

Micro-mécanique de la neige

Jacques Meyssonier, Claire Brutel-Vuilmet, Bruno Chareyre,
Félix Darve, Frédéric Flin, Luc Gillibert, Alsidqi Hasan,
Janek Kozicki, Bernard Lesaffre, Wolfgang Ludwig,
François Nicot, Jean Michel Panel, Armelle Philip, Philippe
Puglièse, Sabine Rolland du Roscoat,



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement



Laboratoire
Sols
Solides
Structures
Risques



Groupe transversal Neige-OSUG
15 Octobre 2010

Plan

Contexte et motivation

Expériences

Simulation numérique

Modélisation “micro-macro”

Conclusion

Contexte

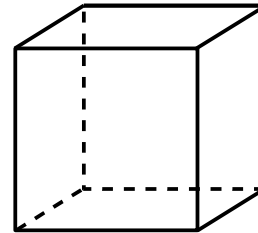


Etude limitée au régime de déformation ductile

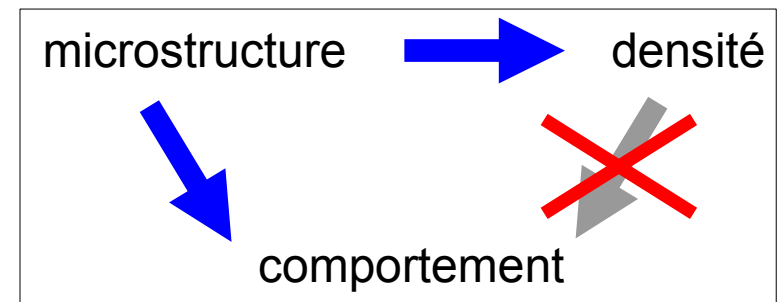
État de l'art en modélisation

Modèles “macro”

- phénoménologiques
variable interne= **densité**
- métamorphose rarement prise en compte
(variables internes)

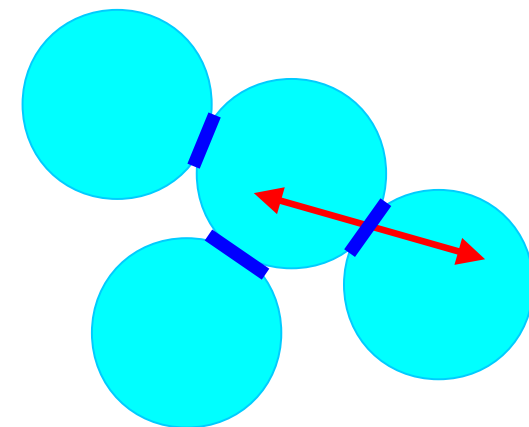


~ 100 mm / $> 10^6$ grains



Modèles “micro”

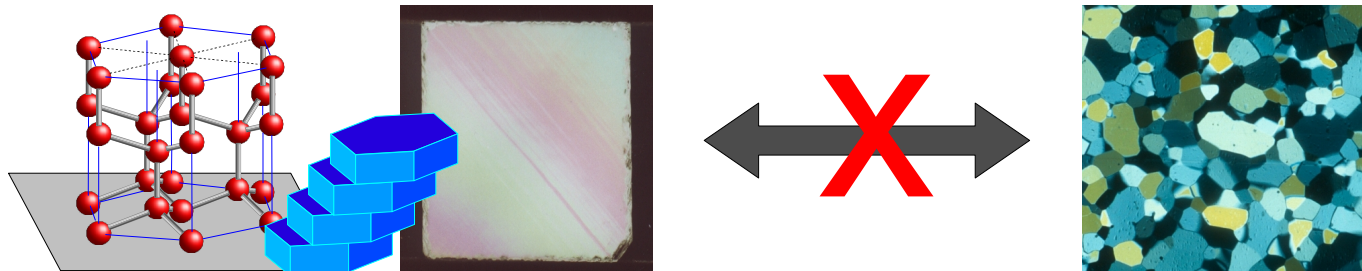
- déformation localisée aux ponts
(concentrations de contraintes)
- grains rigides: souvent
- glace déformable (grains/ponts) comme la
glace polycristalline: parfois



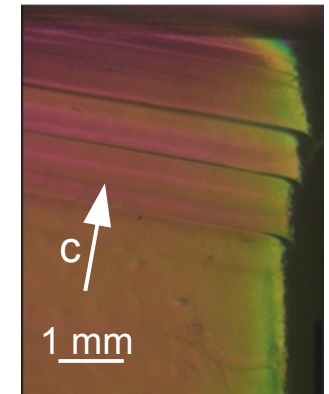
Description semblable à celle d'un matériau cimenté

Modélisation: points en suspens

Le cristal de glace ne se déforme pas comme la glace polycristalline:



- fluage par mouvement des dislocations
- les dislocations glissent essentiellement dans le plan basal
- un cristal cisailé parallèlement au plan basal se déforme au moins 1000 fois plus vite que la glace polycristalline (isotrope)
- déformation localisée dans les plans de base activés



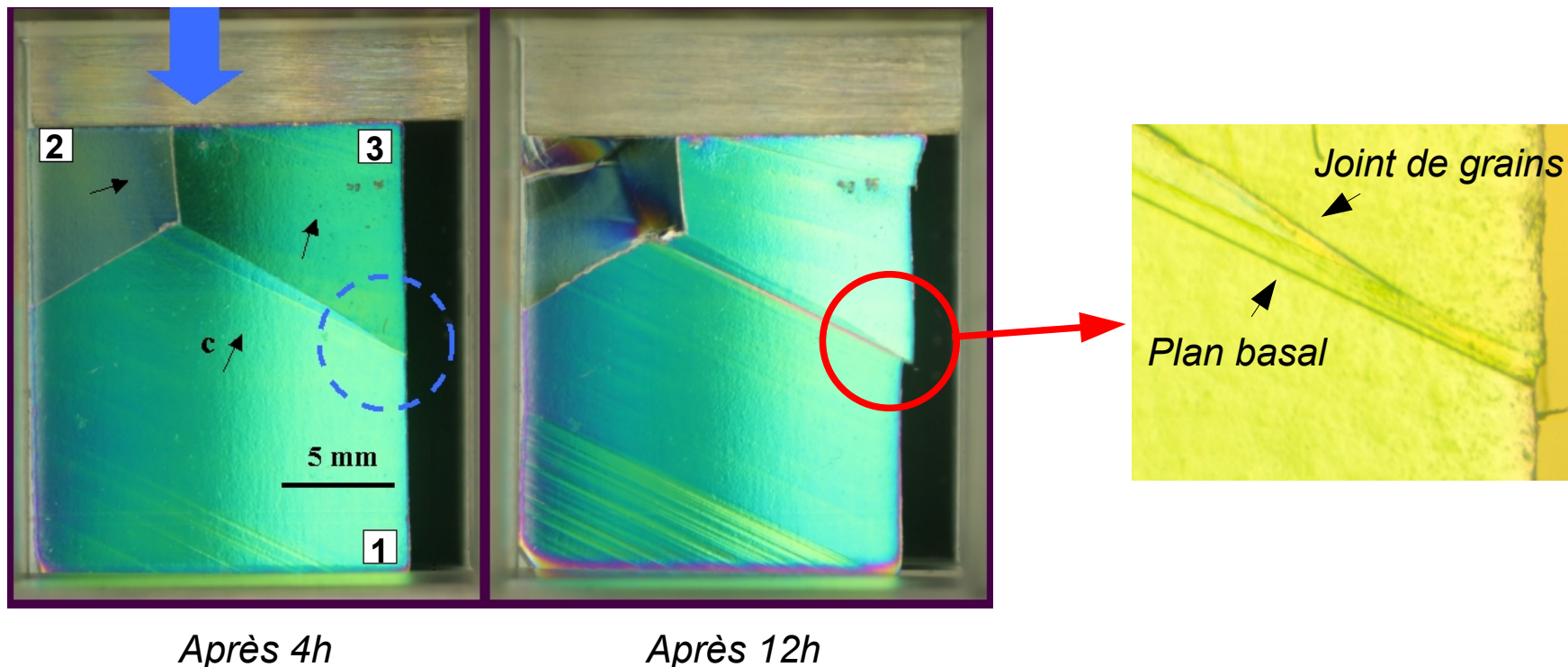
Très forte anisotropie mécanique du grain
(analogie avec un paquet de cartes à jouer)



Modélisation: points en suspens

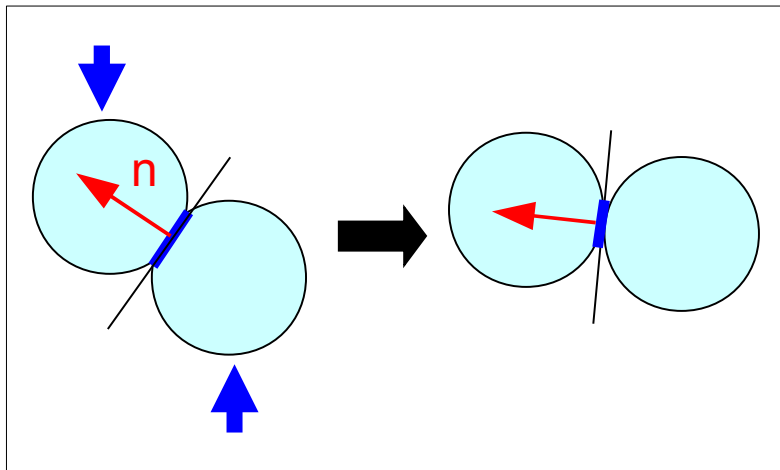
Le glissement aux joints de grains (GBS) est il un mécanisme actif ?

Compression 0.7 MPa

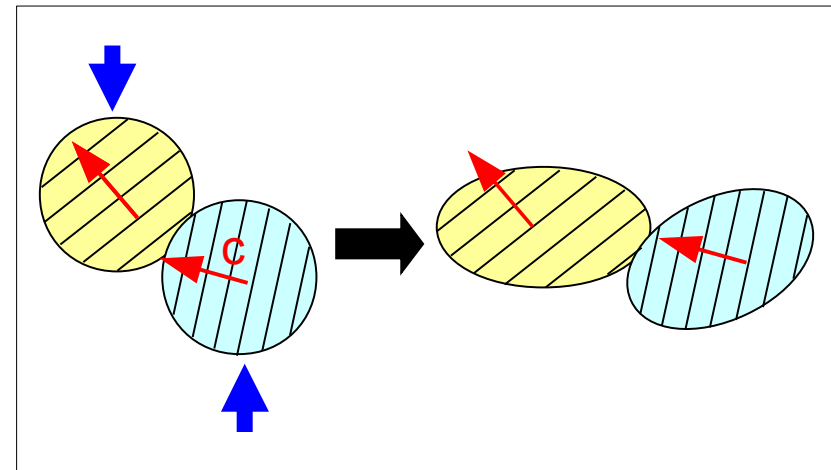


Modélisation: points en suspens

Comment tenir compte de la microstructure de la neige?



Glissement aux joints de grains :
paramètre =
orientation des contacts



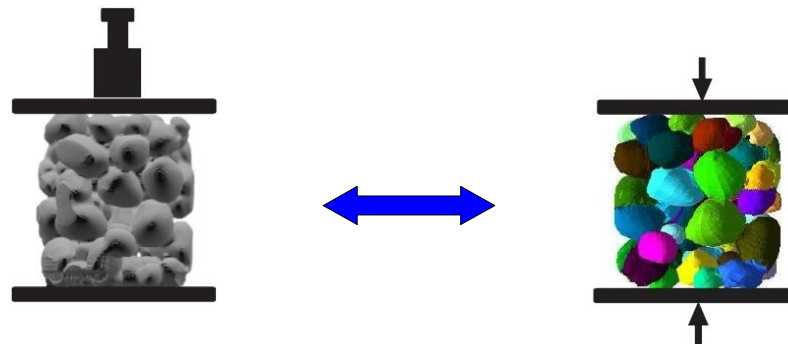
Déformation intra-granulaire :
paramètre =
orientation cristalline des grains

- Les 2 mécanismes ne sont pas équivalents
 - Le comportement mécanique du grain de neige n'est pas isotrope
- ➡ Peut on considérer la neige comme un matériau **granulaire** ? (au sens Génie-Civil !)

Objectifs

Le projet Snow-White (ANR-06-BLAN-0396)

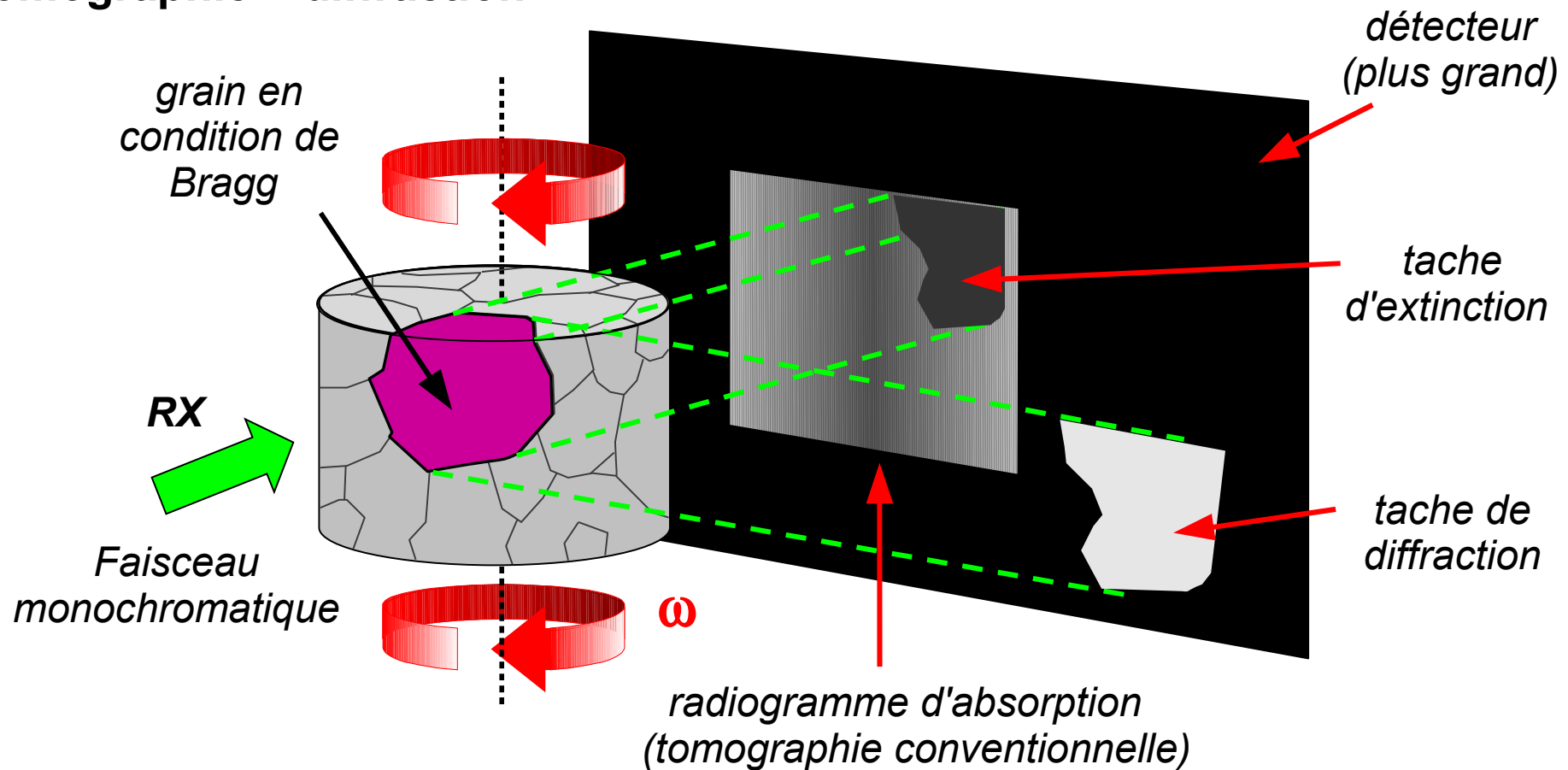
- ➔ observer les mécanismes de déformation de la neige à l'échelle du grain pour évaluer les influences relatives de la déformation **intra-granulaire** et du **glissement aux joints de grains**
- Expériences: essais de compression sous rayons X (*"in situ"*)
micro-tomographie + **orientation cristalline des grains**
- Modélisation: simulation numérique des essais



Participants: LGGE (coordination) + CEN + 3S-R + Cemagref + **ESRF**

Principe de la Diffraction Contrast Tomography (DCT)

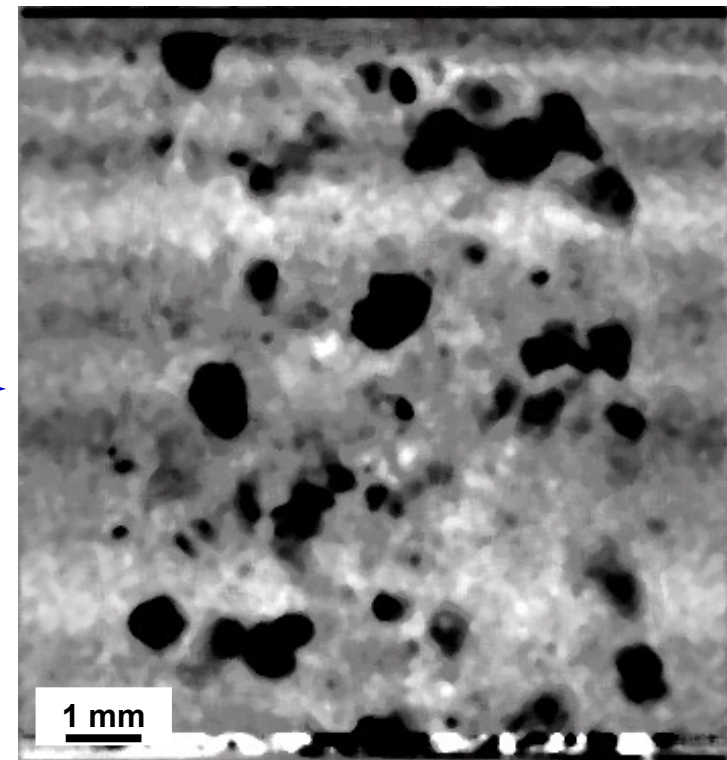
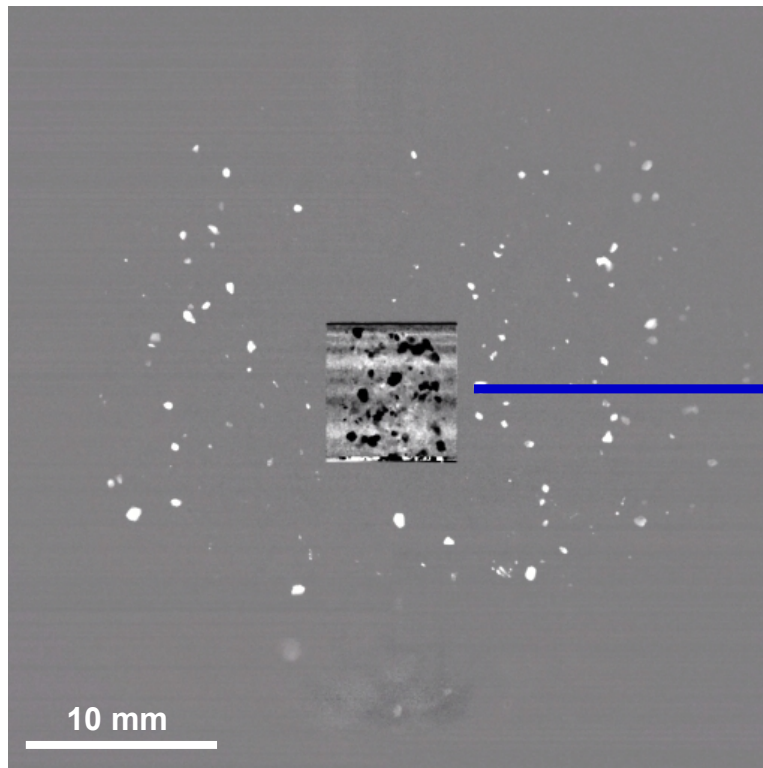
Tomographie + diffraction



• méthode développée par Wolfgang Ludwig (ESRF, Grenoble)

Principe de la DCT

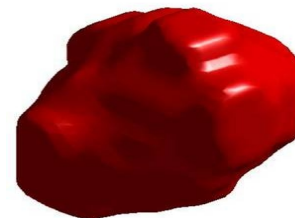
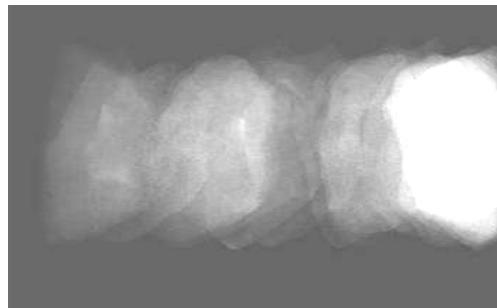
Radiogramme typique



Reconstruction DCT

Etapes principales

- scan: 7200 radiogrammes également répartis sur 360° (durée 1h)
- segmentation des taches d'absorption et de diffraction (total diffr. $\approx 20\,000$)
- correspondance des taches de diffraction et d'absorption par reconnaissance de forme $\longrightarrow$ environ 50 taches de diffraction par grain
- détection des “Friedel pairs” : taches du même plan en positions ω et $\omega + \pi$
- pour chaque “Friedel pair” : 1 vecteur diffraction $\mathbf{g}$ + angle de Bragg
- test de cohérence : les vecteurs $\mathbf{g}$ doivent correspondre à la glace Ih !
- calcul de la position du grain diffractant (d'orientation connue) dans l'échantillon
- reconstruction de la forme des grains à partir des taches de diffraction



Reconstruction DCT

Resultat: image 3D

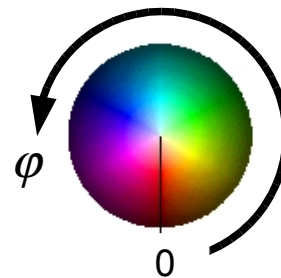
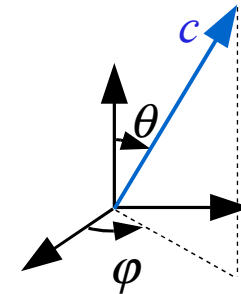
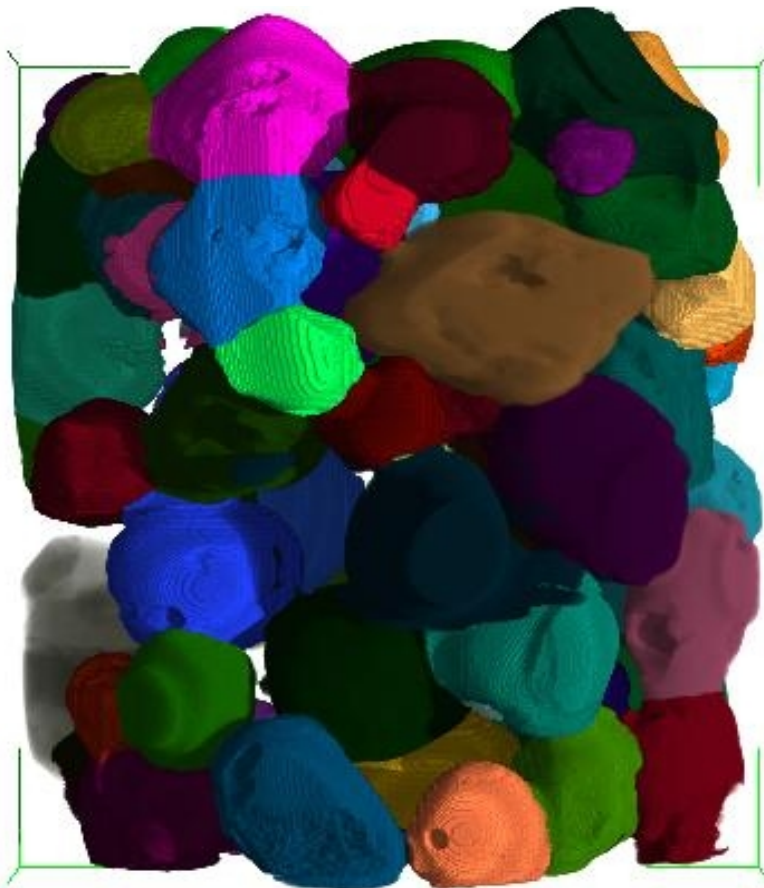
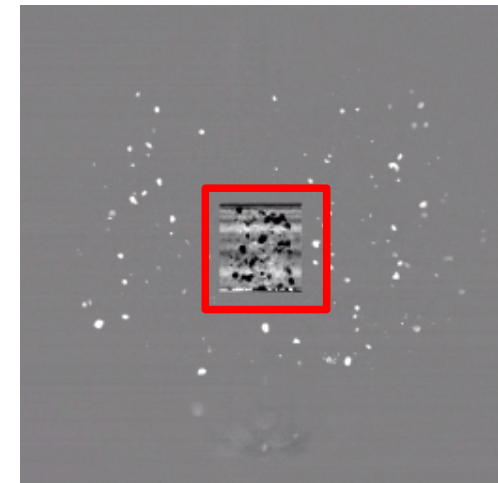


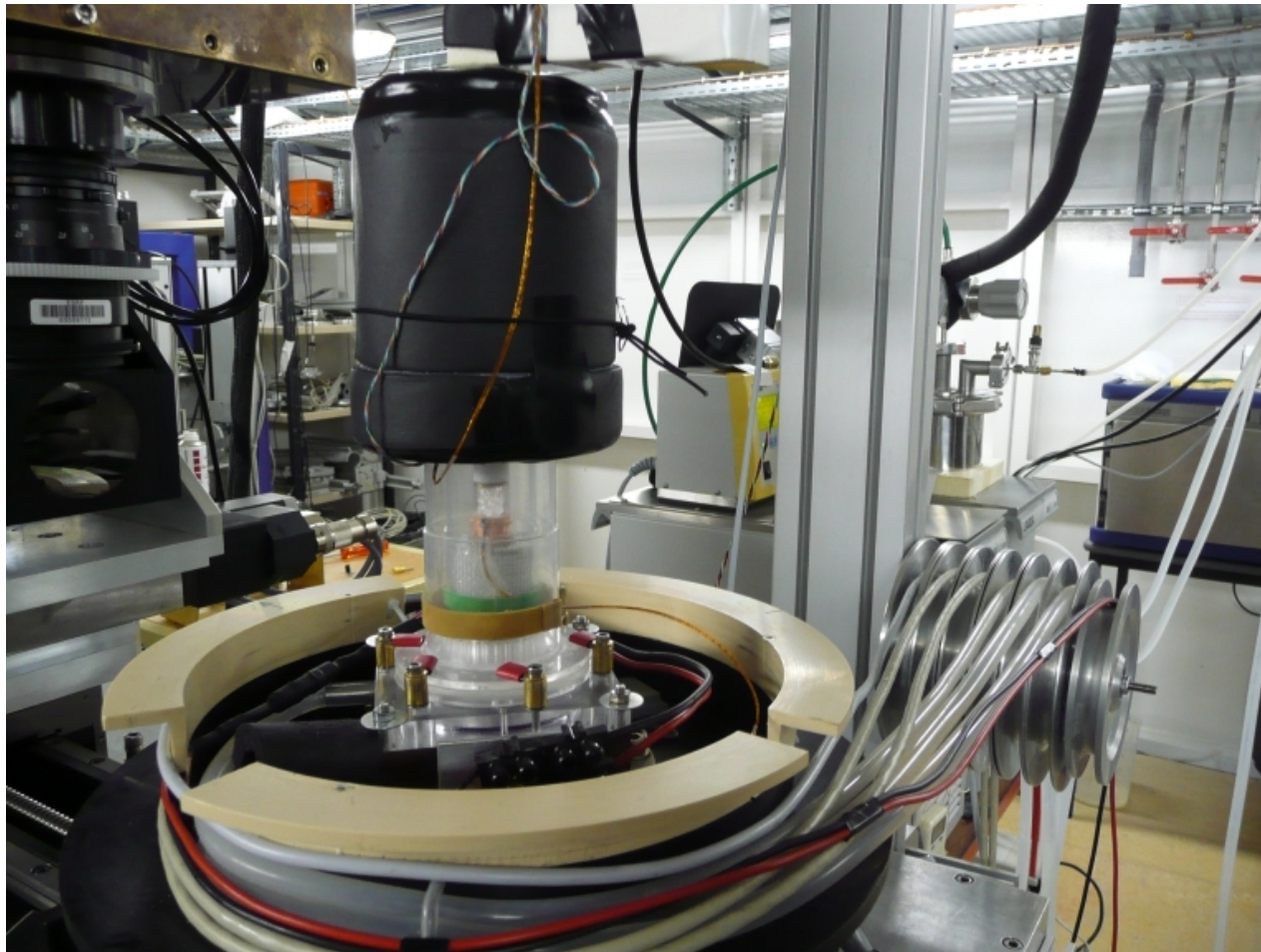
image $\approx 500 \times 500 \times 500$ voxels



Detecteur $40 \times 40 \text{ mm}^2$
CCD 2048×2048 pixels
→ résolution $20\mu\text{m}$

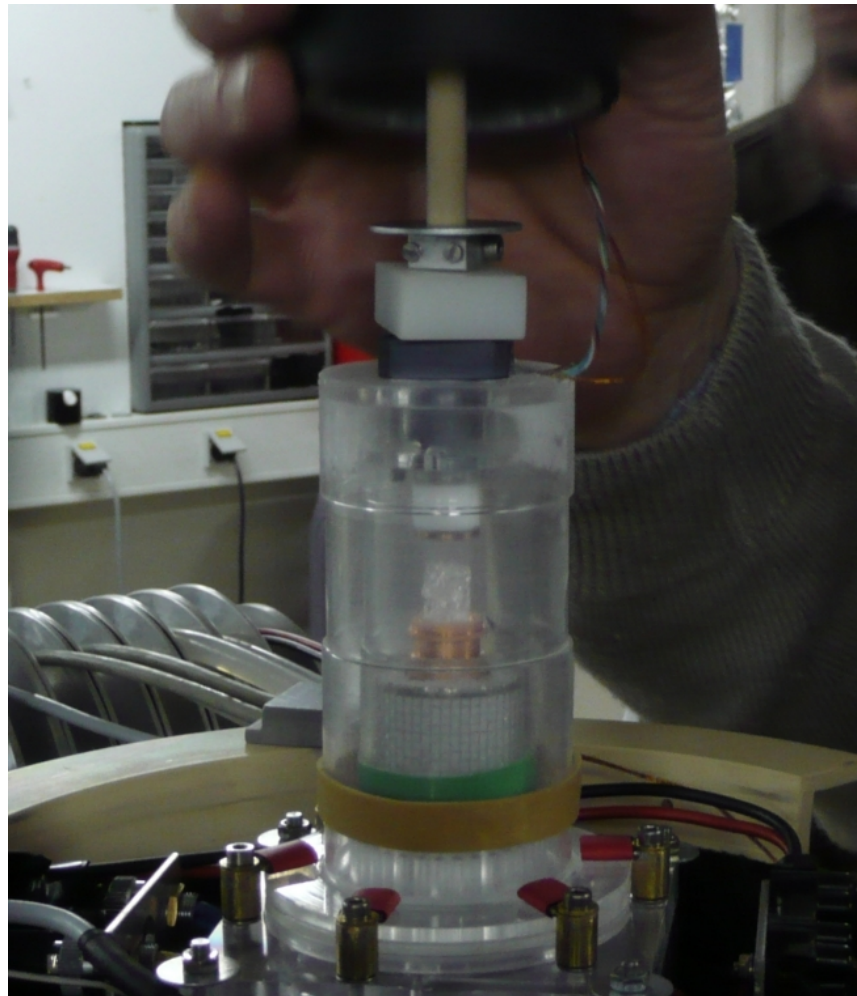
Dispositif expérimental

Environnement de l'échantillon



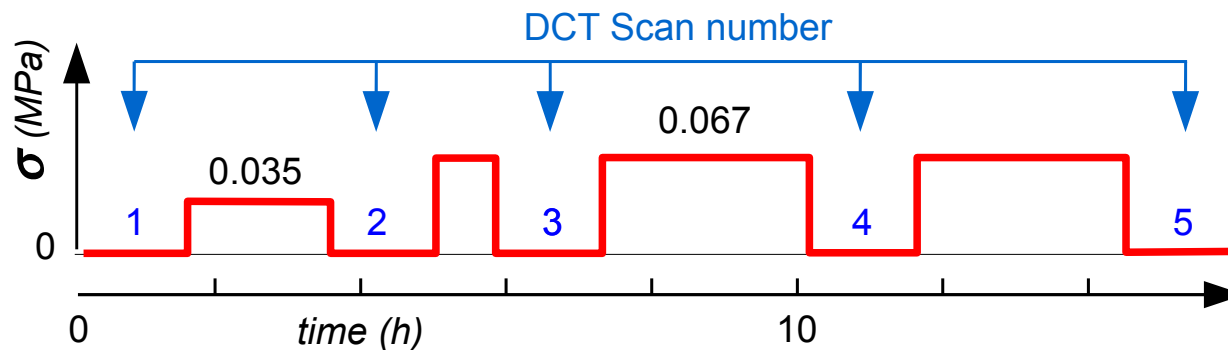
Dispositif expérimental

Mise en charge

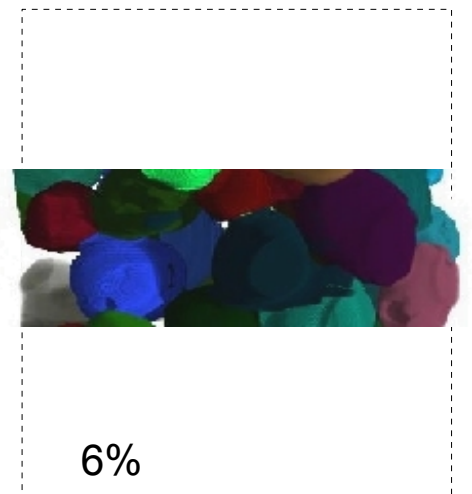
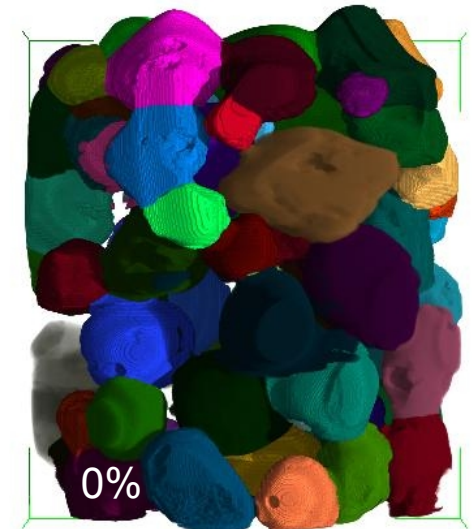


Essai de compression

Protocole de chargement



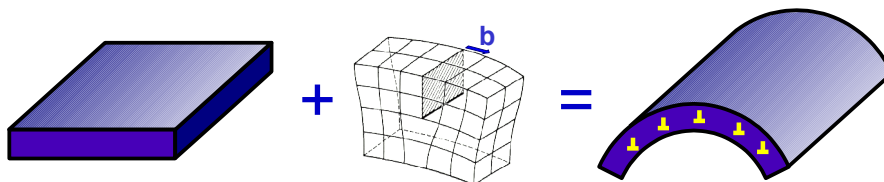
- à cause de la longue durée de chaque scan DCT il est nécessaire de décharger l'échantillon avant (et pendant) le scan
- la DCT devient de plus en plus difficile à analyser au fur et à mesure que la déformation augmente



Essai de compression

Evidence de déformation intra-granulaire

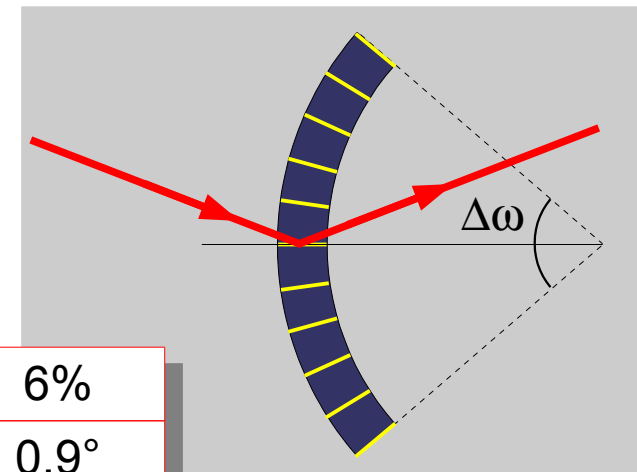
- **mosaïcité** (**distorsion** de réseau): intervalle de ω sur lequel s'étale une tache de diffraction (reste visible)



les structures hétérogènes de dislocations induisent une distorsion du réseau cristallin

pour obtenir une tache complète en lumière monochromatique le cristal doit être tourné autour de sa position de Bragg $\omega \pm \Delta\omega$

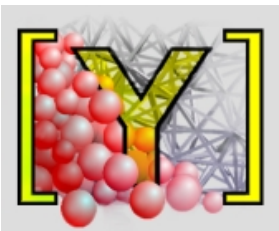
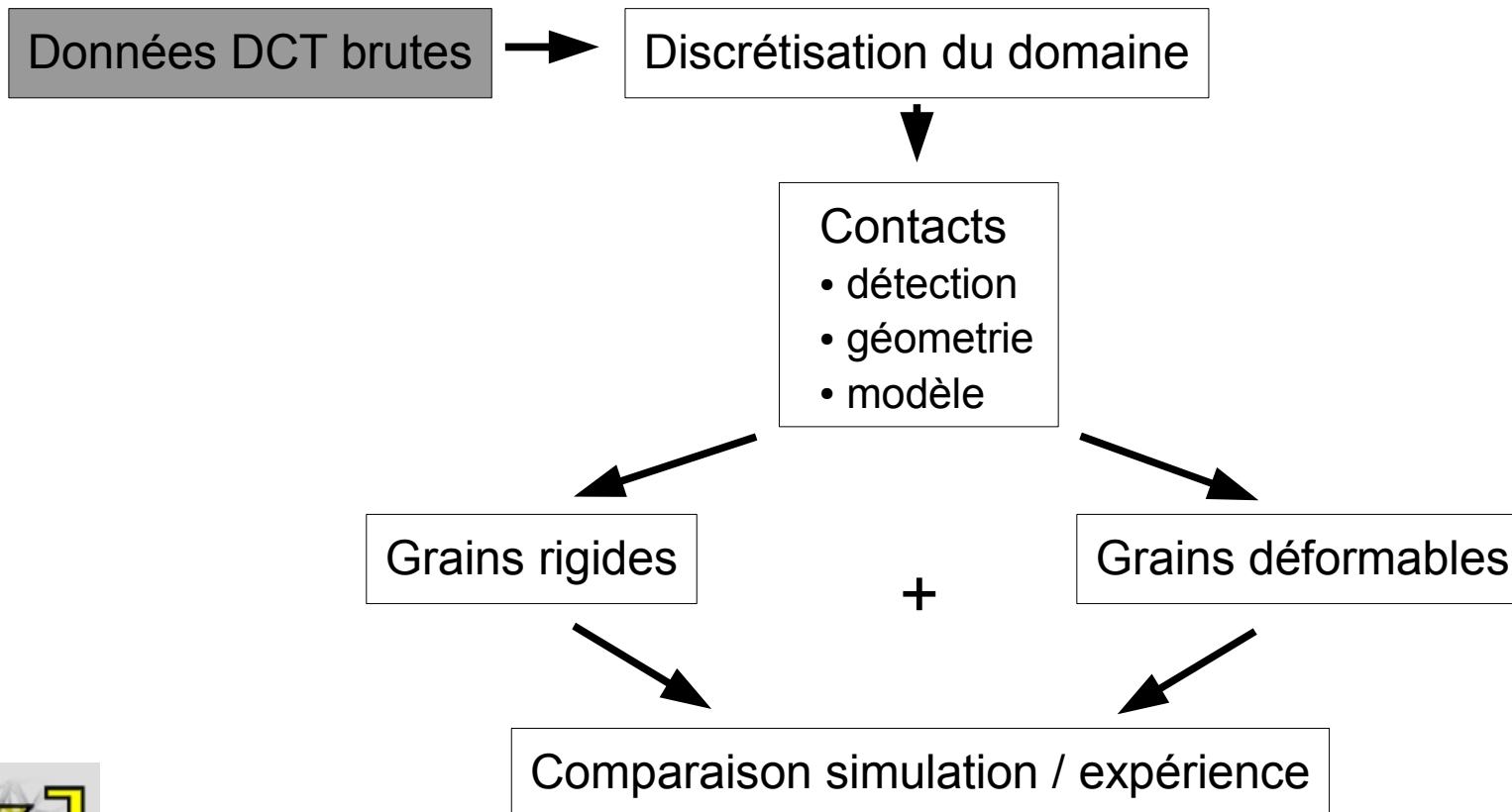
déformation	0%	1%	2%	6%
mosaïcité	0.15°	0.3°	0.35°	0.9°



➔ **activité de déformation intragranulaire**

Principe de la DEM

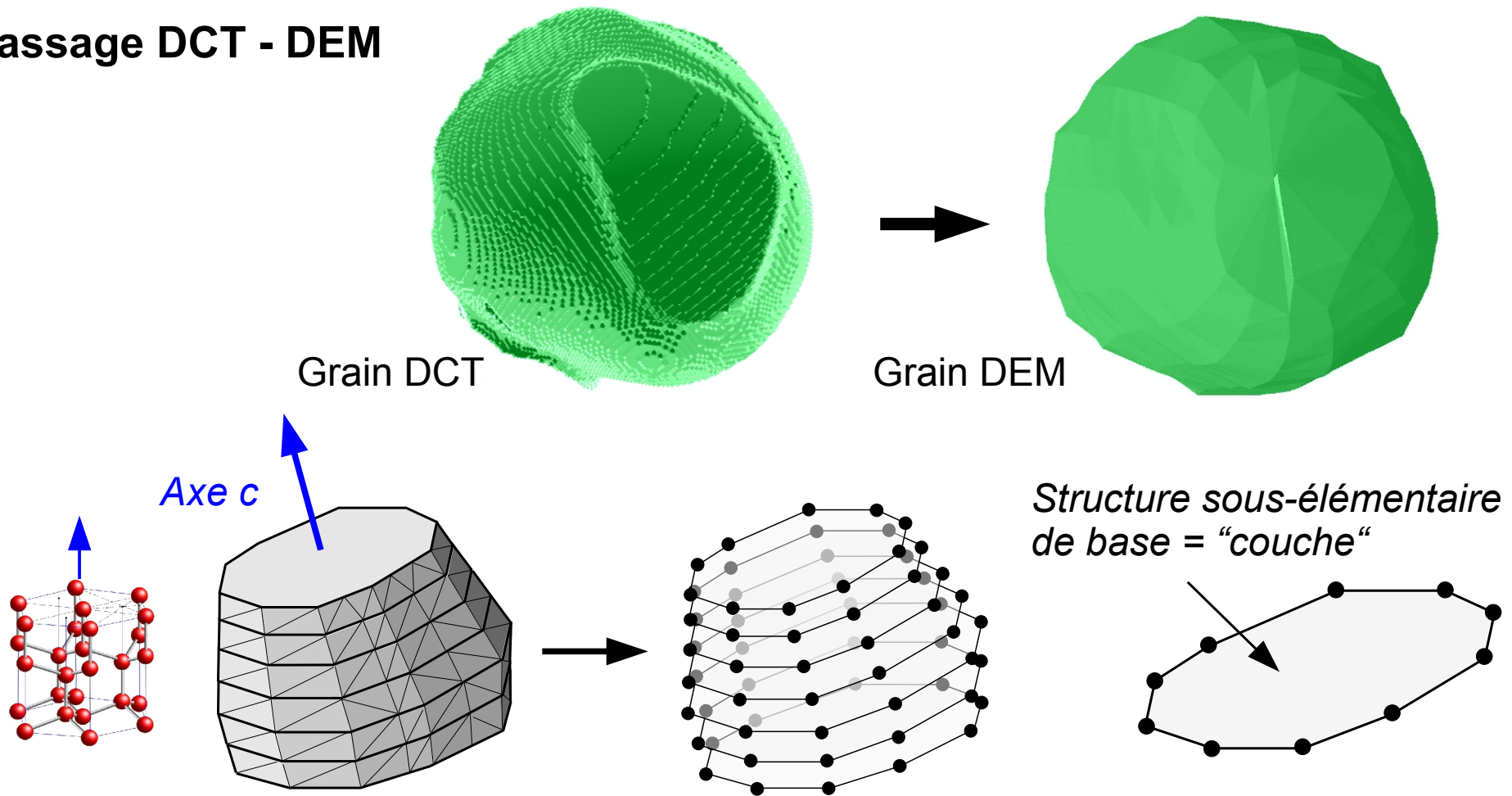
Étapes principales de la modélisation par Éléments Discrets



Développement du code open-source Yade (<https://yade-dem.org>)

Discrétisation des grains

Passage DCT - DEM

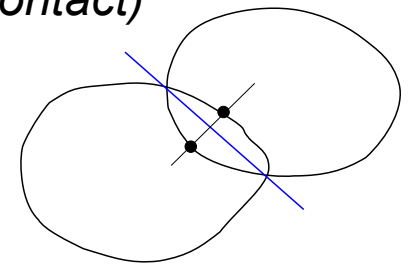
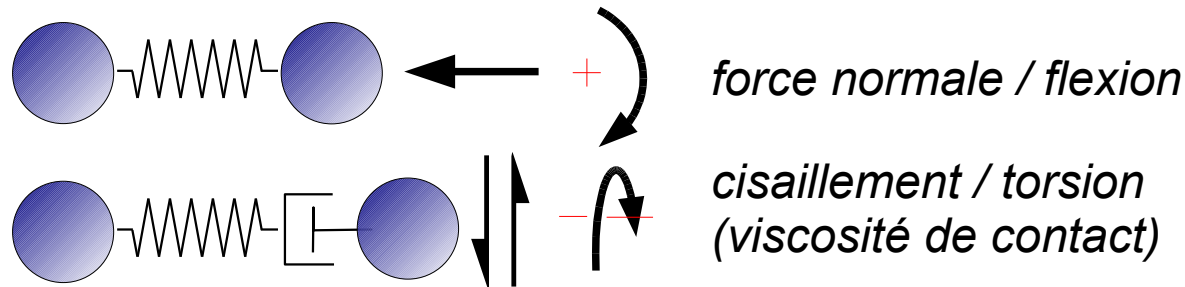


Grain = empilement de couches perpendiculaires à l'axe c

Grains rigides / déformables

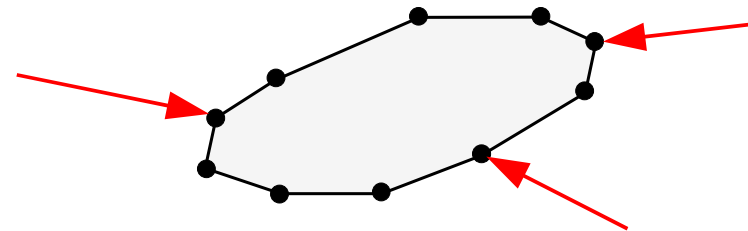
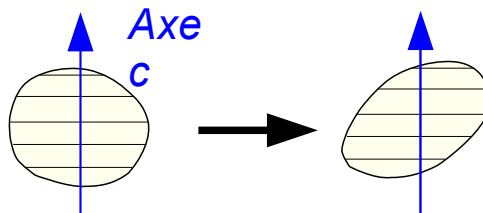
Grains rigides: fluage limité aux contacts de grains

- Forces de contact (*fonction du déplacement relatif entre points de contact*)



Grains déformables: fluage des grains par glissement relatif des couches

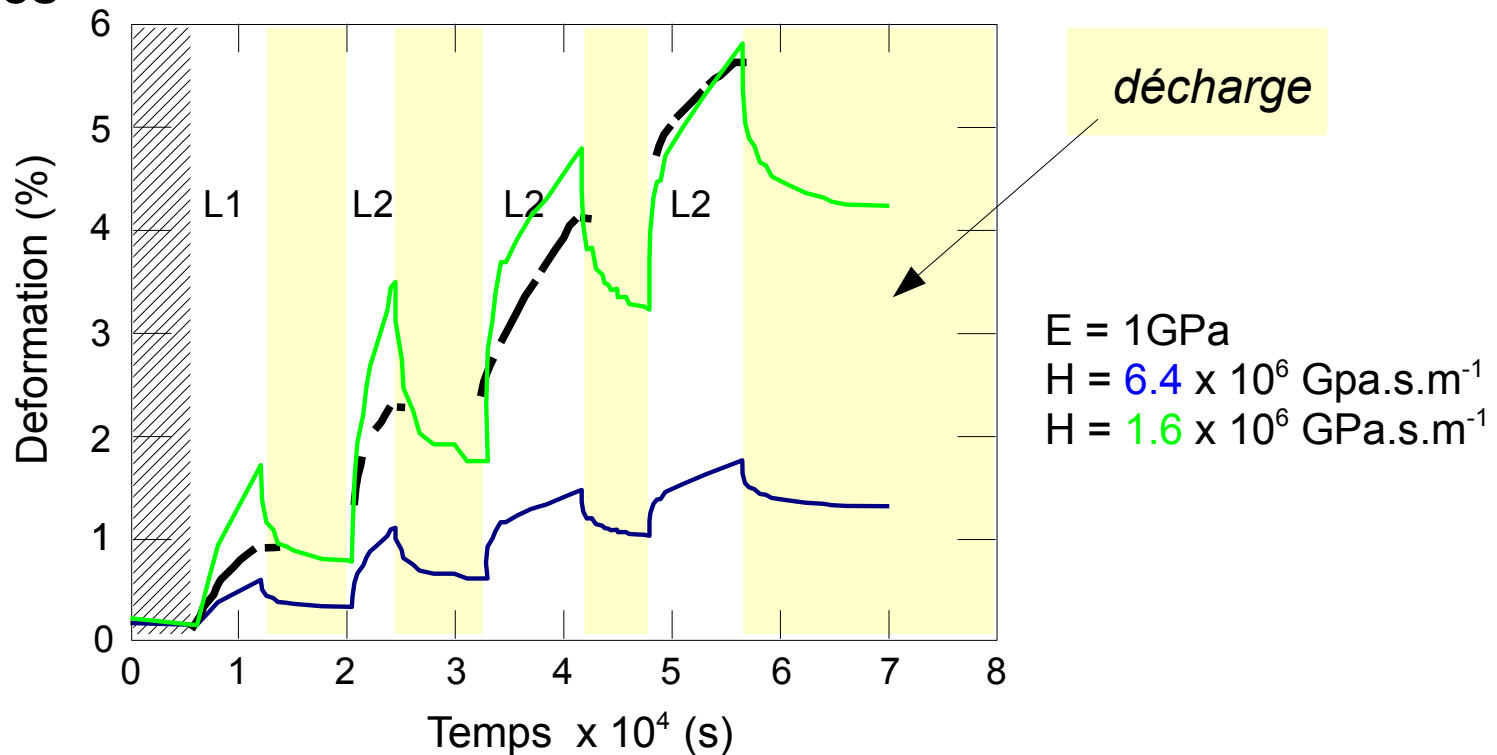
- Condition cinématique



- Forces réparties sur les couches en proportion du nombre de leurs points situés dans l'aire de contact (forces and moments sont pris constants sur la couche)

Exemple

Grains rigides

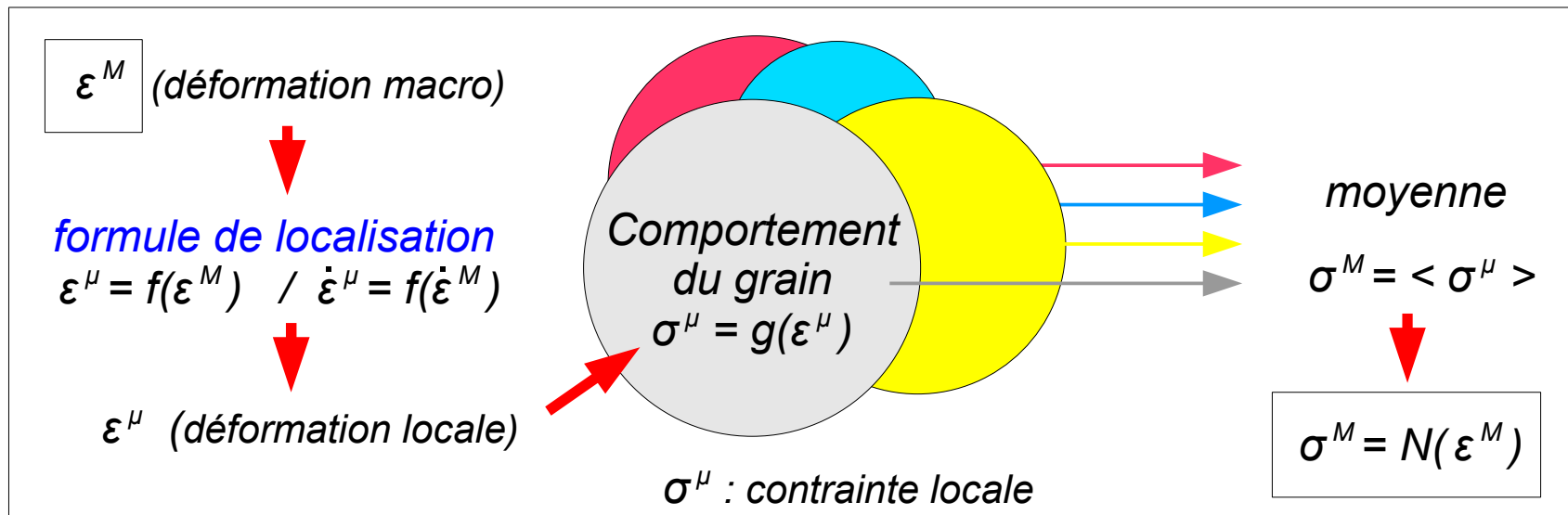
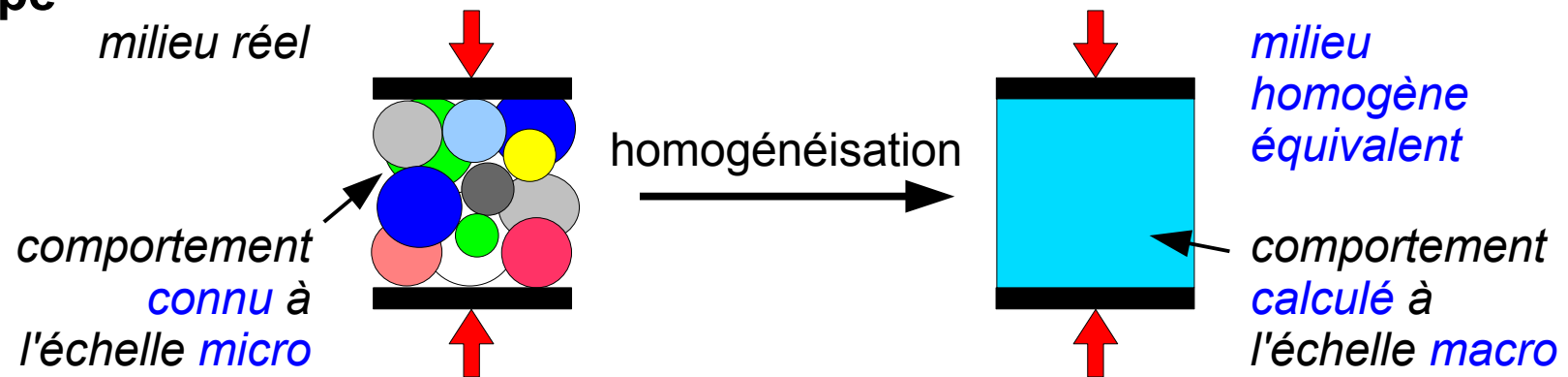


Le modèle est capable de représenter les tendances expérimentales (viscosité ad hoc)

Grains déformables → travail en cours

Modélisation “micro-macro”

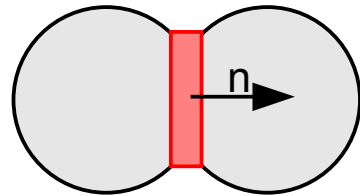
Principe



Modélisation “micro-macro”

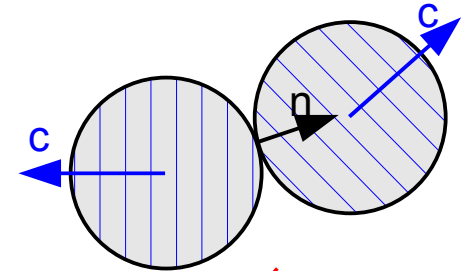
Grains rigides

● Pont: viscosité (isotrope)



Grains déformables

● Grain: viscosité orthotrope de révolution



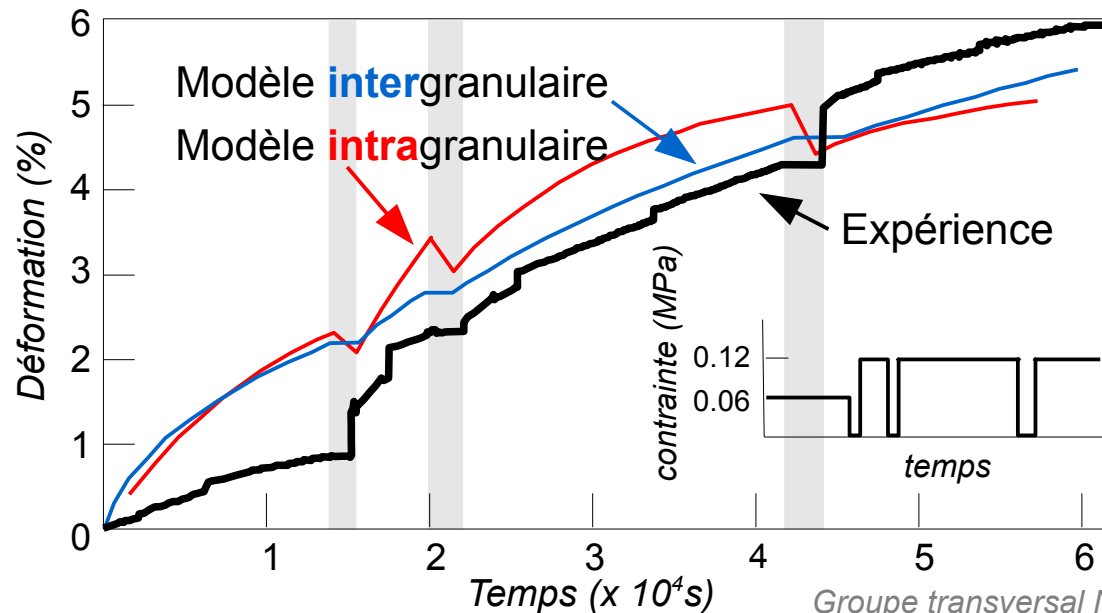
$$\sigma^M = N \varepsilon^M$$

N : matrice de viscosité fonction de

viscosité de la glace / diamètre grains / orientation contacts

géométrie des ponts

orientations cristallines



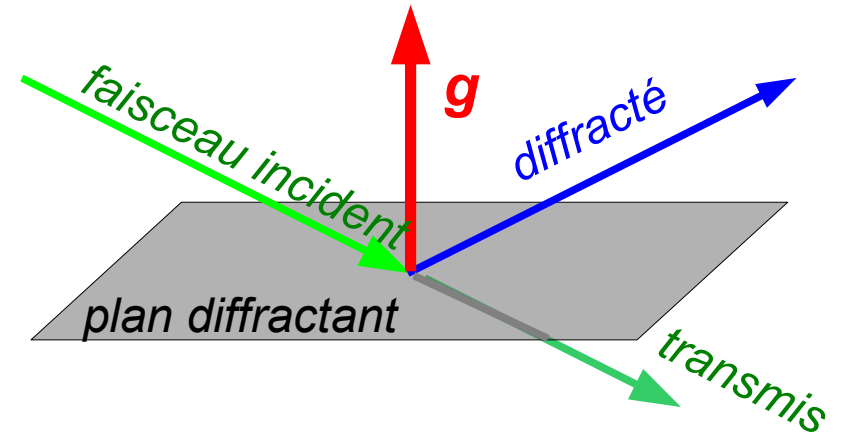
Conclusion

- La modélisation de la neige nécessite de prendre en compte sa microstructure.
Nous nous sommes focalisés sur les influences relatives de la déformation intragranulaire et du glissement inter grains.
- Des essais de compression ont été effectués sous rayonnement X en mettant en œuvre la nouvelle technique de Diffraction Contrast Tomography (DCT).
La DCT fournit une image 3D ainsi que les orientations cristallographiques des grains (méthode non destructive !)
Ceci donne la possibilité de simuler la déformation de la neige dans le régime ductile en prenant en compte l'extrême anisotropie de la glace.
- Les expériences ont montré que les grains de neige se déforment pendant une compression.
- Il reste à analyser une très grande quantité de données et à finaliser l'effort de modélisation en cours pour interpréter les résultats en termes de comportement mécanique.

Principe de la DCT

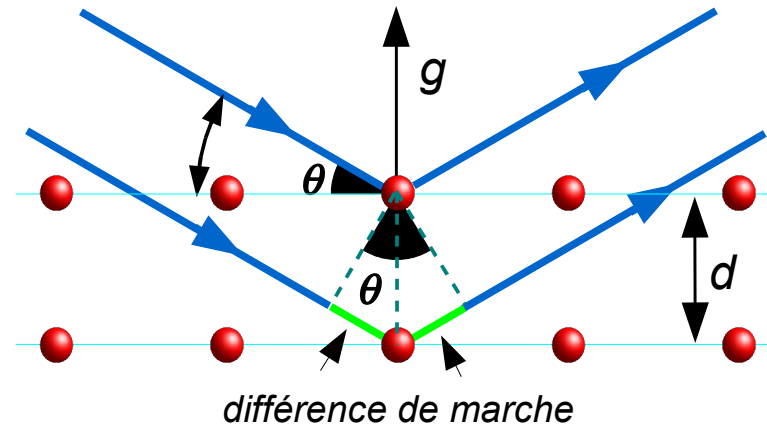
Tomographie + diffraction

- Faisceaux transmis + diffracté



- Loi de Bragg

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

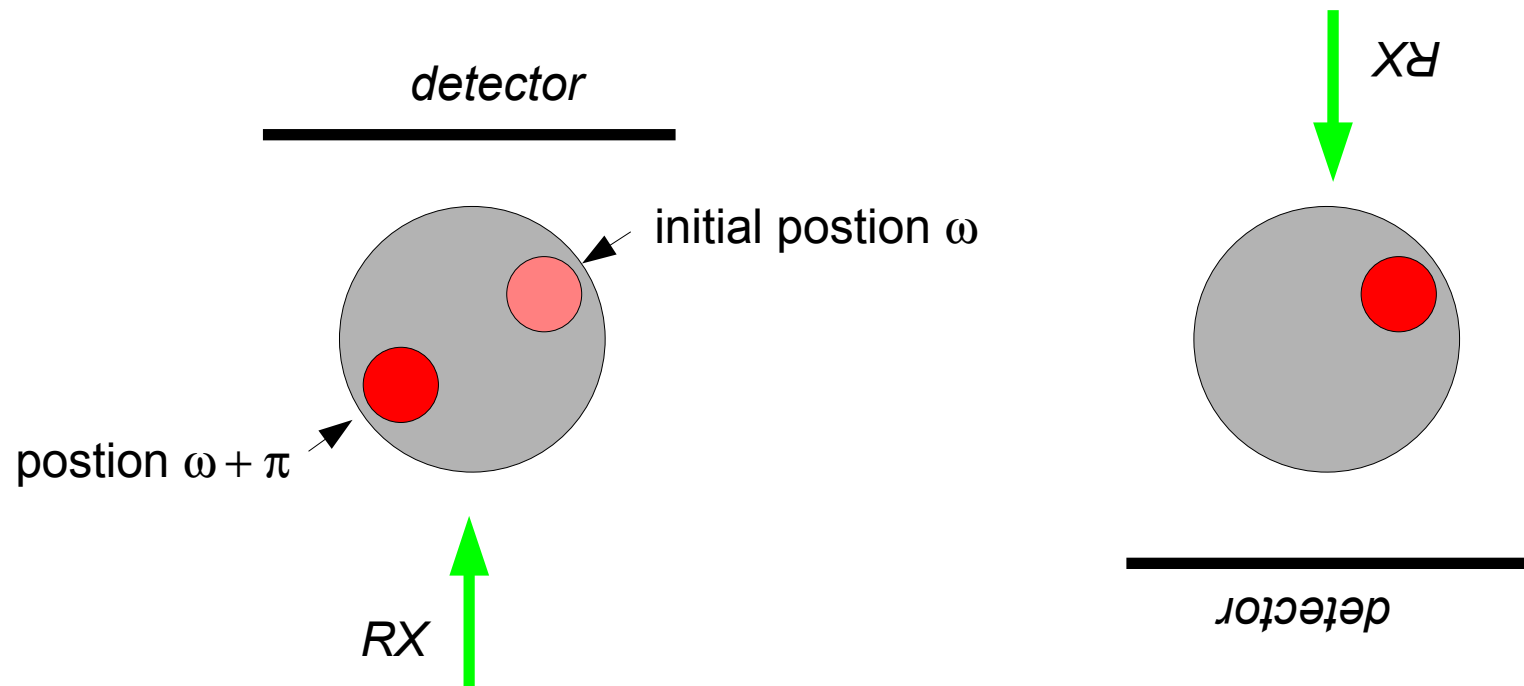


- Ne marche que pour les matériaux cristallins !

Principe de la DCT

Friedel pairs

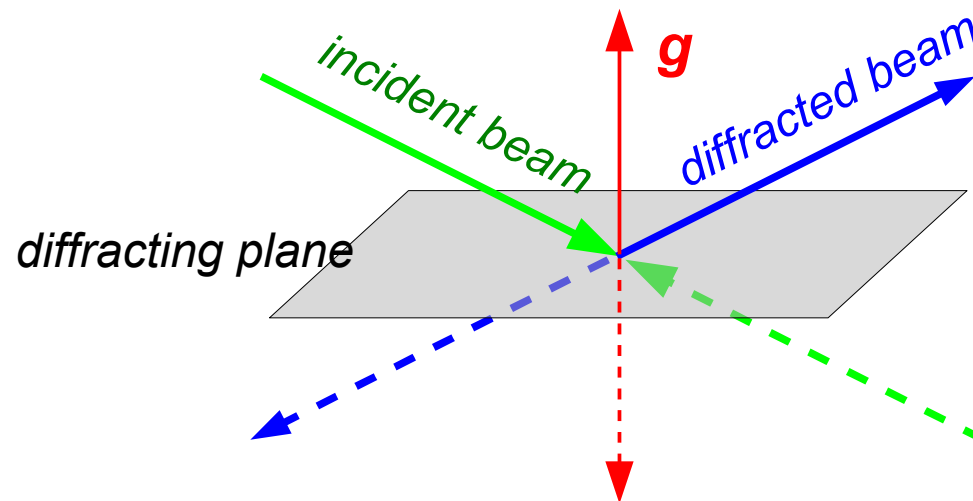
- Tourner l'échantillon de 180° est équivalent à laisser l'échantillon fixe et tourner le faisceau X et le détecteur de 180°



Principe de la DCT

Friedel pairs

- Tourner l'échantillon de 180° est équivalent à laisser l'échantillon fixe et tourner le faisceau X et le détecteur de 180°
- Inverser le faisceau incident inverse le faisceau diffracté



Principe de la DCT

Friedel pairs

