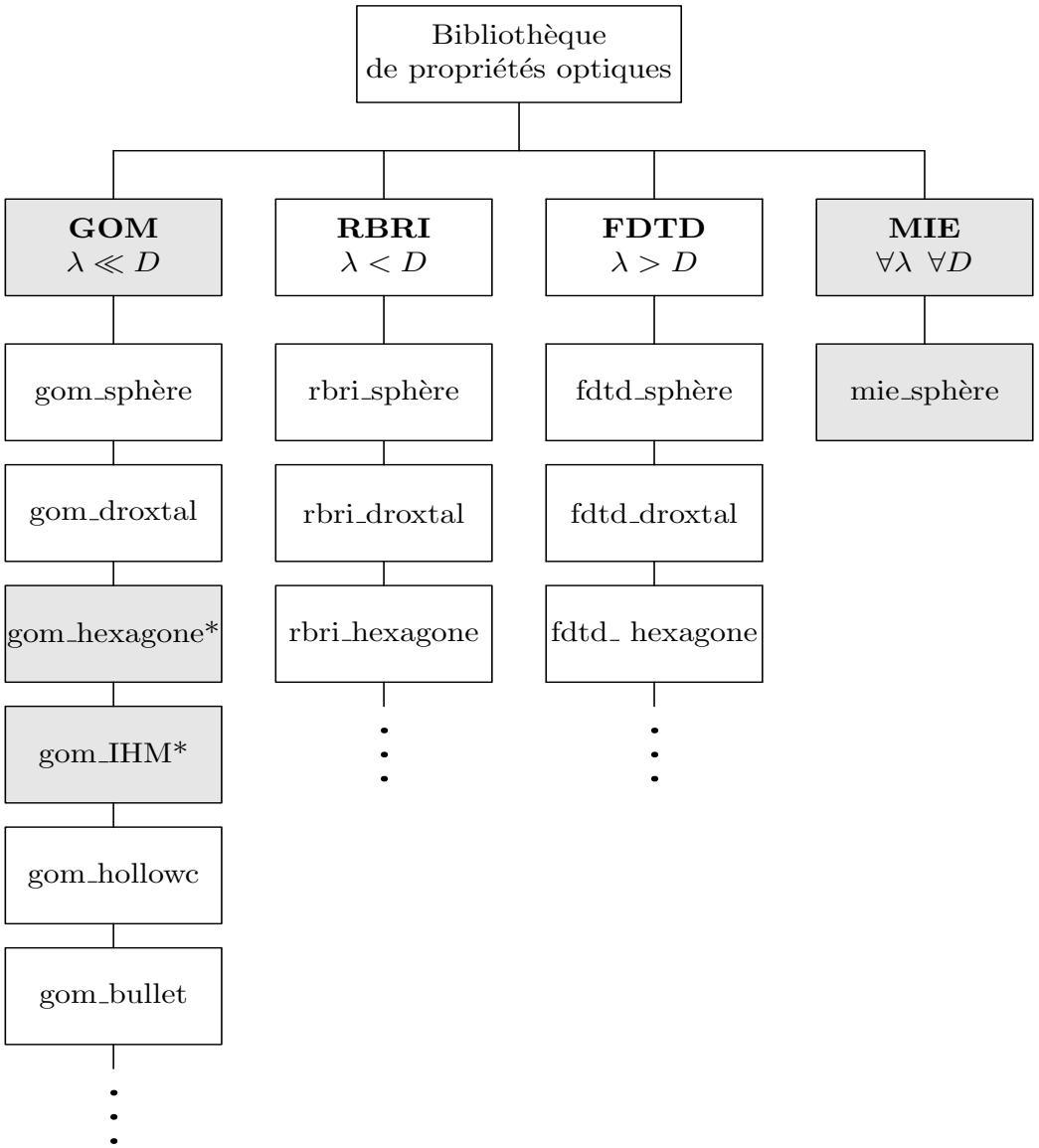
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Calcul des propriétés optiques de particules non sphériques :



Trois méthodes :

- GOM (Geometric Optic Method)
- RBRI (Ray-By-Ray Integration) [*Yang and Liou (1996)*]
- FDTD (Finite-Difference Time-Domain) [*Yee (1996)*]

* *Brogniez (1992)* et *Labonnote et al. (2001)*.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

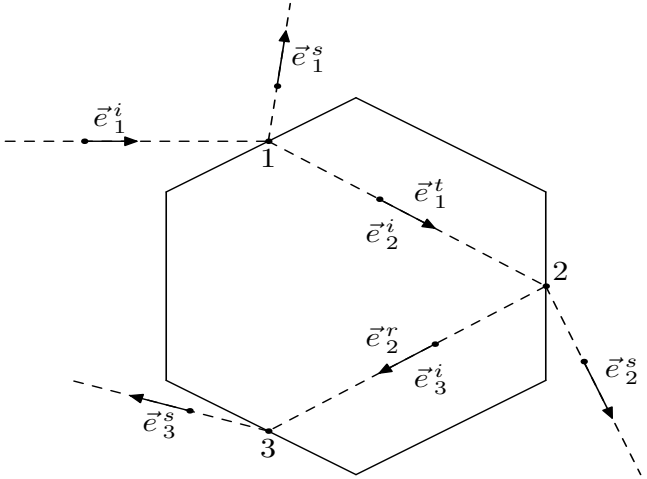
Questions

Stratégie :

⇒ Implémentation de la méthode RBRI (Ray-By-Ray Integration) :

- Application à des colonnes hexagonales

⇒ Amélioration de la méthode GOM (Finite-Difference Time-Domain method) :



- Calcul exact de la diffraction.
- Prise en compte de l'élargissement des rayons.
- Prise en compte de la delta-transmission : f_δ [d'après *Mishchenko and Macke (1998)*].

- Application à des colonnes hexagonales.
- Application à des particules sphériques.
- Application à des droxtals.
- Application à des colonnes creuses.
- Application à des bullet-rossette.

⇒ Implémentation de la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain) :

- Application à des particules sphériques.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

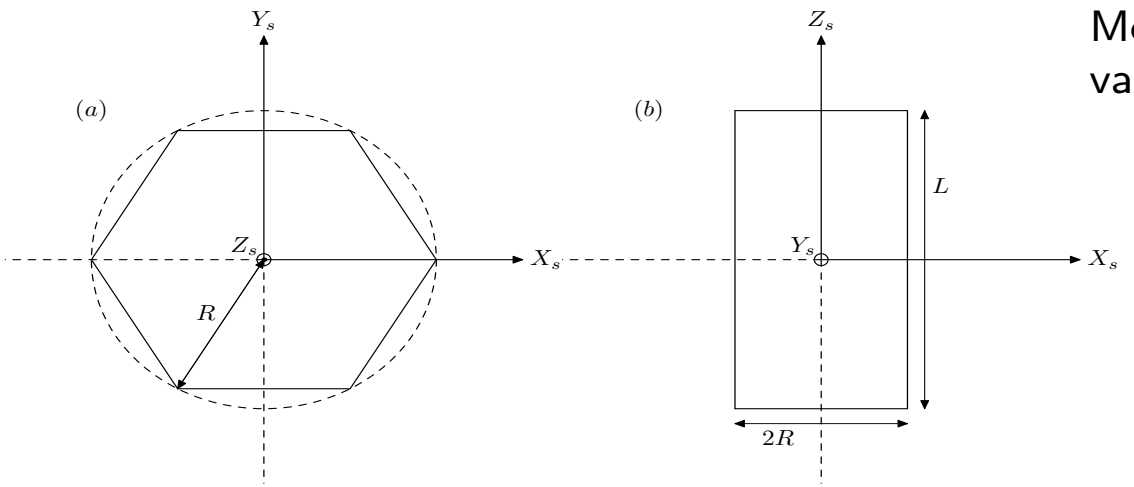
Résultats : illustration des différentes méthodes.

Sélection de deux longueurs d'onde :

- $\lambda = 0.66\,\mu m \Rightarrow$ indice de la glace : $(1.308 + i\,1.09 \times 10^{-8})$
- $\lambda = 3.78\,\mu m \Rightarrow$ indice de la glace : $(1.4005 + i\,7.1967 \times 10^{-3})$

.

Sélection d'un modèle microphysique de cristaux : la colonne hexagonale.



Modèle défini par deux variables :

- R : rayon du cercle circonscrit à la base hexagonale.
- L : longueur de la colonne.

Propriétés optiques déterminées pour un ensemble de cristaux, de même forme et de même taille, orientées aléatoirement dans l'espace :

Plan

Contexte Général

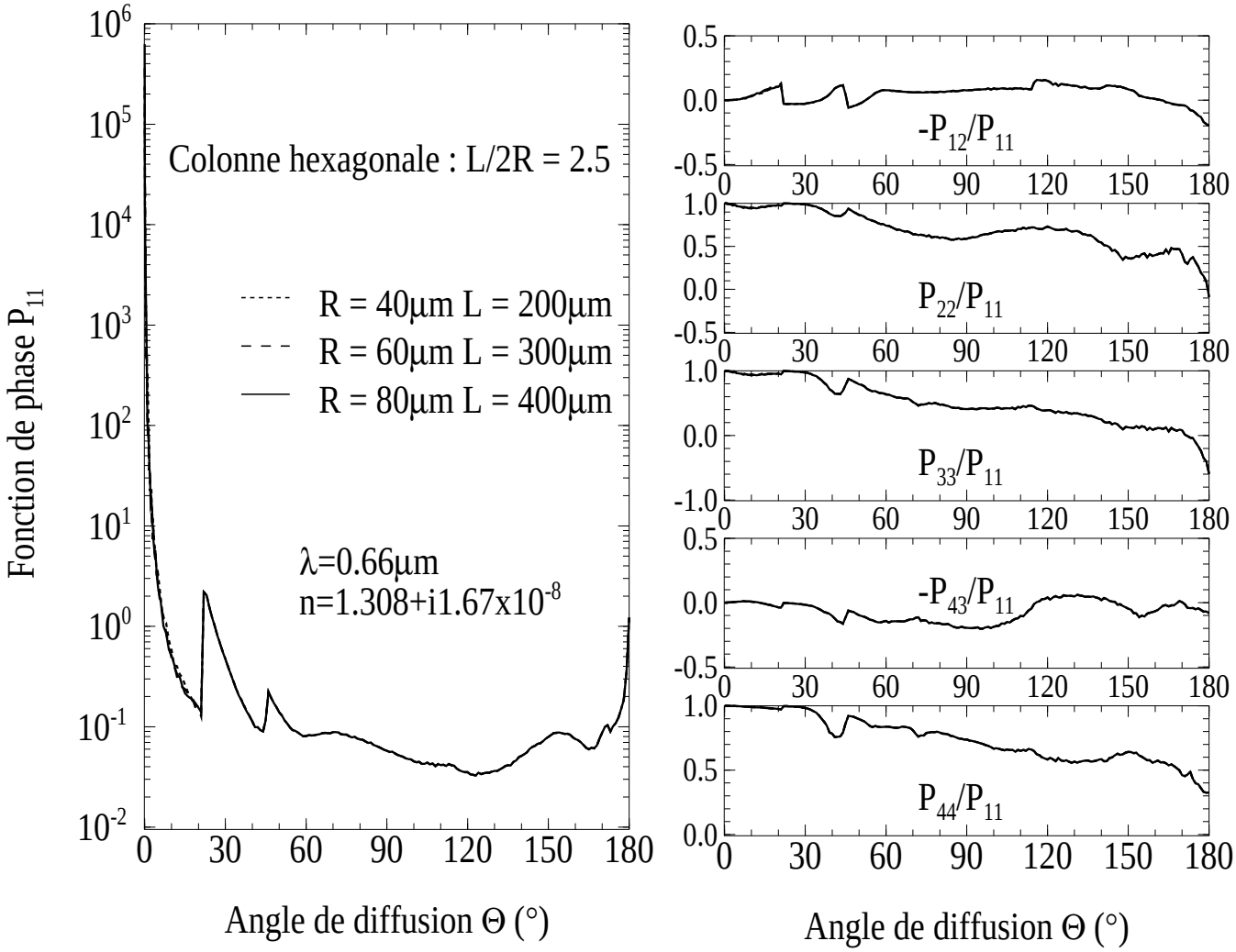
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variation des éléments de la matrice de phase $\boldsymbol{P}$, à la longueur d'onde $\lambda = 0.66\,\mu m$, en fonction de la taille des cristaux :



$\Rightarrow$ Très faible sensibilité.

Plan

Contexte Général

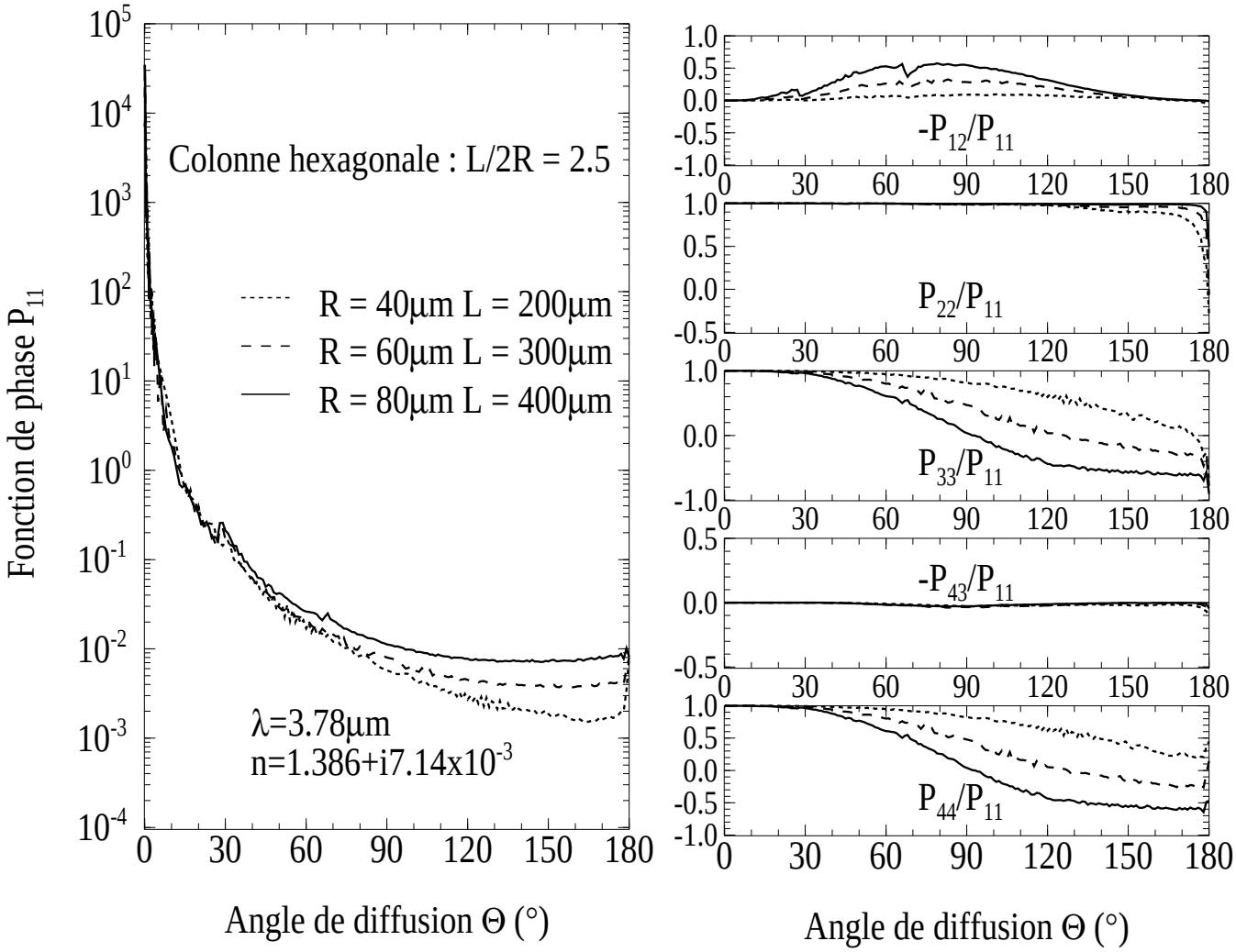
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variation des éléments de la matrice de phase $\boldsymbol{P}$, à la longueur d'onde $\lambda = 3.78\,\mu m$, en fonction de la taille des cristaux :



$\Rightarrow$ Forte sensibilité aux grands angles de diffusion Θ.

Plan

Contexte Général

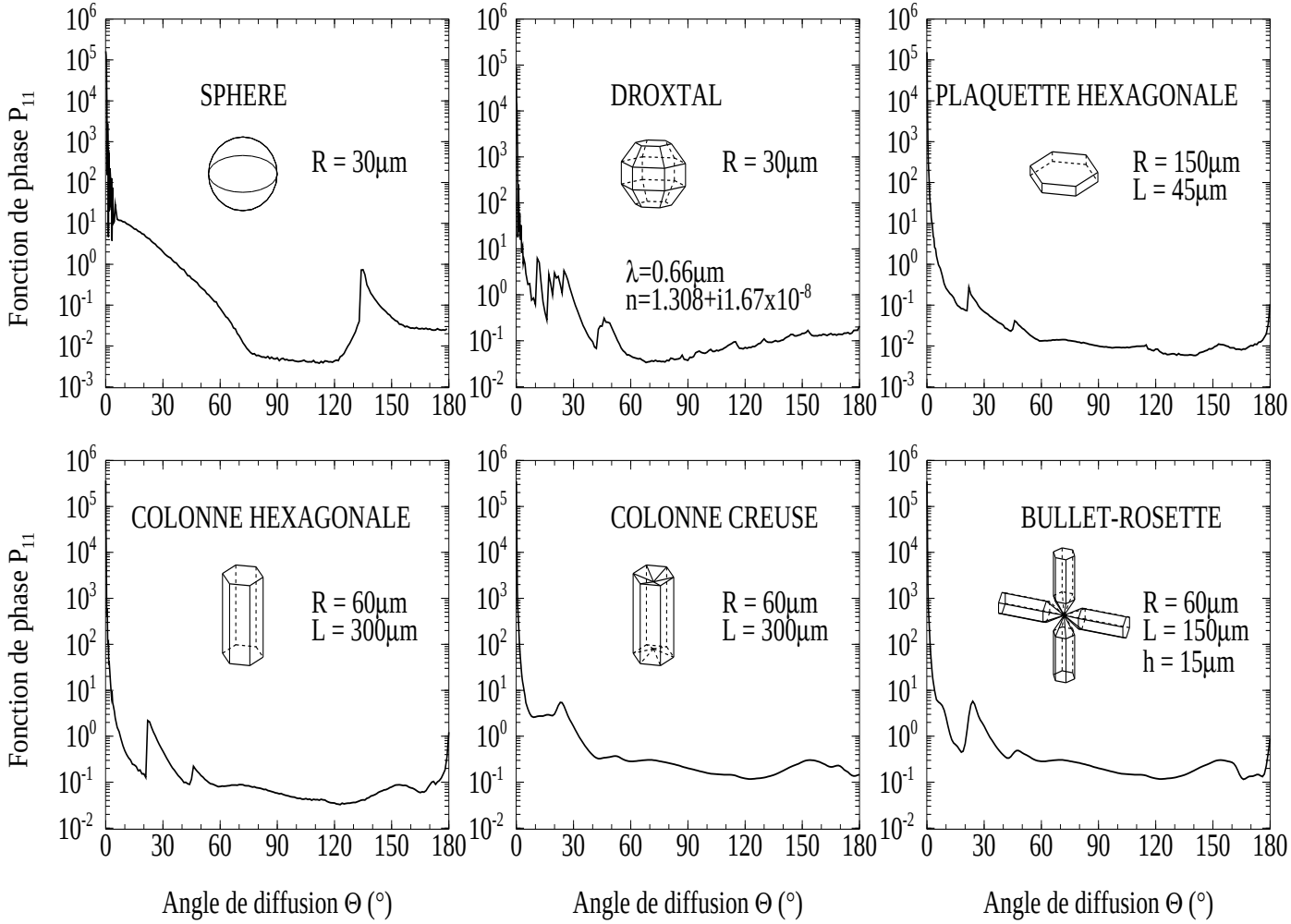
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variation de la fonction de phase P_{11}, à la longueur d'onde $\lambda = 0.66\,\mu m$, en fonction de la forme des cristaux :



⇒ Forte sensibilité à la forme.

Plan

Contexte Général

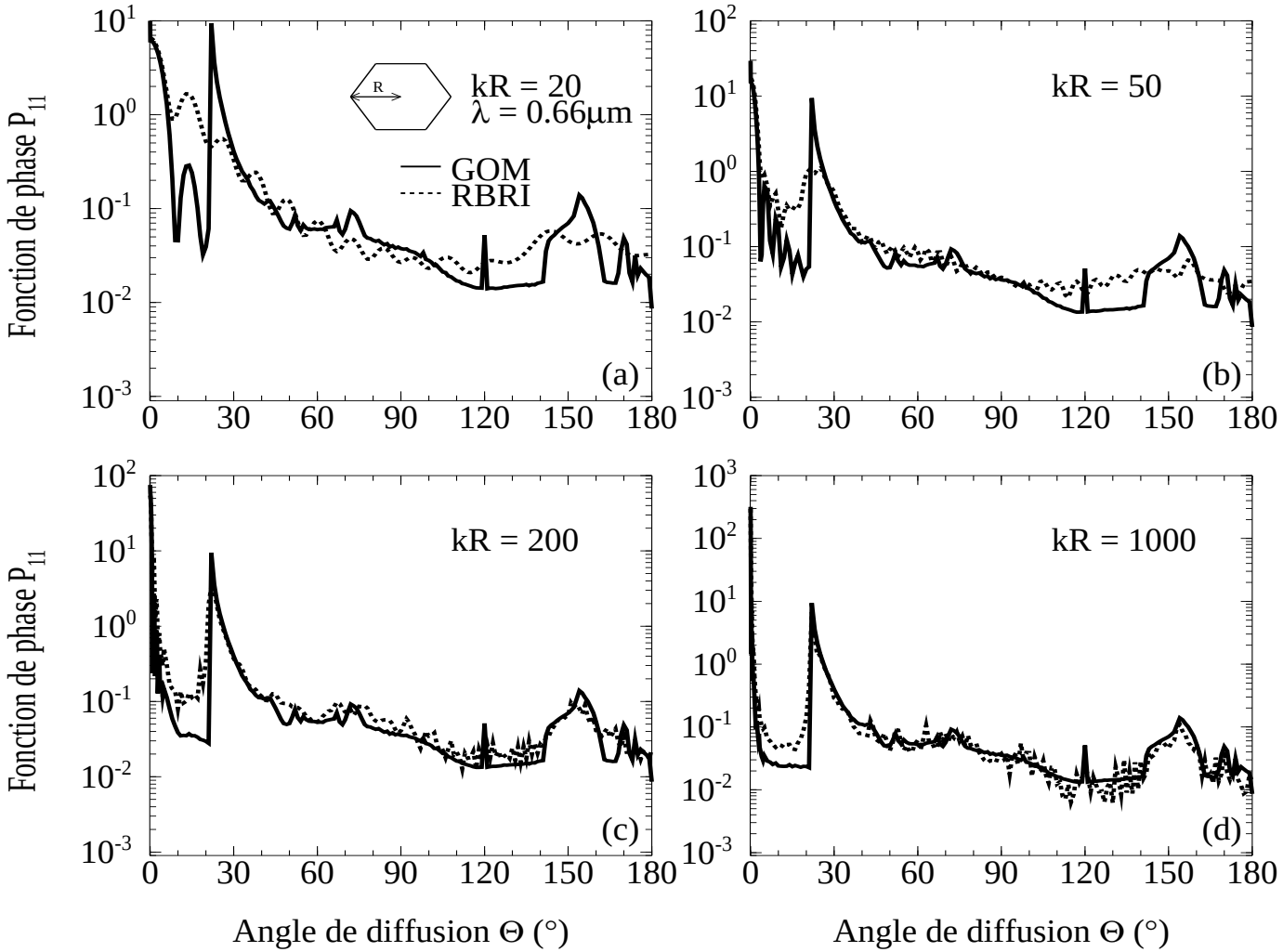
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des fonctions de phase P_{11} calculées à partir de la méthode GOM et RBRI, en fonction du paramètre de taille $k.R$:



⇒ Fonctions de phase P_{11} convergent bien quand R augmente par rapport à λ.

Plan

Contexte Général

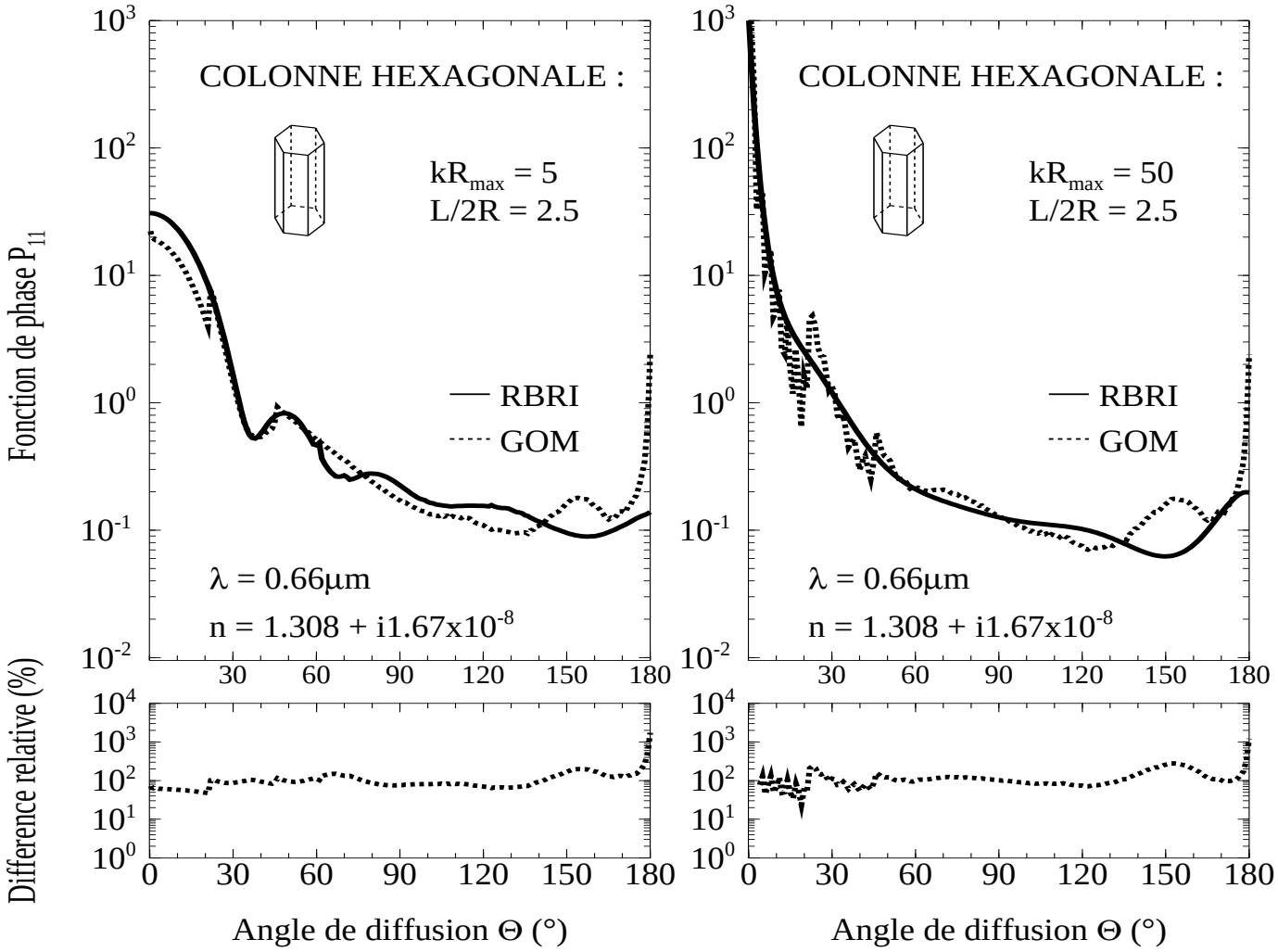
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des fonctions de phase P_{11} calculées à partir de la méthode GOM et RBRI, pour des colonnes hexagonales de tailles différentes :



⇒ Evaluation de l'erreur sur la fonction de phase P_{11} calculée par la GOM.

Plan

Contexte Général

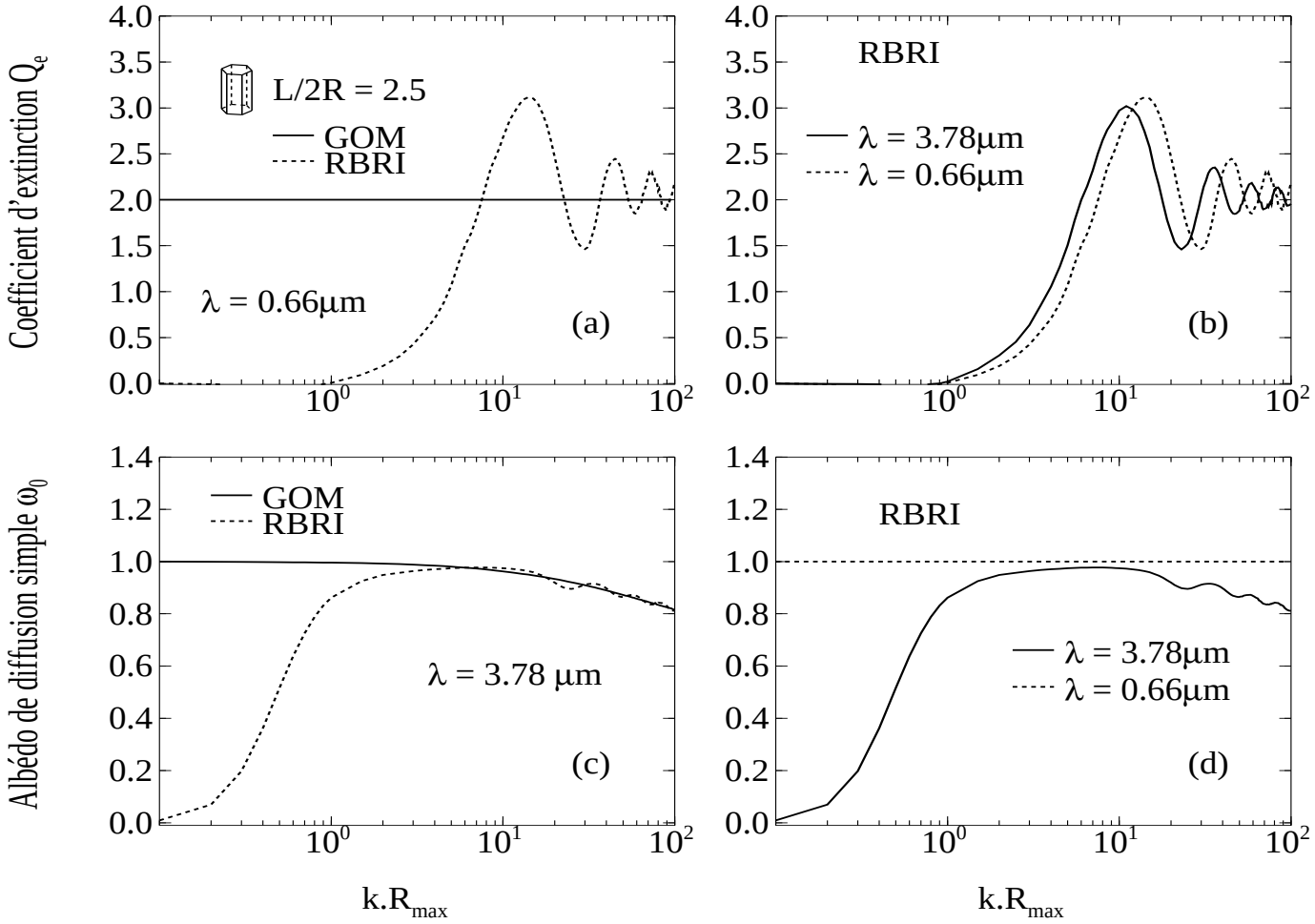
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des coefficients d'extinction Q_e et des albedo de diffusion simple $\bar{\omega}_0$, calculés par la GOM et la RBRI, aux longueurs d'onde $\lambda = 0.66\,\mu m$ et $\lambda = 3.78\,\mu m$, pour des colonnes hexagonales :



⇒ Erreur qui varie en fonction des propriétés optiques.

Plan

Contexte Général

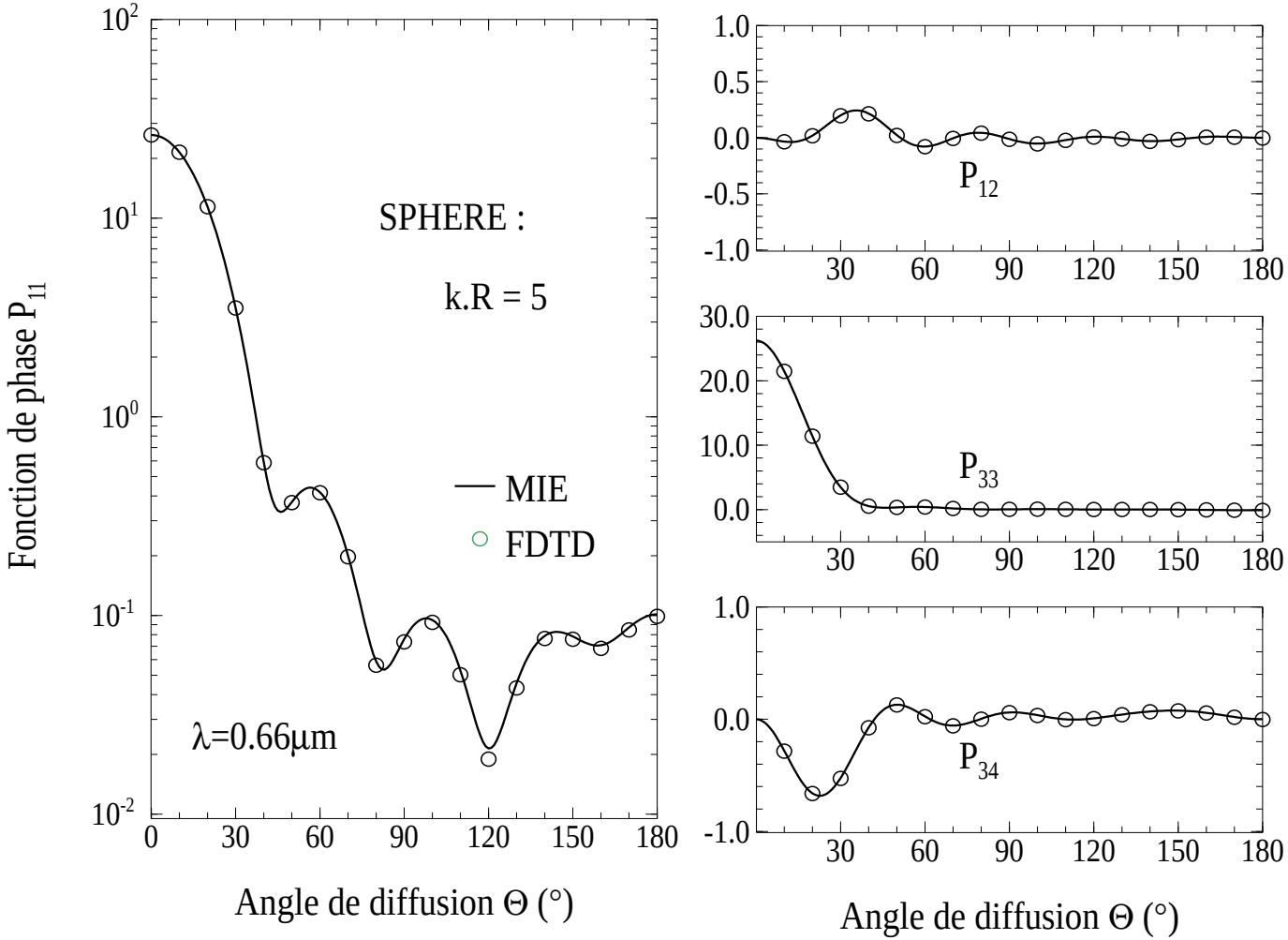
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des éléments de la matrice de phase $\boldsymbol{P}$ obtenus par la méthode FDTD et par la théorie de Mie [*Du (2004)*] :



⇒ Validation de notre algorithme pour des particules sphériques.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Conclusions et Perspectives :

Problématique de départ :

- Nécessité de calculer les propriétés optiques de cristaux pour comprendre les propriétés radiatives des nuages de la haute troposphère.
- $\Rightarrow$ Plusieurs méthodes sont nécessaires pour calculer les propriétés optiques.

.

Développements importants réalisés durant la thèse :

- Nouvelles compétences : la RBRI, la FDTD et améliorations de la GOM.
- Application de ces méthodes pour calculer les propriétés optiques de différents modèles microphysiques de cristaux.
- $\Rightarrow$ Outils au LOA permettant de calculer les propriétés optiques de particules non sphériques quelles que soient leurs tailles et la longueur d'onde du rayonnement incident.

.

Perspectives :

- Evaluer précisément le domaine de validité de chaque méthode :
  - en fonction de la forme et du paramètre de taille $k.D$.
- Développement de nouveaux modèles microphysiques de cristaux :
  - des agrégats de colonnes hexagonales
  - des cristaux avec des rugosités de surface
  - etc
- Appliquer ces méthodes pour calculer les propriétés optiques d'aérosols non sphériques.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Conclusions et Perspectives :

⇒ Développer au LOA des modèles microphysiques de cristaux plus réalistes.
Exemple : le modèle microphysique de cristaux de Bryan Baum [d'après *Baum et al (2005)*] basé sur :

- Un ensemble de mesures *in situ*.
- Un pourcentage de chaque forme de cristaux de glace :

$\boldsymbol{D < 60\,\mu m}$	100% *droxtals*
$\boldsymbol{60\,\mu m < D < 1000\,\mu m}$	15% *bullet rosettes*, 50% *solid columns*, 35% *plates*
$\boldsymbol{1000\,\mu m < D < 2500\,\mu m}$	45% *hollow columns*, 45% *solid columns*, 10% *aggregates*
$\boldsymbol{2500\,\mu m < D < 9500\,\mu m}$	97% *bullet rosettes*, 3% *aggregates*

- ⇒ Bibliothèque de propriétés optiques calculées pour 18 distributions granulométriques de diamètres effectifs D_e allant de $10\,\mu m$ à $180\,\mu m$ avec un pas constant de $10\,\mu m$.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Influence de la variabilité verticale de la distribution granulométrique des cristaux sur les propriétés radiatives des nuages de la haute troposphère

(Problématique 2)

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

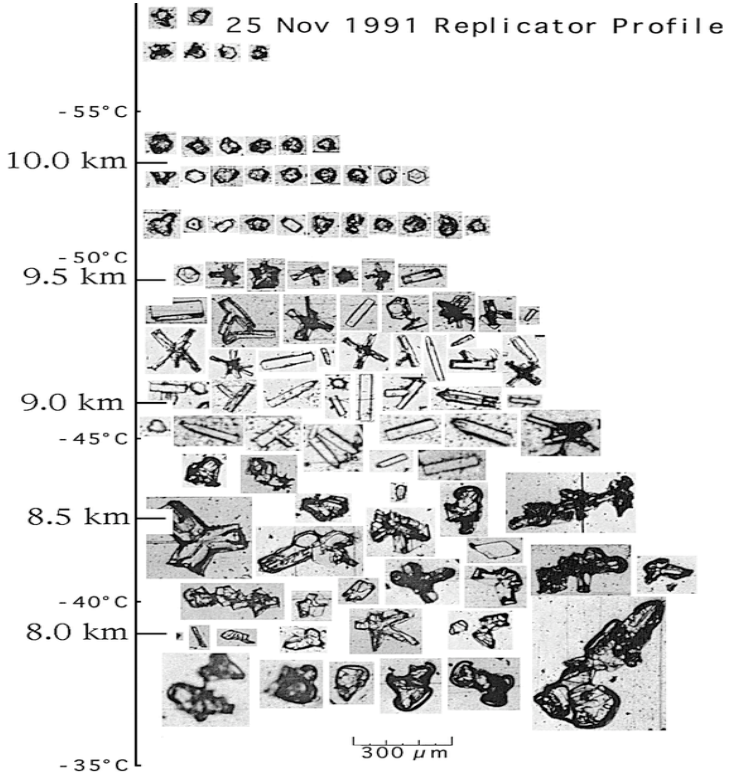
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Problématique :

Inversions des propriétés macrophysiques et microphysiques des nuages :



Cristaux de glace observés dans un cirrus d'après : *Heymsfield and Iaquinta (2000).*

- Hypothèse : le nuage est spatialement homogène
  $\Rightarrow$ 1 seule distribution ganulométrique : 1 D_e

Des observations *in situ* ont cependant montré :

- des hétérogénéités verticales importantes

Problématique de notre étude :

- Un modèle de nuage homogène est-il suffisant pour reproduire correctement les propriétés radiatives de ces nuages ?

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Développement du modèle de nuage :

Questions initiales lors du développement du modèle :

- Comment décomposer verticalement le nuage ?
- Comment décrire la répartition verticale des cristaux ?
- Combien de variables faut-il définir ?
- A-t-on tous les outils nécessaires au développement du modèle ?
- ...

.

Approche générale :

- Ne pas partir d'un modèle basé sur la dynamique du nuage.
- Objectif : étudier les sensibilités des propriétés radiatives des cirrus à la répartition verticale de leur granulométrie.
- Limiter le nombre de variables, autrement dit de degrés de liberté.

Plan

Contexte Général

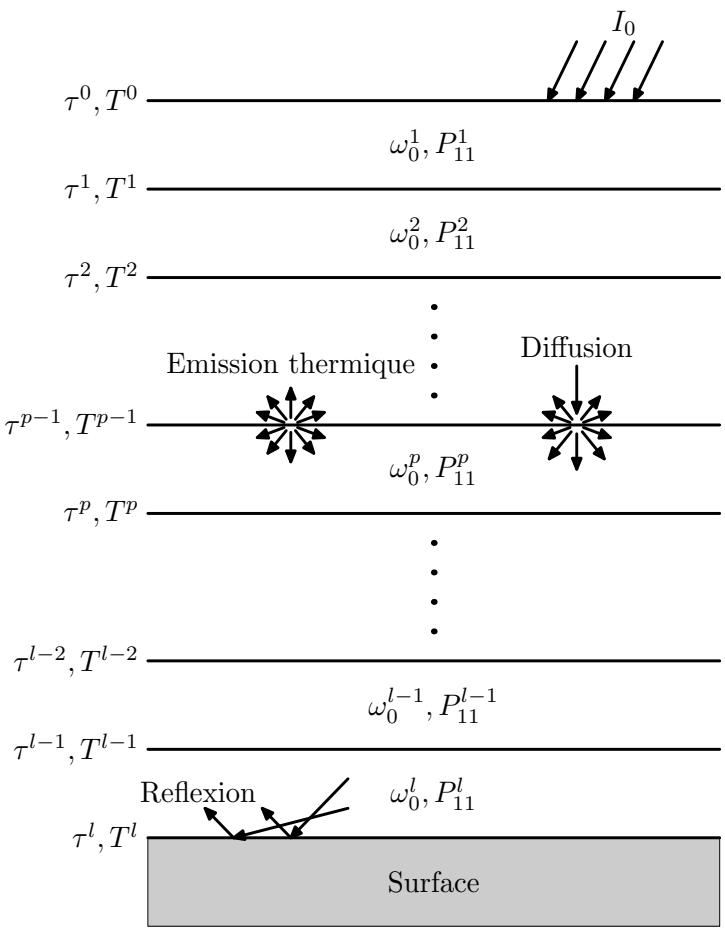
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Modèle de transfert radiatif :



Représentation simplifiée des variables et hypothèses associées au code DISORT (Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer).

Algorithme FASDOM (Fast Discrete-Ordinate-Method) [d'après *Dubuisson et al. (2005)*] basé sur :

- le code DISORT (Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer) pour résoudre l'équation de transfert radiatif [d'après *Stamnes et al. (1988)*].
- la correlated-K pour calculer l'absorption des différents gaz [d'après *Lacis et Oinas (1991) ; Kratz (1995)*].

$\Rightarrow$ algorithme relativement rapide.

Plan

Contexte Général

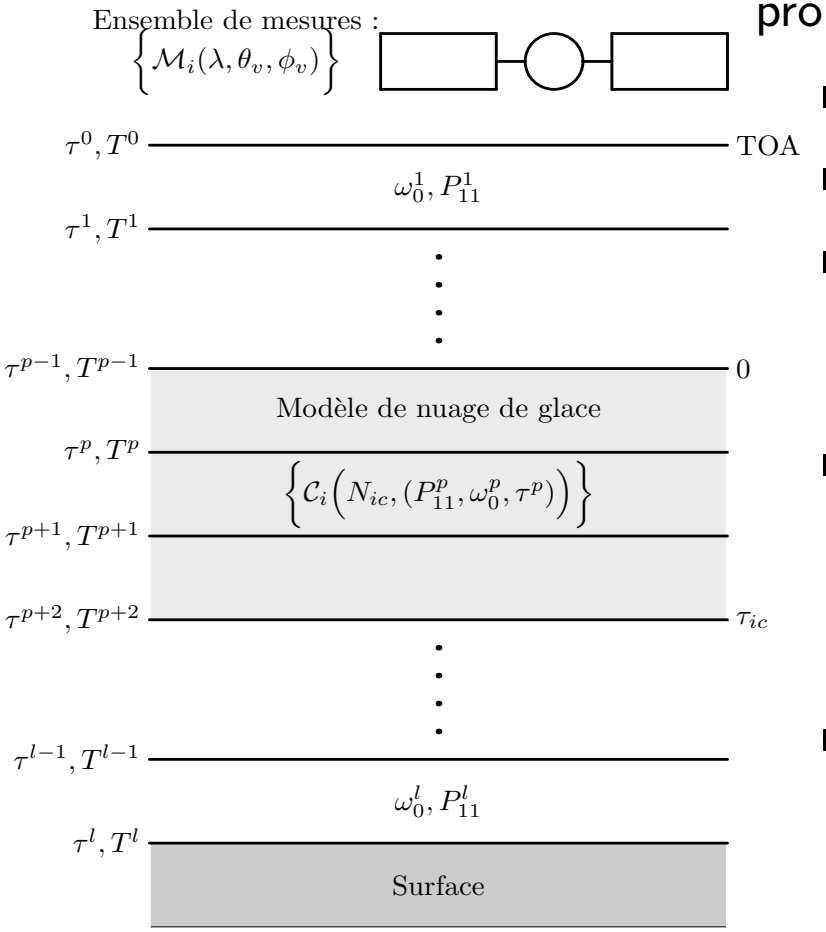
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variables relatives au nuage :



Ensemble des variables du modèle propre au nuage :

- p^{top} : sommet du nuage.
- p^{bot} : base du nuage.
- N_{ic} : nombre de couches utilisées pour décomposer verticalement le nuage.
- P_{11}^p la fonction de phase, $\bar{\omega}_0^p$ l'albedo de diffusion simple et τ^p l'épaisseur optique associés à la couche p.
- τ_{ic} : l'épaisseur optique totale du nuage :

$$\sum_{p=p^{bot}}^{p^{top}} \tau^p = \tau_{ic}$$

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

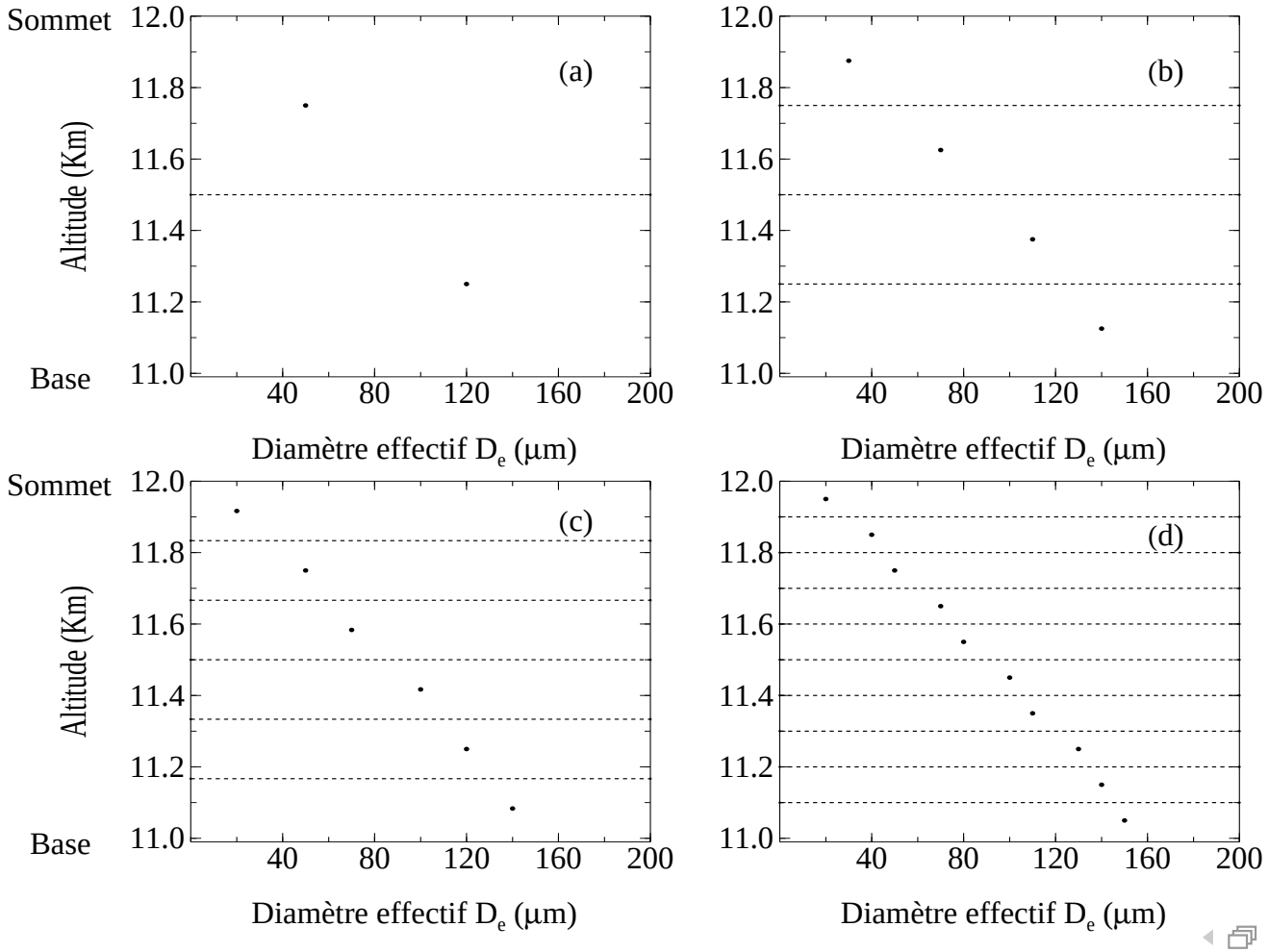
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Hypothèses sur la distribution verticale des cristaux dans le nuage :

⇒ Répartition linéaire des granulométries de cristaux en fonction de l'altitude : décrite par une fonction linéaire D_L d'argument (D_e^{bot}, D_e^{top}).



Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Etudes de sensibilité :

Valeurs de référence pour l'étude de sensibilité :

- Altitude : $p^{bot} = 11\,km$ et $p^{top} = 12\,km$
- Nombre de couches $N_{ic} = 10$.
- Δz^p constant
- 6 longueurs d'onde :
  - 1 visible $0.66\,\mu m$
  - 2 proche-infrarouge $(1.63\,\mu m, 2.11\,\mu m)$
  - 3 infrarouge thermique $(8.5\,\mu m, 11.0\,\mu m, 12.0\,\mu m)$
- Epaisseur optique totale $\tau_{ic} = 3$ pour $\lambda = 0.66\,\mu m$.
- Epaisseur optique totale τ_{ic} aux autres λ est :

$$\tau_{ic}(\lambda) = \tau_{ic}(0.66\,\mu m)\frac{Q_e(\lambda)}{Q_e(0.66\,\mu m)}$$

- Profil standard MLS (MidLatitudeSummer)
- Angles solaires $\Theta_s = 30^\circ$ et $\Phi_s = 180^\circ$

Plan

Contexte Général

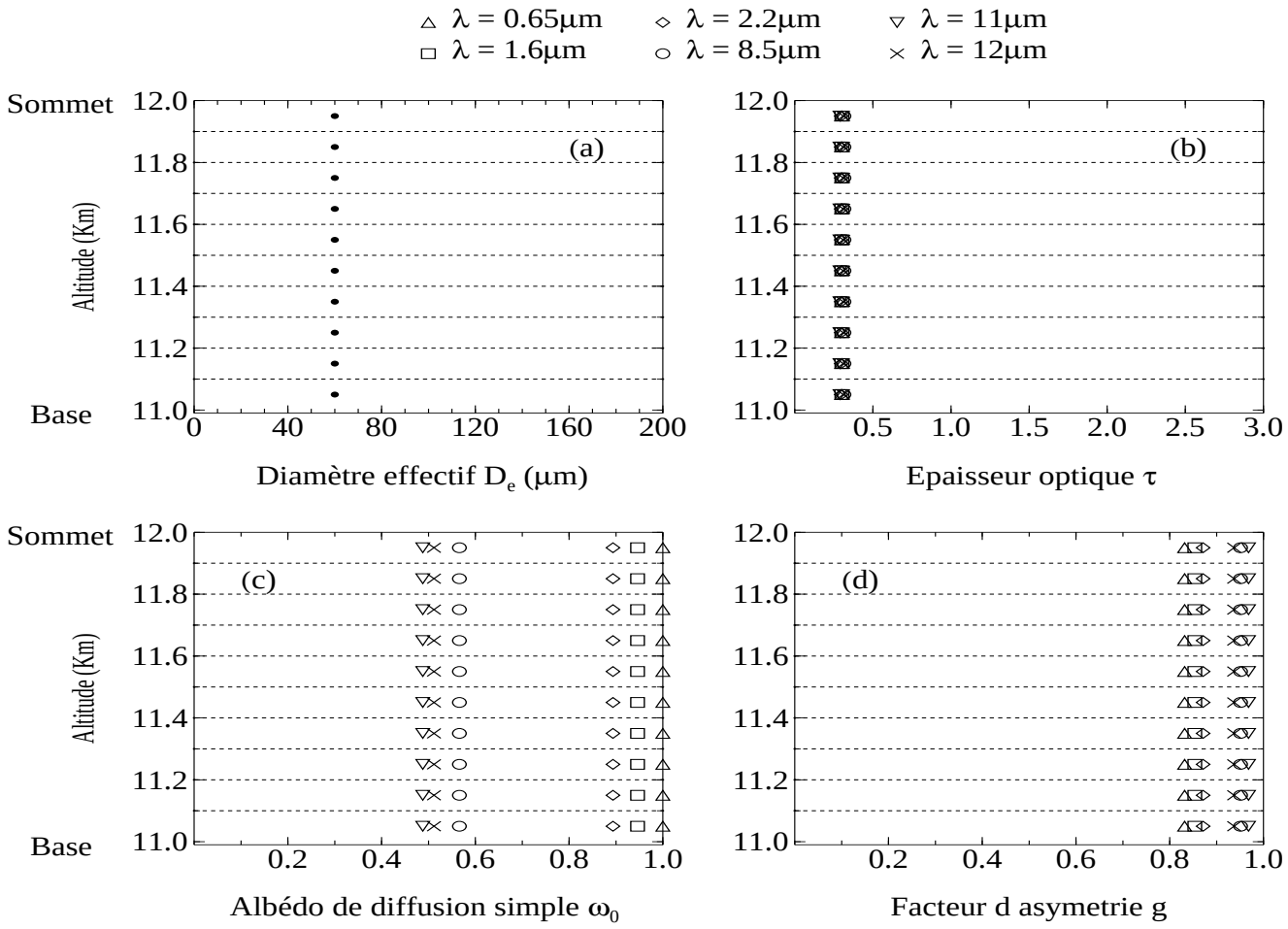
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Nuage verticalement homogène :



⇒ Une information à retrouver : le diamètre effectif D_e.

Plan

Contexte Général

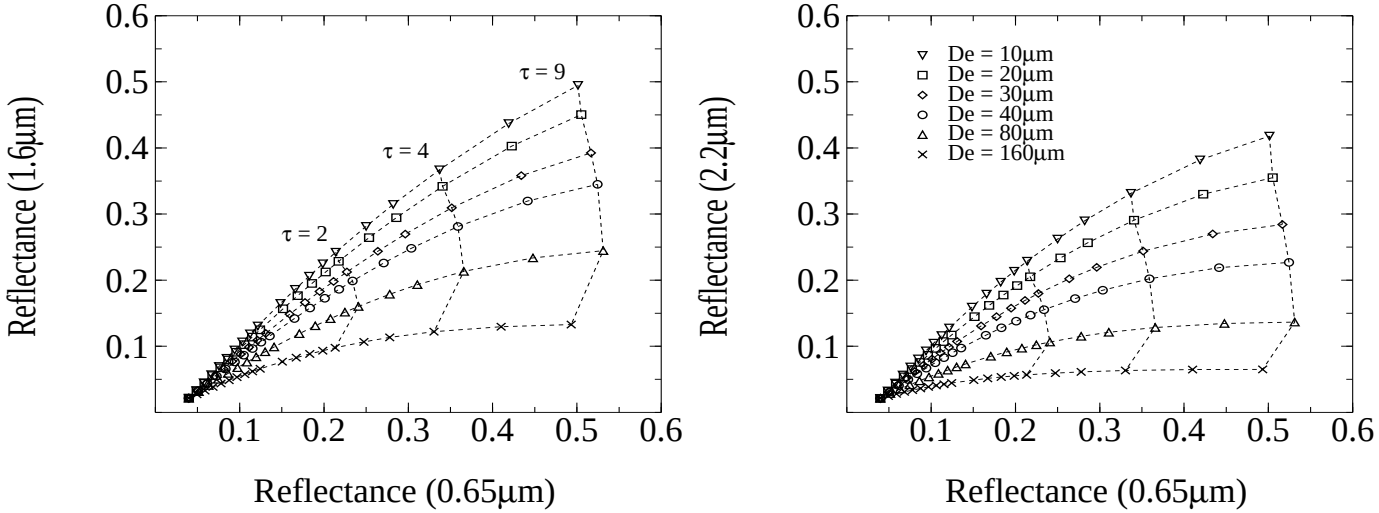
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

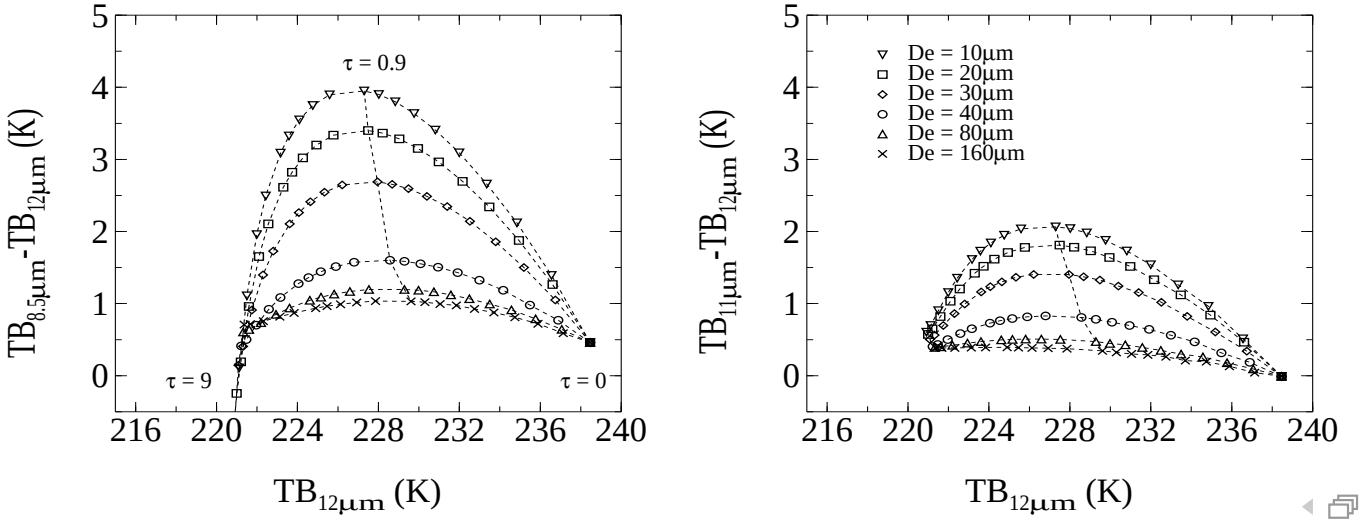
Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

⇒ Méthode d'inversion 1 du diamètre effectif D_e [*King et al. (1985)*] :



⇒ Méthode d'inversion 2 du diamètre effectif D_e [*Inoue (1985)*] :



Plan

Contexte Général

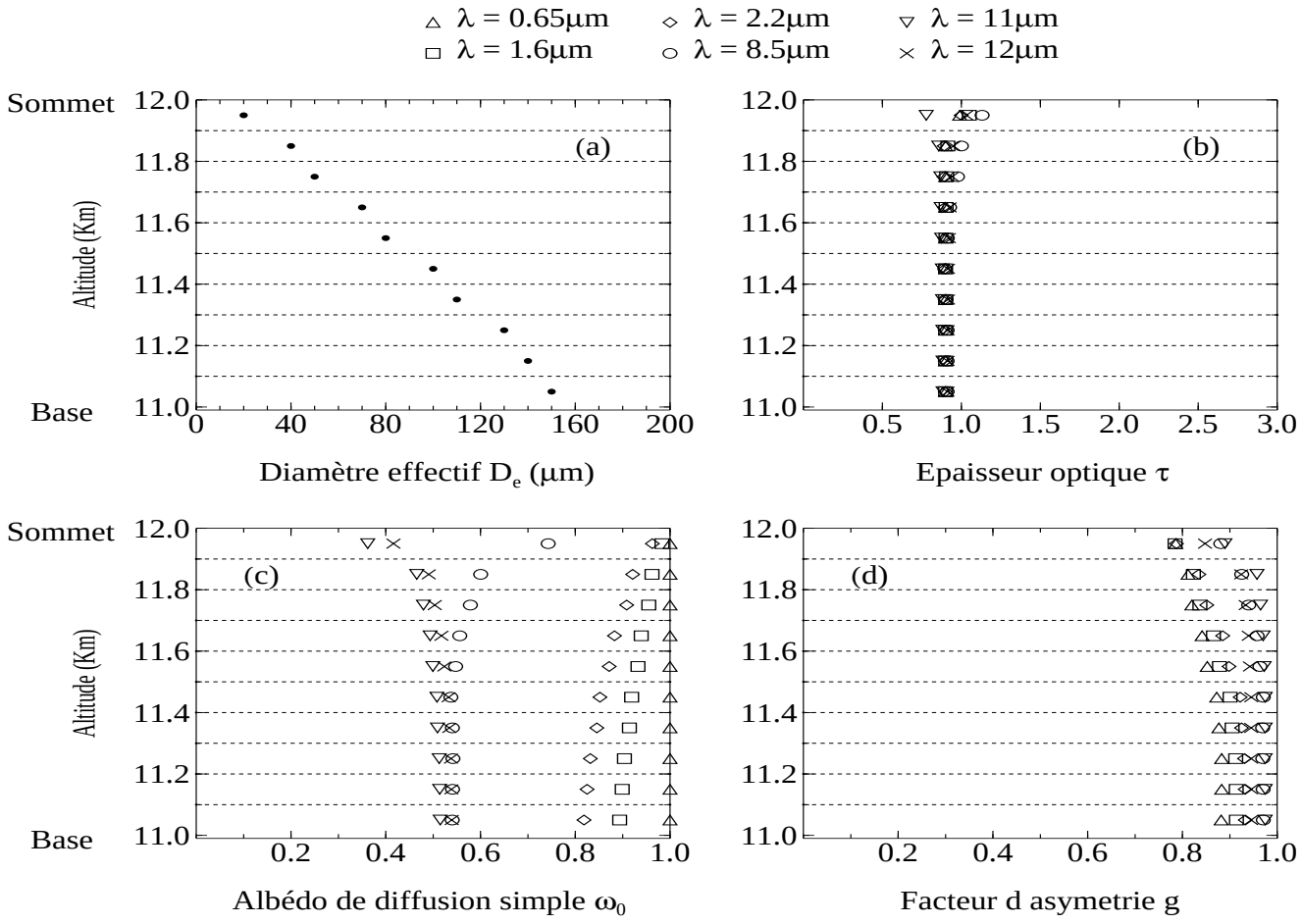
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Nuage verticalement hétérogène :



⇒ Combien de diamètres effectifs D_e faut-il pour correctement reproduire les propriétés radiatives du nuage ?

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des propriétés radiatives avec un nuage homogène (1 D_e) :

Problématique :

- pour un nuage verticalement hétérogène $D_L(D_e^{bot}, D_e^{top})$ quelconque.
- $\Rightarrow$ Existe-il un nuage verticalement homogène avec les mêmes propriétés radiatives ?
- $\Rightarrow$ Autrement dit :

  - quelle que soit la longueur d'onde λ,

  - quelle que soit l'épaisseur optique τ_{ic} du nuage,

  - quels que soient les angles de visée (θ_v, ϕ_v),

  Existe-il un nuage verticalement homogène donnant la même réflectance bidirectionnelle et la même température de brillance ?

.

Etude 1 :

- Comparaison en fonction des angles de visée (θ_v, ϕ_v).
- Comparaison en fonction de l'épaisseur optique τ_{ic} du nuage.
- Pour différents nuages hétérogènes.

Plan

Contexte Général

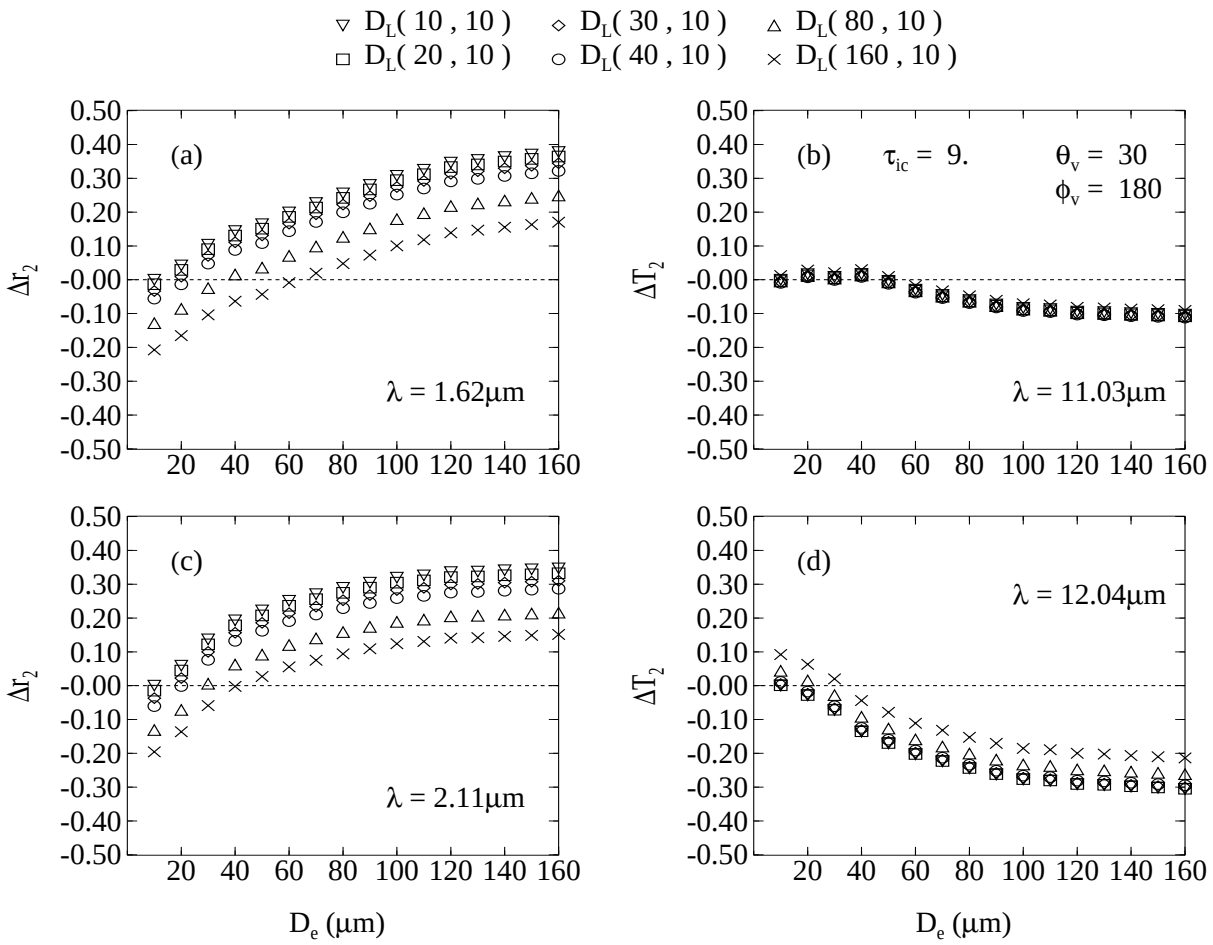
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des différences de réflectances bidirectionnelles Δr_b et de température de brillance Δt_b entre des nuages verticalement hétérogènes et homogènes pour 4λ :



Etude 1 $\Rightarrow$ il n'existe pas de nuage verticalement homogène avec les mêmes propriétés radiatives.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Sensibilité au nombre de couches N_{ic} :

Conclusion de l'Etude 1 :

- Quel que soit le nuage verticalement hétérogène il n'existe pas de nuage verticalement homogène avec les mêmes propriétés radiatives.
- $\Rightarrow$ Nouvelle Problématique : en combien de couches faut-il décomposer le nuage hétérogène ?
- $\Rightarrow$ Autrement-dit : combien de diamètres effectifs D_e faut-il pour correctement reproduire les propriétés radiatives du nuage ?

.

Etude 2 :

- Sensibilité des propriétés radiatives d'un nuage hétérogène au nombre de couches utilisées pour le représenter.

$$\Delta r_b = r_b(N_{ic} = n) - r_b(N_{ic} = 10) \quad \text{avec} \quad \text{n=1,2,...,10}$$

$$\Delta t_b = t_b(N_{ic} = n) - t_b(N_{ic} = 10) \quad \text{avec} \quad \text{n=1,2,...,10}$$

où - n : nombre de couches utilisées pour décomposer le nuage.

- $N_{ic} = 10$: nombre de couches de référence.

Plan

Contexte Général

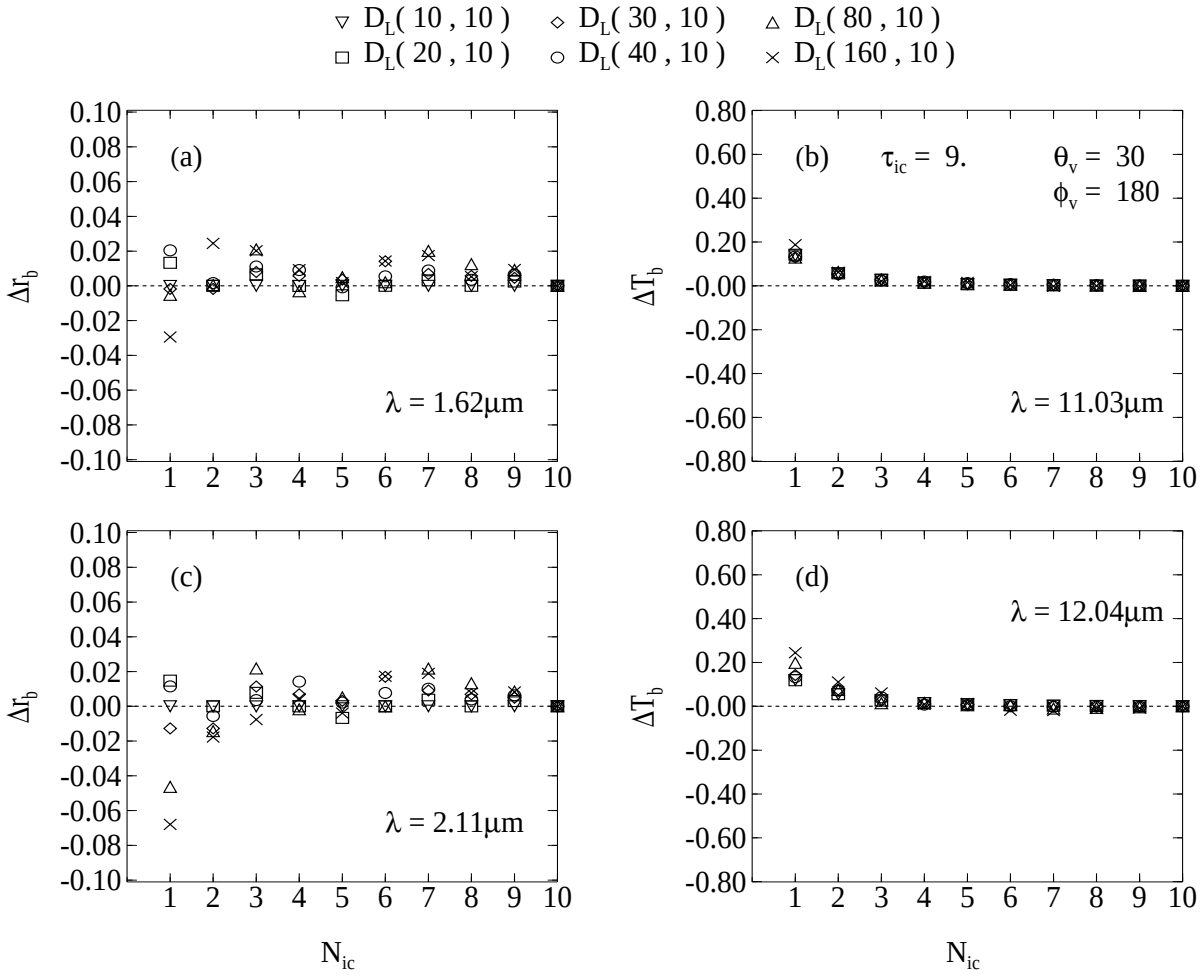
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Comparaison des différences de réflectances bidirectionnelles Δr_b et de température de brillance Δt_b pour des nuages hétérogènes décomposés en n couches :



Etude 2 $\Rightarrow$ Il est difficile d'établir combien de D_e sont nécessaires.

Plan

Contexte Général

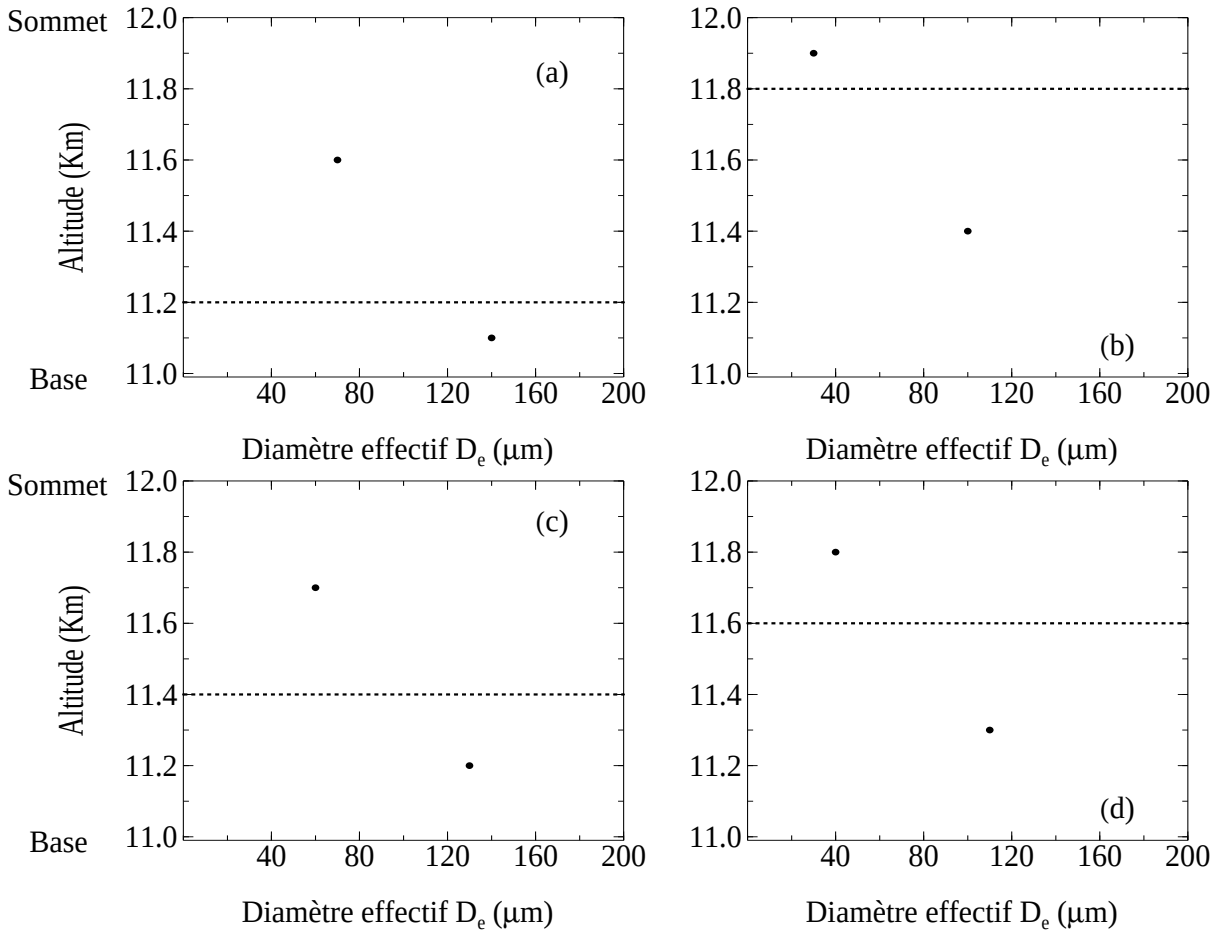
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Pourquoi est-il difficile par cette approche d'établir combien de D_e sont nécessaires ?



⇒ Grand nombre de possibilités dans la décomposition verticale du nuage.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Nouvelle approche 1 :

Rappel problématique :

- Combien de diamètres effectifs D_e faut-il pour correctement reproduire les propriétés radiatives du nuage ?
- $\Rightarrow$ Nouvelle approche : pour un nuage hétérogène décomposé en 10 couches, quelle est la sensibilité de la réflectance bidirectionnelle au diamètre effectif D_e situé dans une couche donnée ?

.

Etude 3 :

- Pour un nuage hétérogène quelconque,
- existe-il une fonction poids ω, à une longueur d'onde λ donnée et un angle de visée (θ_v, ϕ_v) donné, telle que

$$D_e^*(\lambda, \theta_v, \phi_v) = \int_0^{\tau_{ic}} \omega(\lambda, \theta_v, \phi_v).D_e(\tau^p)d\tau^p$$

où D_e^* : diamètre effectif d'un nuage homogène dont la réflectance bidirectionnelle, serait identique à celle du nuage hétérogène.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

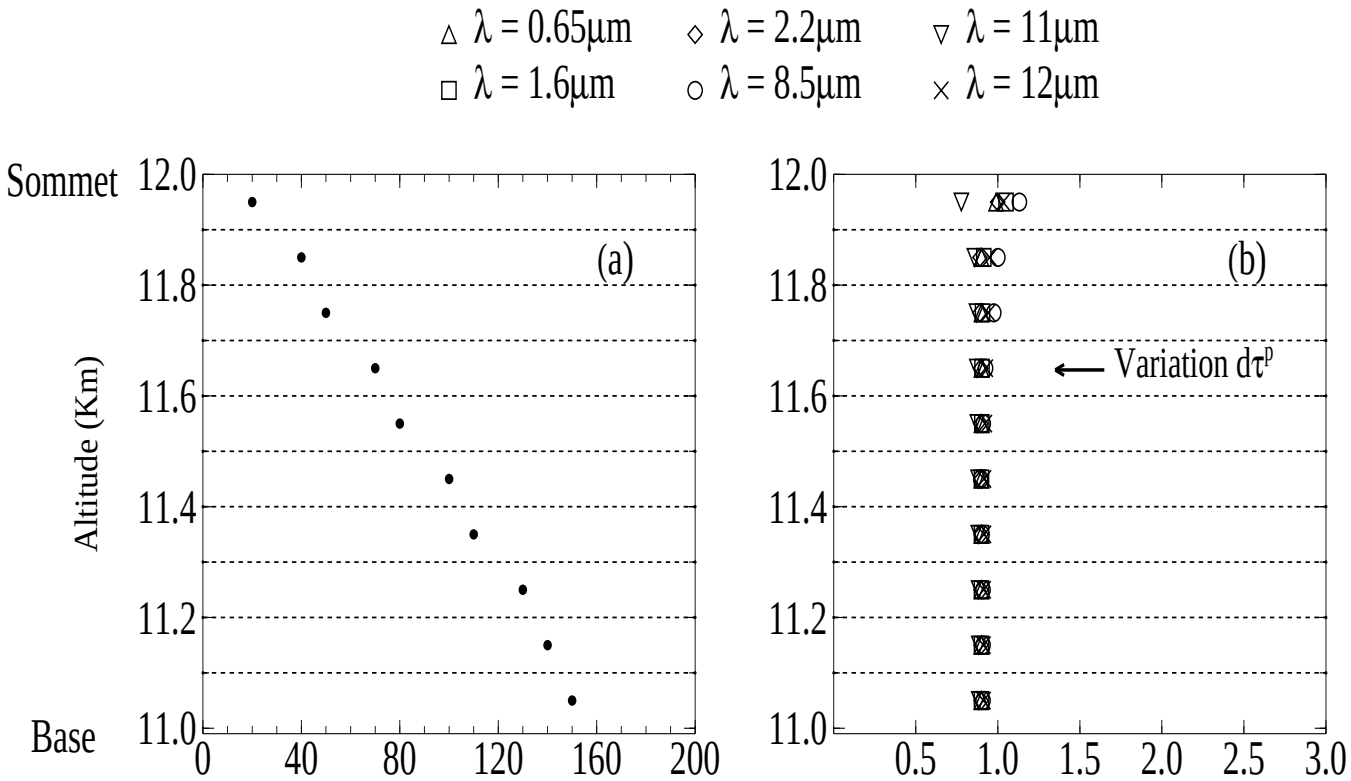
Questions

.

⇒ Construction d'une fonction poids normalisée :

$$\omega_{r_b} = \lim_{d\tau^p \to 0} \frac{r_b(\tau_{ic} + d\tau^p) - r_b(\tau_{ic})}{\frac{d\tau^p}{r_b(\tau_{ic})}}$$

où $r_b(\tau_{ic})$ et $r_b(\tau_{ic} + d\tau^p)$: réflectances bidirectionnelles pour un nuage d'épaisseur optique τ_{ic} et $\tau_{ic} + d\tau^p$.



Plan

Contexte Général

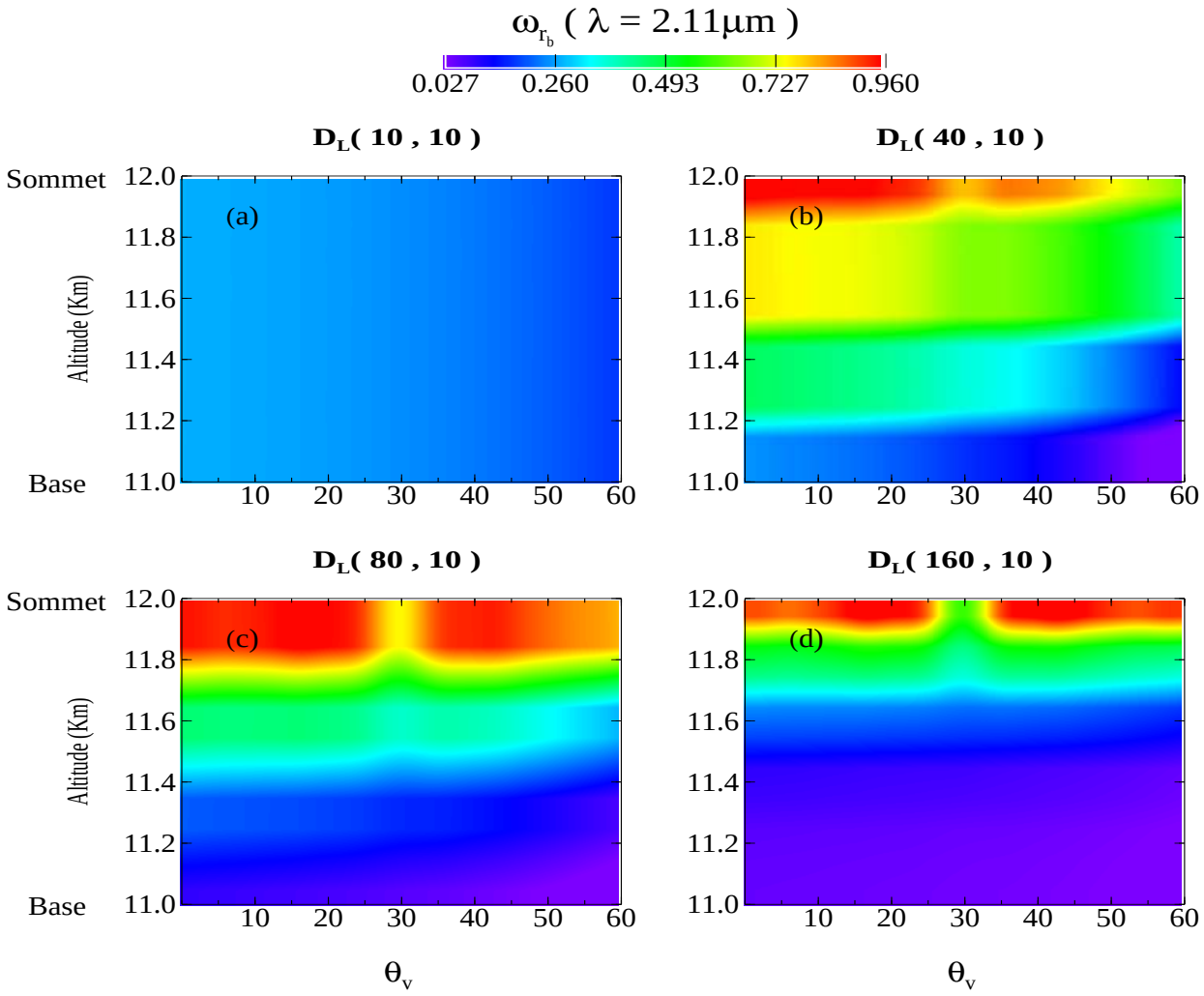
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variation de la fonction poids ω_{r_b}, en fonction de l'altitude, pour différents angles de visée θ_v, à la longueur d'onde $\lambda = 2.11\,\mu m$:



⇒ Sensibilité importante de la fonction poids ω aux diamètres effectifs D_e situés au sommet des nuages verticalement hétérogènes.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Nouvelle approche 2 :

Rappel problématique :

- Combien de diamètres effectifs D_e faut-il pour correctement reproduire les propriétés radiatives du nuage ?
- Conclusion de l'étude 3 : la réflectance bidirectionnelle à différents angles de visée (θ_v, ϕ_v) donne une information sur les diamètres effectifs D_e au sommet du nuage.
- $\Rightarrow$ Comment retrouver l'information sur les diamètres effectifs D_e à la base du nuage ?

Etude 4 :

- Pour un nuage hétérogène quelconque,
- existe il une fonction poids ω', à deux longueurs d'onde λ données et un angle de visée (θ_v, ϕ_v) donné, telle que :

$$D_e^{**}(\lambda_1, \lambda_2, \theta_v, \phi_v) = \int_0^{\tau_{ic}} \omega'(\lambda_1, \lambda_2, \theta_v, \phi_v).D_e(\tau^p)d\tau^p$$

où D_e^{**} : diamètre effectif d'un nuage homogène dont la différence de réflectances bidirectionnelles, serait identique à celle du nuage hétérogène.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

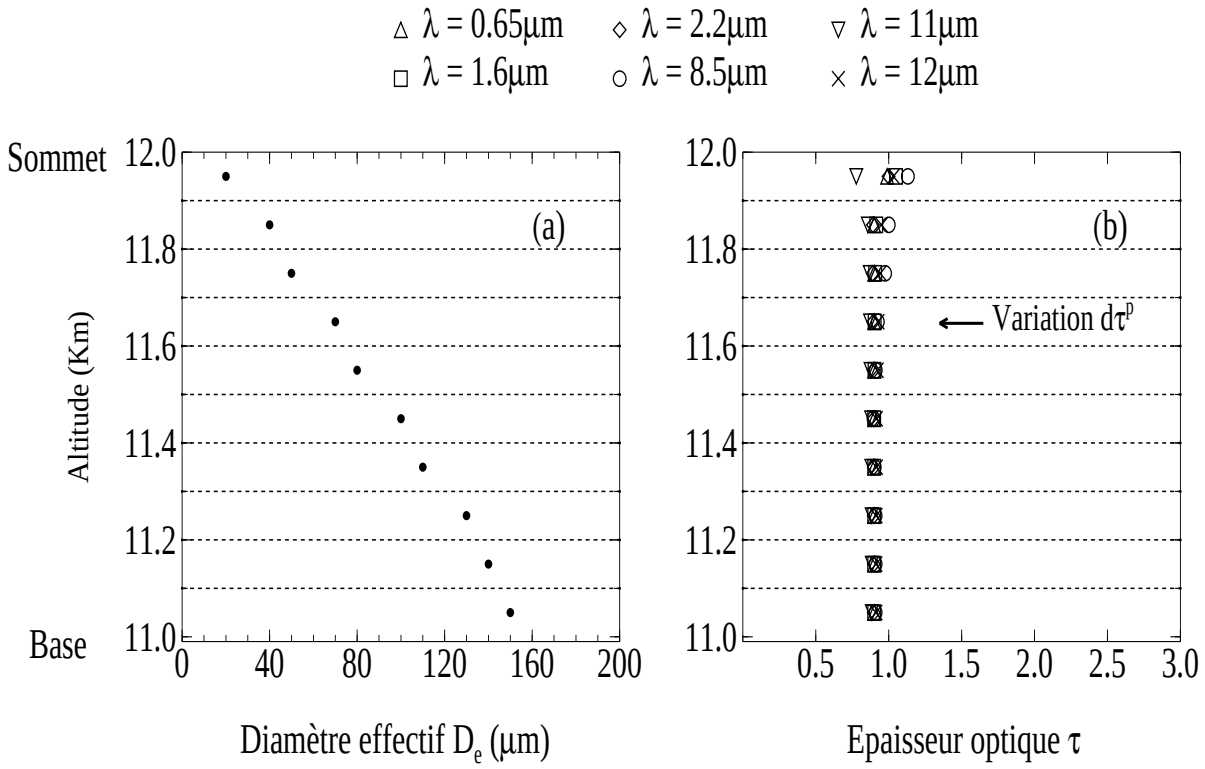
Questions

.

$\Rightarrow$ Construction d'une fonction poids normalisée :

$$\omega_{dr_b} = \frac{\left[r_b(\lambda_1, \tau_{ic} + d\tau^p) - r_b(\lambda_2, \tau_{ic} + d\tau^p)\right] - \left[r_b(\lambda_1, \tau_{ic}) - r_b(\lambda_2, \tau_{ic})\right]}{\dfrac{d\tau}{\left[r_b(\lambda_1, \tau_{ic}) - r_b(\lambda_2, \tau_{ic})\right]}}$$

où $r_b(\tau_{ic})$ et $r_b(\tau_{ic} + d\tau^p)$: réflectances bidirectionnelles pour un nuage d'épaisseur optique τ_{ic} et $\tau_{ic} + d\tau^p$.



Plan

Contexte Général

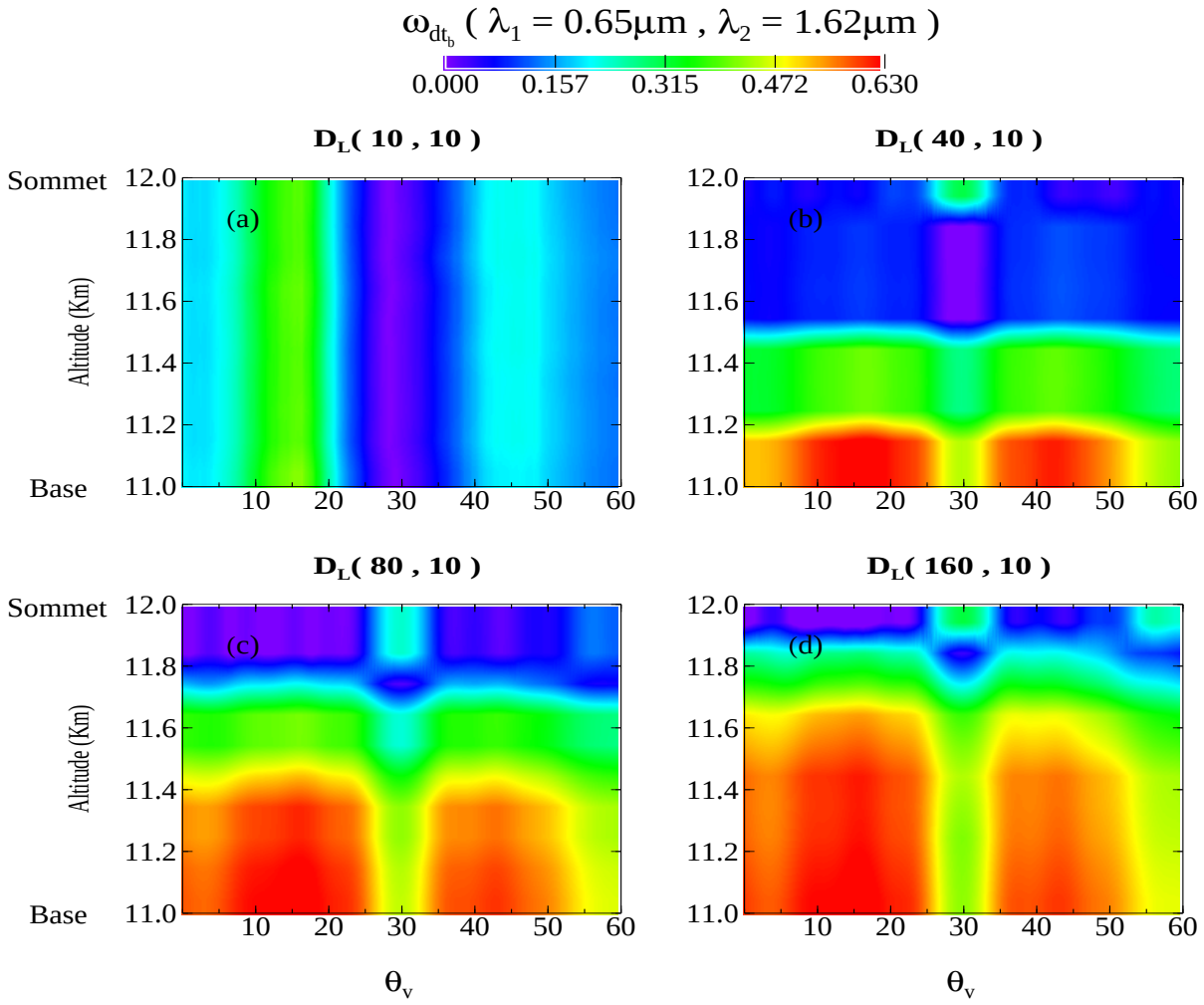
Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Variation de la fonction poids ω_{dr_b}, en fonction de l'altitude, pour différents angles de visée θ_v, avec $\lambda_1 = 0.65\,\mu m$ et $\lambda_2 = 1.62\,\mu m$:



$\Rightarrow$ Sensibilité importante de la fonction poids ω_{dr_b} aux diamètres effectifs D_e situés à la base des nuages verticalement hétérogènes.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Conclusions et Perspectives :

Problématique de départ :

- Peut-on correctement reproduire les propriétés radiatives des nuages de la haute troposphère avec un modèle de nuage verticalement homogène associé à une distribution granulométrique définie par un diamètre effectif D_e ?

.

Approche générale adoptée :

- Développement d'un modèle de nuage verticalement hétérogène.
- Répartition verticale des distributions granulométriques des cristaux représentée par une fonction linéaire D_L.

.

Conclusion partielle :

- Pour un modèle de nuage verticalement hétérogène, ***il n'existe pas*** quels que soient la longueur d'onde λ, l'épaisseur optique totale τ_{ic} ou l'angle de visée, un modèle de nuage verticalement homogène (1 D_e) avec les mêmes propriétés radiatives.
- $\Rightarrow$ Nouvelle problématique :
  - Combien de diamètres effectifs D_e au minimum faut-il pour correctement reproduire les propriétés radiatives du nuage ?
  - Comment retrouver ces D_e ?

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Conclusions et Perspectives :

Développements importants :

.

- Construction de fonction poids basée sur une longueur d'onde λ :

  .

  $\Rightarrow$ Conclusion : la réflectance bidirectionnelle à différents angles de visée (θ_v, ϕ_v) donne une information sur les diamètres effectifs D_e au ***sommet du nuage***.

  .

- Construction de fonction poids basée sur deux longueurs d'onde (λ_1, λ_2) : dans le visible et proche infrarouge.

  .

  $\Rightarrow$ Conclusion : la différence de réflectances bidirectionnelles donne une information sur les diamètres effectifs D_e à la ***base du nuage***.

  .

- Développement de fonction poids basée sur deux longueurs d'onde (λ_1, λ_2) dans l'infrarouge thermique.

  .

  $\Rightarrow$ Conclusion : la différence de températures de brillance donne une information sur les diamètres effectifs D_e au ***sommet du nuage***.

.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

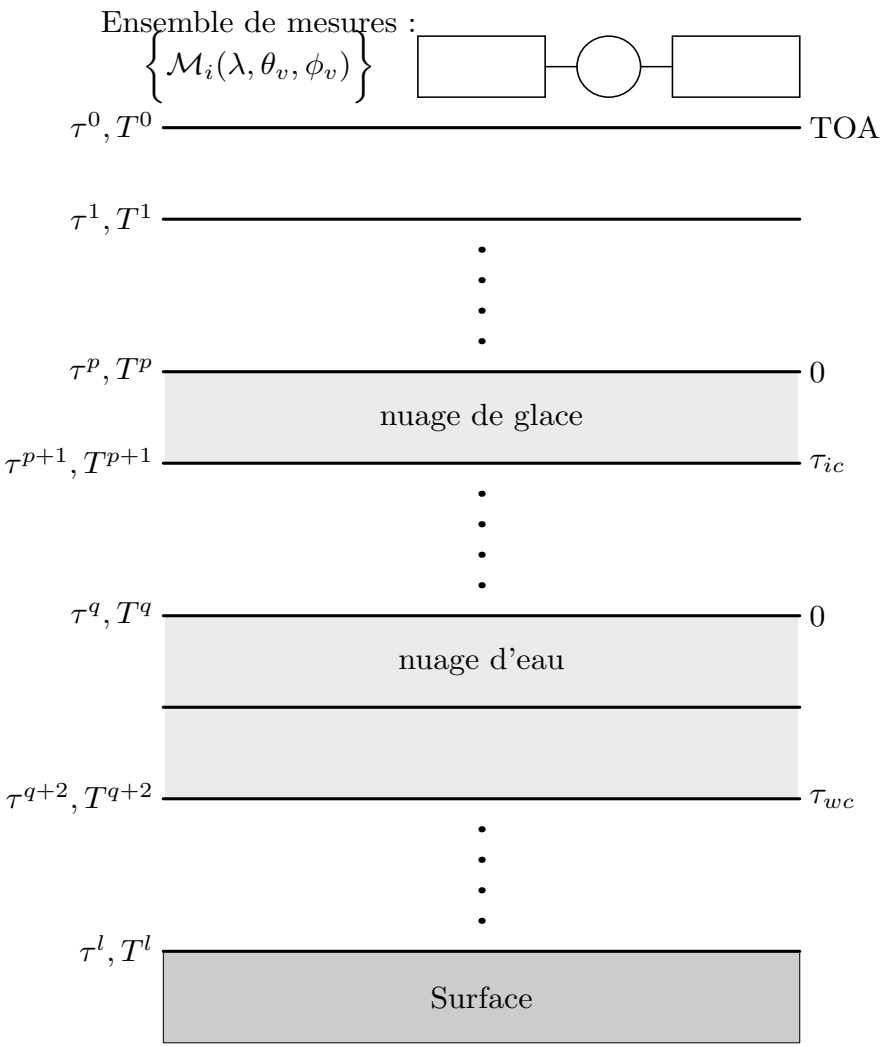
Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Conclusions et Perspectives :

Perspectives : continuation de cette étude dans le cadre du PostDoc.



- Confronter des mesures avec des réflectances bidirectionnelles et des températures de brillance simulées à partir d'un modèle de nuage verticalement hétérogène.

  .

  $\Rightarrow$ But : évaluer si on arrive à être cohérent sur l'ensemble du spectre avec un modèle de nuage intégrant la variabilité verticale des distributions granulométriques des cristaux.

  .

- Etendre cette étude au cas des nuages d'eau et au cas des multicouches.

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Merci de votre attention

Plan

Contexte Général

Objectifs de la thèse

Propriétés Optiques
Définitions
Problématique
Stratégie
Résulats
Conclusions

Propriétés Radiatives
Problématique
Développement du modèle de nuage
Etudes de sensibilité
Conclusions

Questions

Entre :

Ce que je pense
Ce que je veux dire
Ce que je crois dire
Ce que je dis
Ce que vous avez envie d'entendre
Ce que vous croyez entendre
Ce que vous entendez
Ce que vous avez envie de comprendre
Ce que vous croyez comprendre
Ce que vous comprenez

Il y a dix possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer.
Mais essayons quand même*...

* Exrait du livre : "L'encyclopédie du savoir relatif et absolu" de Bernard Werber.