

## Bilan radiatif d'échantillons de neige

Richard Malgat

Liris

21 juin 2012

# Plan

- Le projet Digital Snow
- Les équations du lanceur de photons
- Mise en œuvre
- Résultats : albedo, absorption, BRDF
- Résultats : forme des grains
- Conclusion, remerciements

## But du projet Digital Snow :

produire des outils pour étudier la métamorphose de la neige à partir d'images 3D hautes résolutions recueillies par tomographie ⇒ prédiction des risques d'avalanches par exemple.

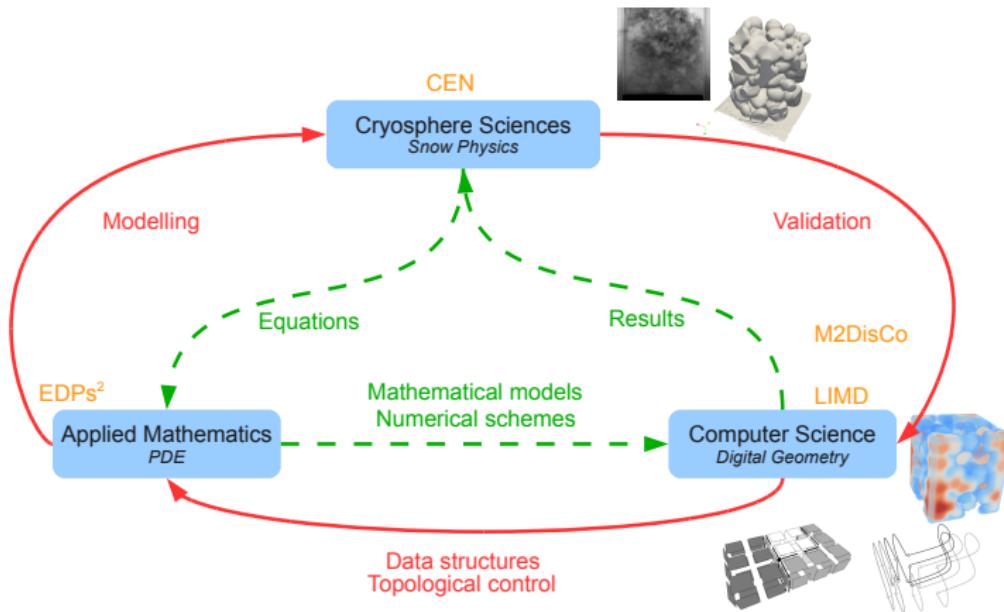
## Trois laboratoires impliqués :

- Centre d'Étude de la Neige (Météo France) basé à Grenoble ⇒ côté Physique
- laboratoire de mathématiques de l'université de Savoie (LAMA)
- LIRIS à Lyon pour la partie synthèse d'image et géométrie discrète

Trois questions essentielles au projet :

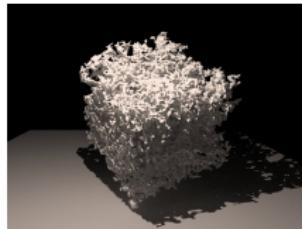
- Comment modéliser la métamorphose de la neige (dûes aux gradients thermiques ou en isothermie) à partir d'équations physiques et de comportements expérimentaux observés ?
- Comment gérer des images hautes résolutions ( $2048^3$ ) pour en tirer des mesures fiables ?
- Comment mixer les 2 points précédents afin d'implémenter des déformations physiques dans de telles images 3D ?

## Schéma des relations entre laboratoires :

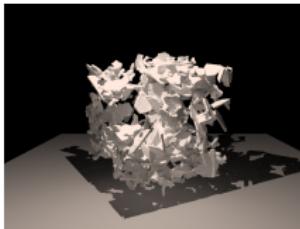


**Le Stage : bilan radiatif d'échantillons de neige :** étude de l'énergie réfléchie et absorbée par la neige, afin de donner des paramètres en entrée des modèles (gradient de température par exemple).

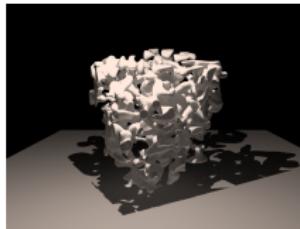
Les données brutes : une matrice de voxels Air / Glace subissant une triangulation de l'interface :



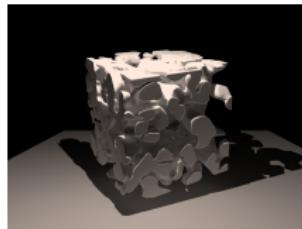
(a) échantillon de surface



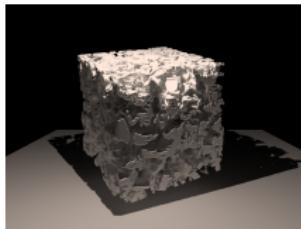
(b) échantillon PP



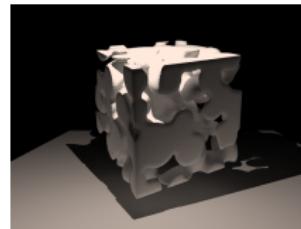
(c) échantillon DF



(d) échantillon RG



(e) échantillon DH

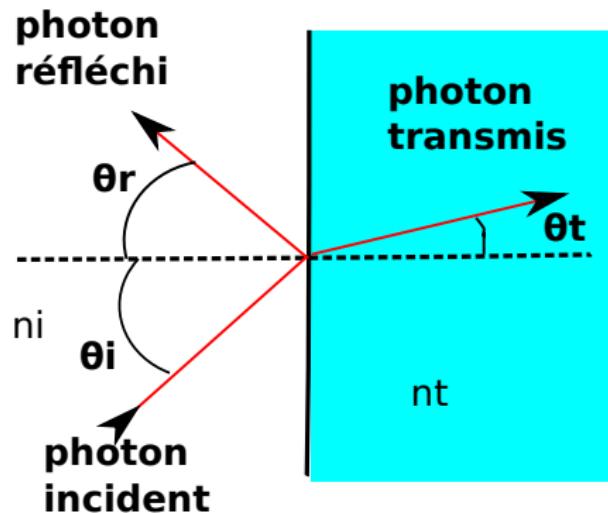


(f) échantillon MF

Le **but**  $\Rightarrow$  estimer l'albedo ainsi que l'énergie absorbée par l'échantillon en fonction de la profondeur.

Le **moyen**  $\Rightarrow$  envoyer des photons sur l'échantillon et mesurer leur absorption par le logiciel pbrt [PG10].

Les équations de [KHP07] : celles de l'optique géométrique. Les valeurs physiques sont données par [War08].



Les directions sont données par :

$$\theta_i = \theta_r$$

$$n_i \theta_i = n_t \theta_t \text{ si } \theta_i < \theta_c$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_t}{n_i}\right)$$

La radiance est

$$I(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \frac{d\Phi(\theta_i, \phi_i, \lambda)}{dw dA^*}$$

où  $\Phi(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  représente le flux (ou puissance) provenant de la direction  $\theta_i, \phi_i$  à la longueur d'onde  $\lambda$ ,  $dw$  représente l'angle solide et  $dA^*$  représente l'aire projetée de  $dA$  sur une surface perpendiculaire à  $w$ .

La radiance à l'interface est donnée par les lois de Fresnel :

$$I_r(\theta_r, \phi_r, \lambda) = I_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) * \frac{1}{2} * \left( \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right) \text{ si } \theta_i < \theta_c$$

$$I_r(\theta_r, \phi_r, \lambda) = I_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \text{ si } \theta_i > \theta_c$$

et la radiance en incidence normale est :

$$I_r(0, 0, \lambda) = I_i(0, 0, \lambda) * \frac{(n_i - n_t)^2}{(n_i + n_t)^2}$$

La radiance transmise est :

$$I_t(\theta_t, \phi_t, \lambda) = (I_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) - I_r(\theta_r, \phi_r, \lambda)) * \frac{n_t^2}{n_i^2}$$

Atténuation par la neige : lorsqu'un photon traverse la neige il est absorbé suivant la loi de Beer :

$$I(t + \Delta t) = I(t)e^{-k*L}$$

où k est le coefficient d'absorption pour la longueur d'onde considérée.

nous étudierons principalement trois grandeurs :

L'**albedo** (noté  $\alpha$ ) : pourcentage d'énergie réfléchie.

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}$$

L'**absorption** : pourcentage d'énergie absorbée.  $absorption = 1 - albedo$ .

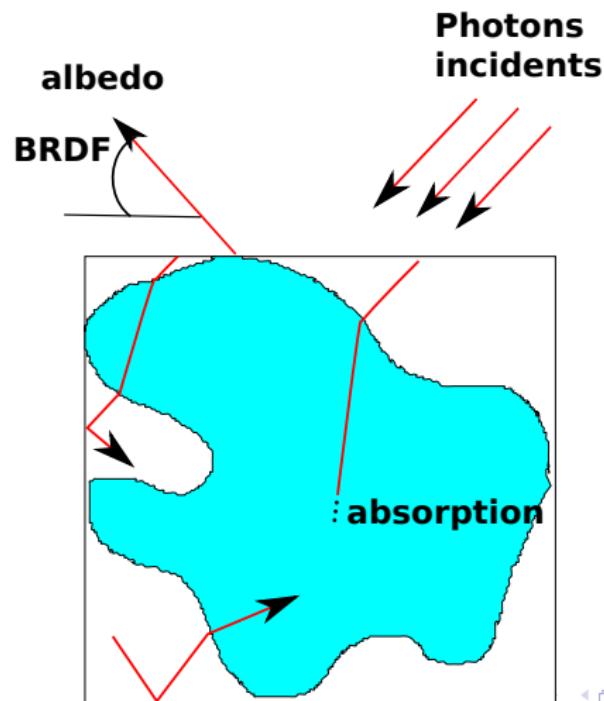
La **Bidirectional Reflectance Distribution Function** (BRDF) et ses dérivées :

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t, \lambda) = \frac{I(\theta_t, \phi_t, \lambda)}{\Phi(\theta_i, \phi_i, \lambda)}$$

L'anisotropic reflectance factor (noté  $R$ ) :

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t, \lambda) = \frac{\Pi \times BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_t, \phi_t, \lambda)}{\alpha(\lambda)}$$

avec  $\alpha$  l'albedo. Le **Directional Conical Reflectance Factor** (DCRF) : c'est R intégré sur des valeurs d'élévation et d'azimuth.



## Mise en œuvre

Le logiciel PBRT possède un lanceur de photons mais :

- Utilise d'autres grandeurs physiques que la radiance
- Ne gère pas l'absorption sur des formes quelconques
- Est optimisé pour le rendu d'image et non pour la physique pure

Pour les images, nous utilisons la version originale du logiciel. Pour le lanceur de photons, nous ne générerons aucune image (temps de calcul prohibitif).

Les fonctions **DGtal** : pour transformer notre matrice de voxels air / glace en une surface triangulée avec des normales fines.

Impact de la qualité des normales : moyenne sur 5 à 10 points autour du point considéré.

Impact d'un sous-échantillonnage brutal : division par 2 dans chaque direction impacte faiblement le résultat.

Points importants car les images  $512^3$  font entre 300 et 600 Mo, les temps de calcul pour la transformation d'images et le rendu d'images peut prendre plusieurs heures (machine 2 cœurs de 3 GHz et 4 Giga de mémoire vive).

## En pratique :

Duplication de l'échantillon avec conditions aux bords de symétrie miroir pour garder la continuité de la matière.

Suivi d'un photon de manière probabiliste : calcul du ratio de radiance réfléchie sur la radiance incidente :

$\frac{I_r}{I_i}$ , on choisit un nombre aléatoire entre 0 et 1 et si ce nombre est supérieure à la quantité estimée, le photon est transmis. Sinon il est réfracté.

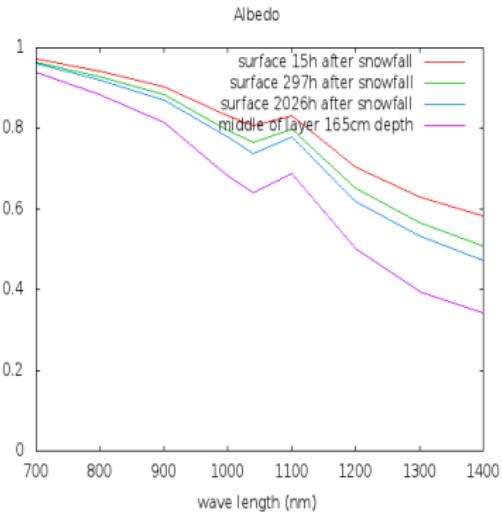
Pour l'absorption, de même la probabilité d'absorption dans le volume est proportionnelle à  $1 - \frac{I(t + \Delta t)}{I(t)}$ .

## Résultats

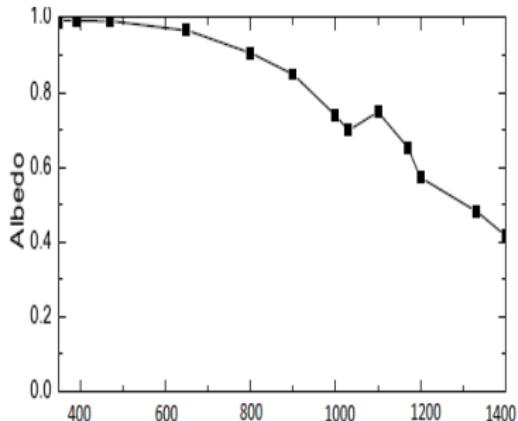
Les premières simulations tendaient à retrouver les résultats de [KHP07], constituant une bonne série de tests pour notre lanceur de photons en terme :

- D'albedo
- D'absorption
- De BRDF

[KHP07] utilisent presque uniquement des maillages numériques purs (non tirées d'images d'échantillons), avec des conditions périodiques, une profondeur finie et des grains uniquement sphériques ou cylindriques. Notre lanceur de photons est bien plus flexible, car il travaille sur tous types d'images.



(a) albedo par pbrt



(b) albedo par tomo de Kaempfer

Figure: comparaison de l'albedo par images tomographiques

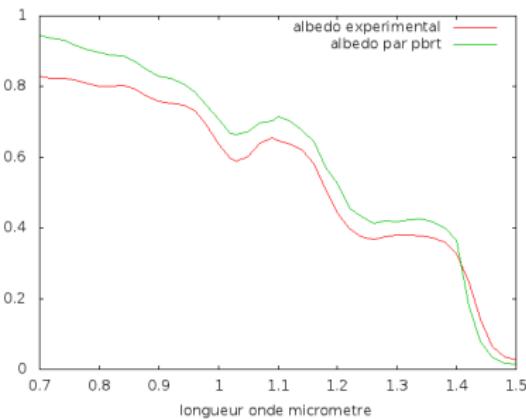
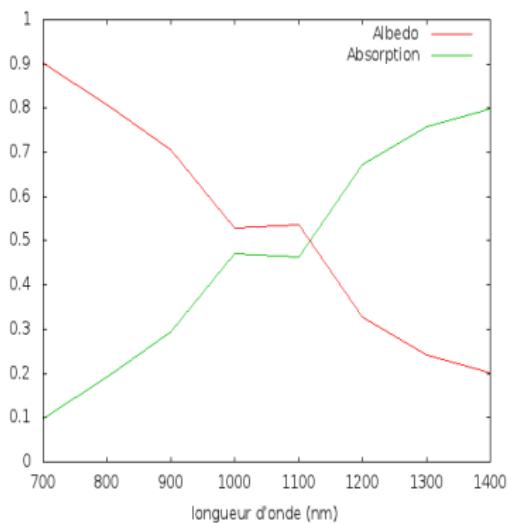
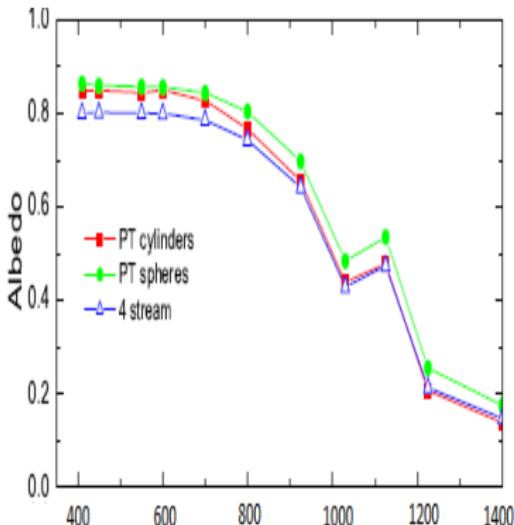


Figure: albedo angle d'élévation incident de 30 degrés

La comparaison avec les courbes expérimentales montre une légère surestimation de l'albedo pour les faibles longueurs d'onde probablement dûe à la perte de photons par les côtés et le fond dans le cas expérimental.



(a) albedo par pbrt



(b) albedo numérique de Kaempfer

**Figure:** comparaison de l'albedo échantillons numériques purs

Plus on attend avant de récolter l'échantillon, et plus on prend l'échantillon profondément dans la couche de neige, plus l'albedo diminue.

**Pourquoi une telle différence quantitative des mesures entre des échantillons ?**

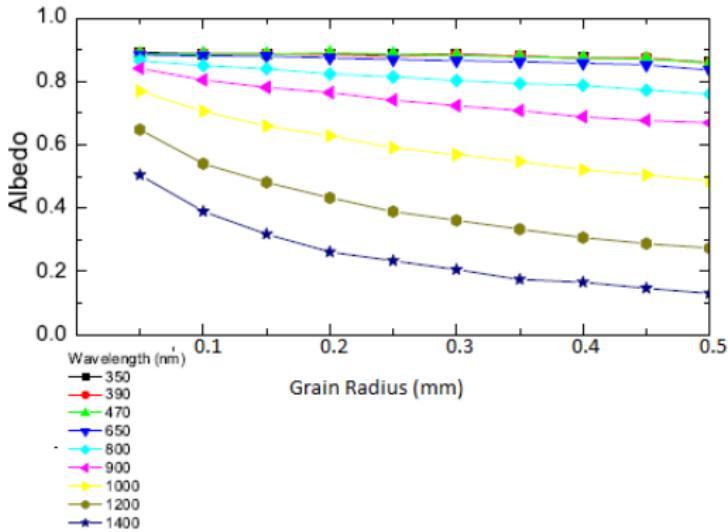
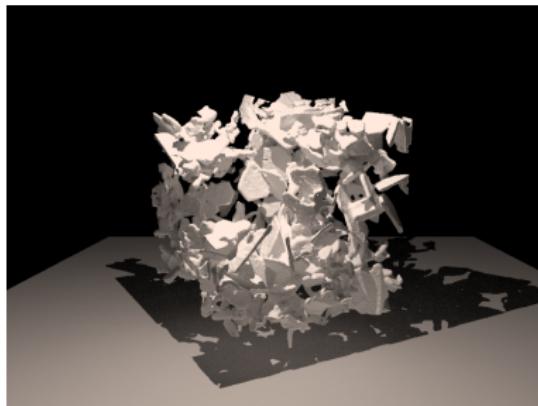
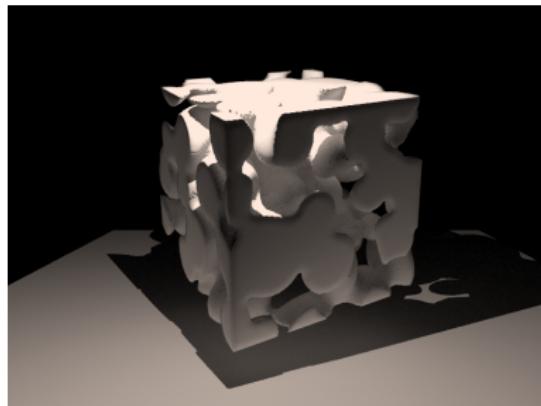


Figure: albedo pour différentes tailles de grains

L'albedo varie en fonction de la taille des grains!



(a) échantillon PP de surface



(b) échantillon MF

Figure: Images d'échantillons

quantifier la taille des grains : le rayon de la plus grosse boule contenant le point, contenue dans la forme, l'épaisseur moyenne est la moyenne de ces valeurs.

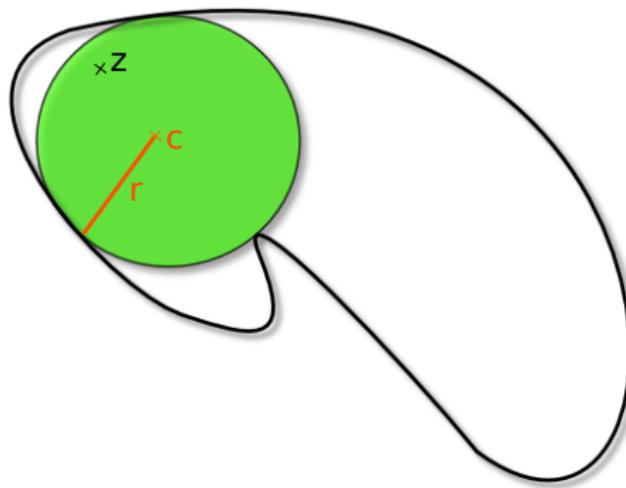
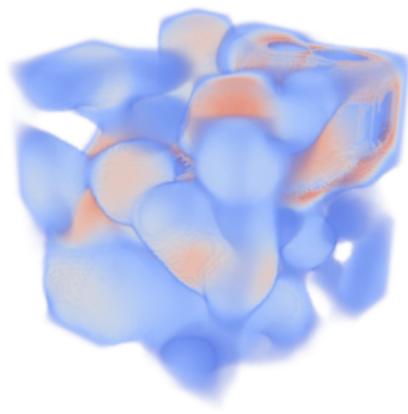
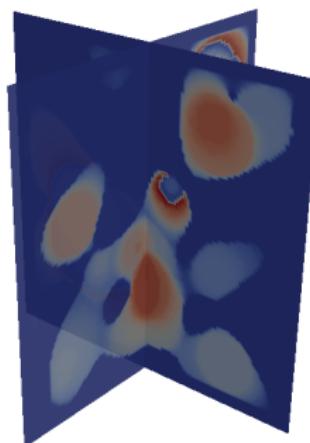


Figure: une forme où l'on calcule une épaisseur locale



(a) rayon local en 3D



(b) rendu du rayon local en 2D

**Figure:** exemple de calcul de rayon local

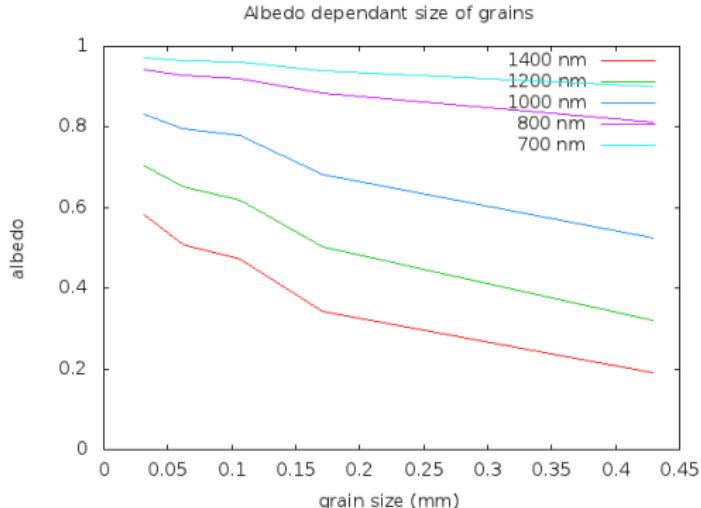


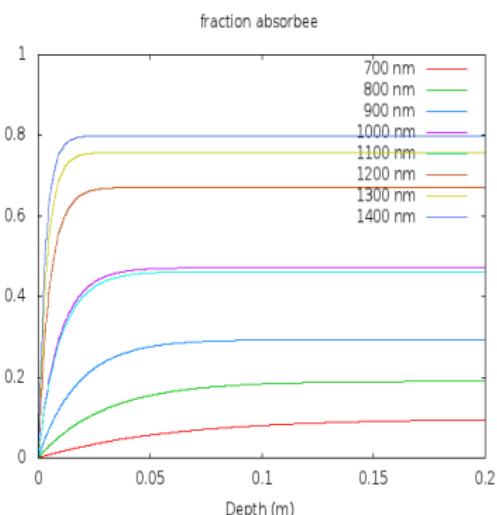
Figure: albedo en fonction du rayon des grains

La plupart des modèles proposés jusqu'à présent reflétaient plus une neige intérieure au manteau et avec des grains relativement gros

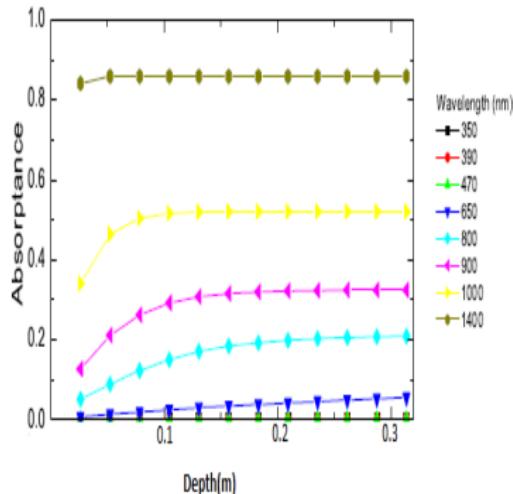
## Absorption

$$absorption = 1 - albedo$$

La discussion sur l'albedo peut donc être reprise ici.



(a) absorption donnée par pbrt

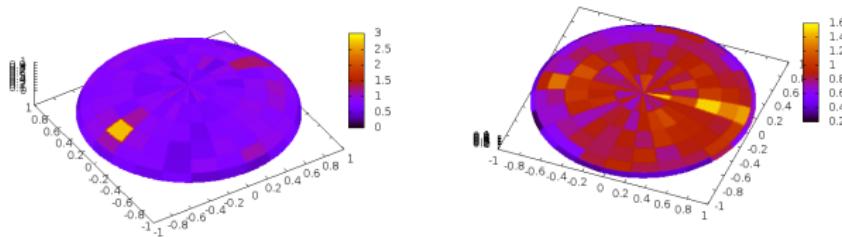


(b) absorption de Kaempfer et al.

Figure: Absorption fonction de la profondeur

## DCRF

DCRF longueur onde 1400 nm

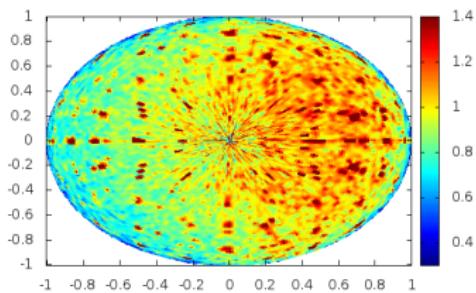


(a) DCRF échantillon intérieur (b) DCRF échantillon de surface

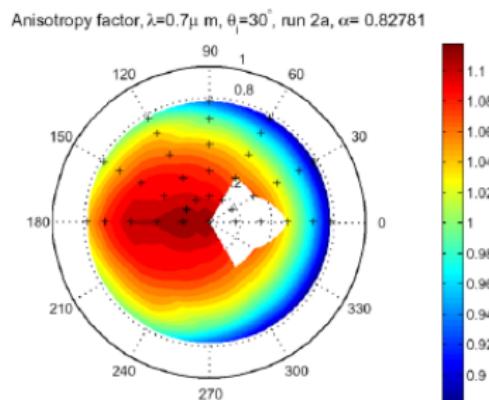
**Figure:** DCRF à 1400 nm avec un angle incident de 60 degrés

la majorité des photons sont renvoyés suivant la première réflexion avec l'échantillon de neige.

## Comparaison des résultats du lanceur de photon et des relevés expérimentaux de Météo France :

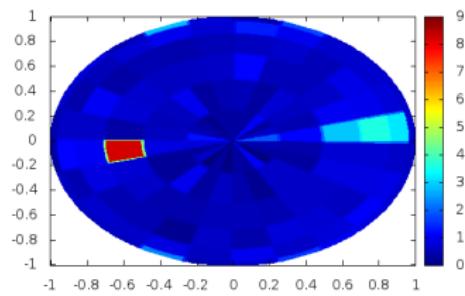


(a) DCRF à 700 nm par photon tracking

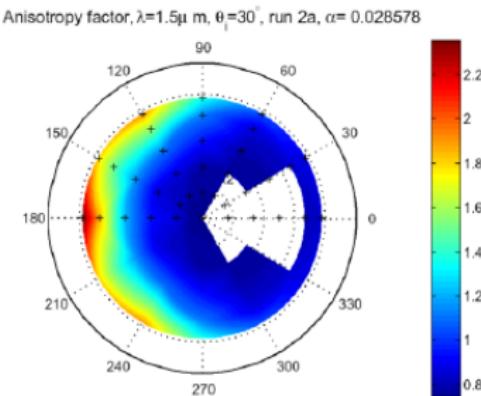


(b) facteur d'anisotropie à 700 nm expérimental

Figure: DCRF à 700 nm avec un angle d'élévation de 30 degrés



(a) DCRF à 1500 nm par photon tracking



(b) facteur d'anisotropie à 1500 nm expérimental

**Figure:** DCRF à 1500 nm avec un angle d'élévation de 30 degrés

## Nombre optimal de photons

20000 photons pour l'albedo et 100000 pour la DCRF.

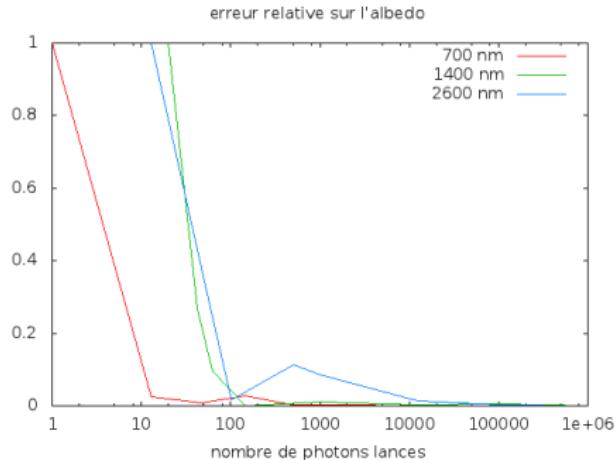


Figure: erreur relative en fonction du nombre de photons lancés

**Quantification de la forme des grains** qui a un fort impact sur l'albedo a été assez peu étudié jusqu'à présent.

Utilisation des données précises de Météo France en terme de rayon moyen de grain et de Specific Surface Area (SSA) .

La SSA est le ratio de la surface totale de contact air/glace par unité de masse. Elle est reliée au diamètre moyen des grains par la formule :

$$SSA = \frac{6}{\rho_{ice} d}$$

modèle analytique de [KZ04].

L'équation liant albedo et diamètre moyen est :

$$d = \frac{49 \times \ln(\alpha)^2}{9 \times b^2 \gamma (1 + \cos(\theta)^2)}$$

- ①  $d$  est le diamètre moyen,
- ②  $\alpha$  l'albedo,
- ③  $b$  est le facteur de forme,
- ④  $\theta$  est l'angle d'élévation,
- ⑤  $\gamma = \frac{4 \times \prod n_i}{\lambda}$  avec  $\lambda$  la longueur d'onde considérée et  $n_i$  le coefficient d'absorption

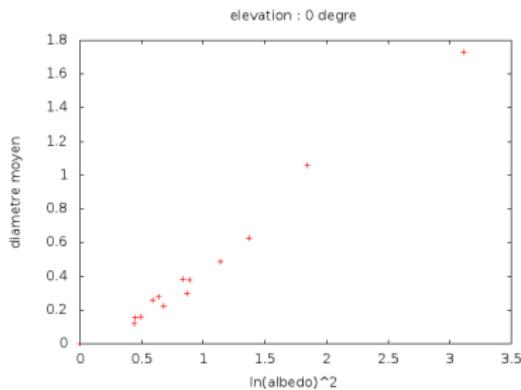
Si nous nous plaçons alors dans les conditions suivantes :

- Soleil au nadir ( $\theta = 0$ ),
- longueur d'onde 1310 nm.

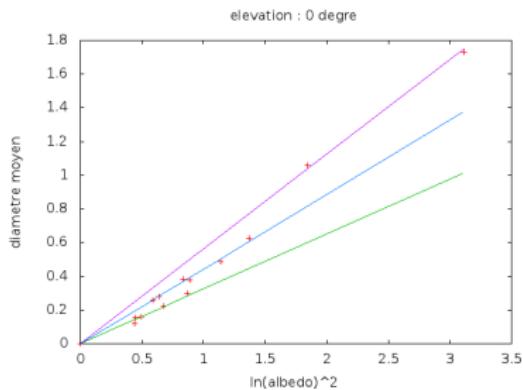
Mêmes conditions que [PADF09] :

$$d = \frac{49 \times \ln(\alpha)^2}{81 \times b^2 \gamma}$$

avec  $\gamma \cong 125.66$ .



(a) diamètre fonction de  $\ln(\alpha)^2$



(b) 3 droites sont optimales

Figure: diamètre fonction de  $\ln(\alpha)^2$

- la droite la plus basse : échantillons de surface, PP ou DF, prélevés au plus 12 jours après la chute de neige.
- Seconde droite : échantillons DF, RG ou DH, prélevés soit en surface après plus d'un mois après la chute de neige, ou prélevés dans l'intérieur du manteau neigeux, entre 40 et 165cm de profondeur.
- Échantillons MF provenant d'une neige saturée en eau prélevés dans l'intérieur du manteau neigeux.
- Une exception : facteur d'anisotropie SSA faible, donc échantillon allongé verticalement.

	Picard	Kokhanovsky
sphères non jointives	4.44	4.53
sphères aléatoires	4.07	
cube	3.39	
cylindre	3.67	
DH	3.16	
Cube (ratio d'aspect 4)	4.5	
cylindres longs (ratio d'aspect 4)	4.83	
fractals tétraédriques		3.62

## Nos résultats :

- ① 3.95 : sphères aléatoires et des cylindres longs
- ② 3.30 : échantillons cubiques
- ③ 2.95 : valeur du paramètre de forme des MF inférieure même à ceux de DH

Autre résultat sur la forme : Les échantillons allongés suivant une direction :

Le **facteur d'elongation** des grains de neige donné par le facteur d'anisotropie SSA, qui jouerait un rôle important sur l'albedo ne serait effectif que si l'elongation se fait dans le sens **vertical**.

## Conclusion

Par un procédé de photon tracking, nous avons obtenu des résultats sur le bilan radiatif d'échantillon de neige **conforme** aux résultats de la littérature.

Nous avons pu **étendre les résultats** tirés jusqu'à présent de modèles numériques à des images tomographiques représentant plus précisément de réels échantillons de neige.

Quelques **résultats annexes** à confirmer ont été entrevus comme l'impact de l'elongation des grains dans le sens vertical.

**Remerciements** : à David Cœurjolly et Jean-Claude lehl pour m'avoir chaleureusement accueilli au LIRIS, ainsi qu'à l'équipe du Centre d'Étude de la Neige de Grenoble, notamment F. Flin et M. Dumont pour leurs conseils et relectures et B. Lesaffre pour les images.

-  Kaempfer, Hopkins, and Perovich.  
A 3d microstructure based photon tracking model of radiative transfer in snow.  
*Journal of geophysical research.* 112, no. D24, 2007.
-  Kokhanovsky and Zege.  
Scattering optics of snow.  
*Applied Optics*, Vol. 43, Issue 7, pp. 1589-1602 (2004), 2004.
-  Picard, Arnaud, Domine, and Fily.  
Determining snow specific surface area from near-infrared reflectance measurements : Numerical study of the influence of grain shape.  
*Cold Regions Science and Technology* 56 (2009) 10–17, 2009.
-  Matt Pharr and Humphreys Greg.  
*Physically Based Rendering (pbrt v2)*.  
2010.