

# Journées Scientifiques

Edition 2022 – vendredi 3 juin



# Projet GRIM



## Granular Rheology and segregation in Icy Moons

### Chapitre 1 : La Thèse

Les régolithes glacés du système solaire  
Étude expérimentale et numérique



Benoît JABAUD, Riccardo ARTONI, Gabriel TOBIE, Erwan LE MENN, Patrick RICHARD



Université  
Gustave  
Eiffel

LABORATOIRE GPEM  
GRANULATS ET  
PROCÉDÉS D'ÉLABORATION  
DES MATÉRIAUX



LPG



Région  
PAYS DE LA LOIRE

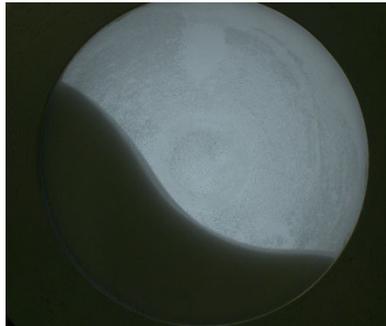


JOURNÉES SCIENTIFIQUES

# Contexte et problématiques

## Les poudres

Non-cohésives

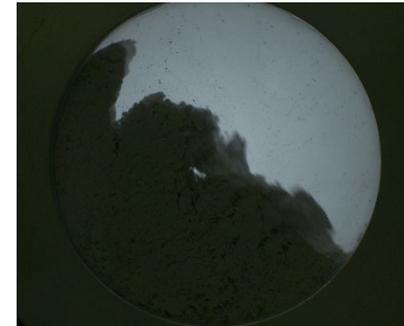


Propriétés mécaniques différentes

Comment quantifier ces différences ?

Quel est l'intérêt des poudres cohésives en planétologie ?

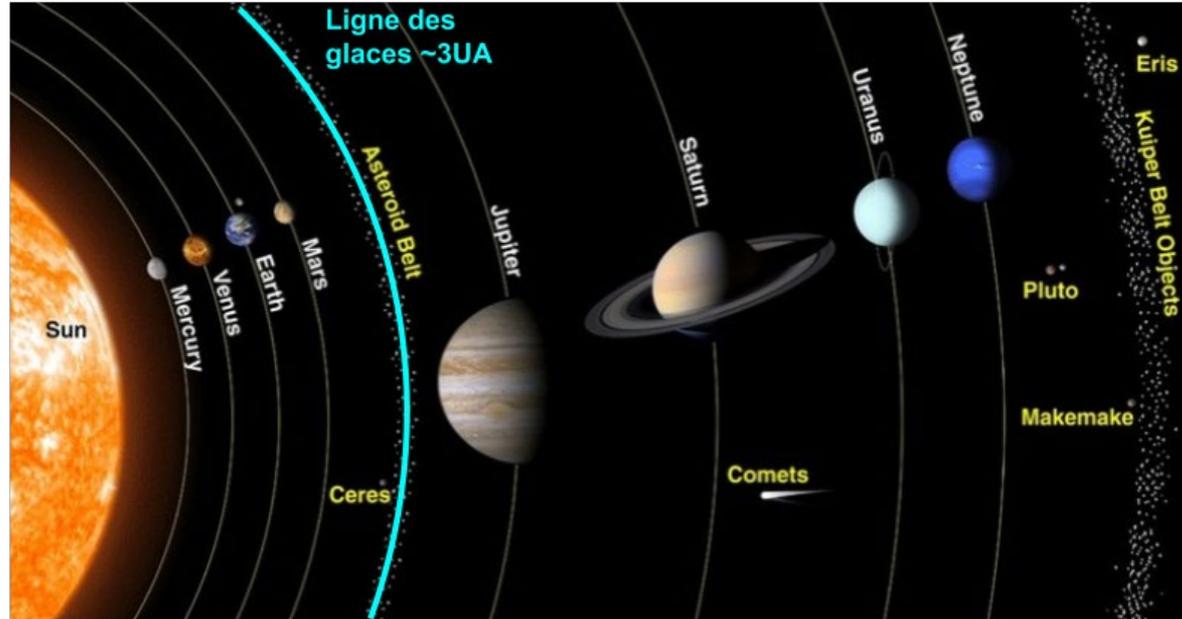
Cohésives



# Contexte et problématiques

## Planétologie

Surfaces glacées fréquentes dans le système solaire externe

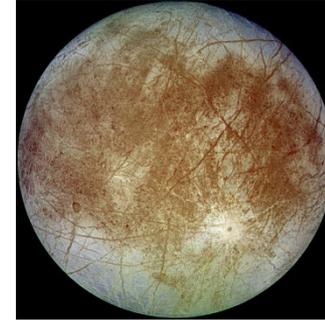


# Contexte et problématiques

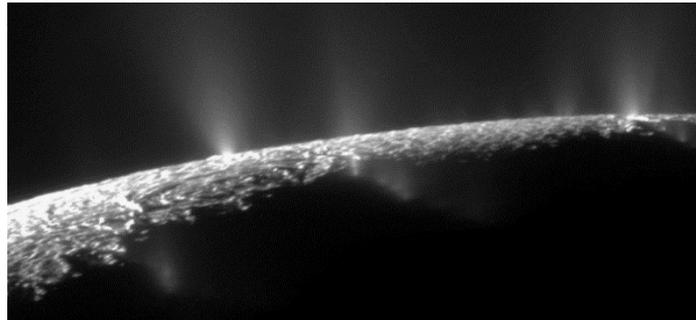
## Corps glacés : Cas emblématiques



Encelade



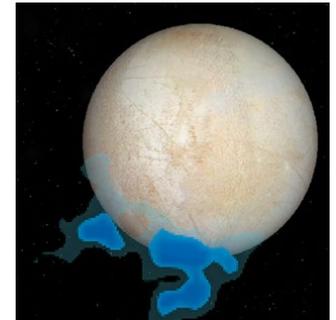
Europe



Dépôt d'une couche  
poudreuse en surface



**Régolithe Glacé**



# Contexte et problématiques

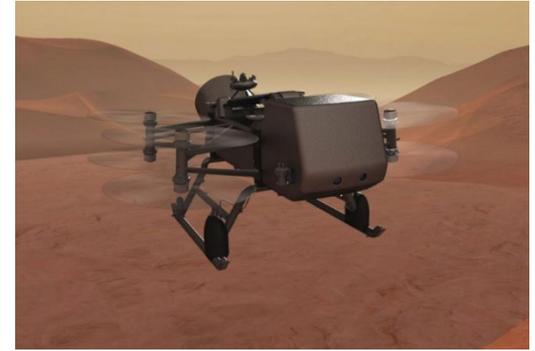
## Corps glacés : Missions spatiales à venir



JUICE (ESA)  
Lunes de Jupiter (2023)



Europa Clipper (NASA)  
2024



Dragonfly (NASA)  
Titan (2026)

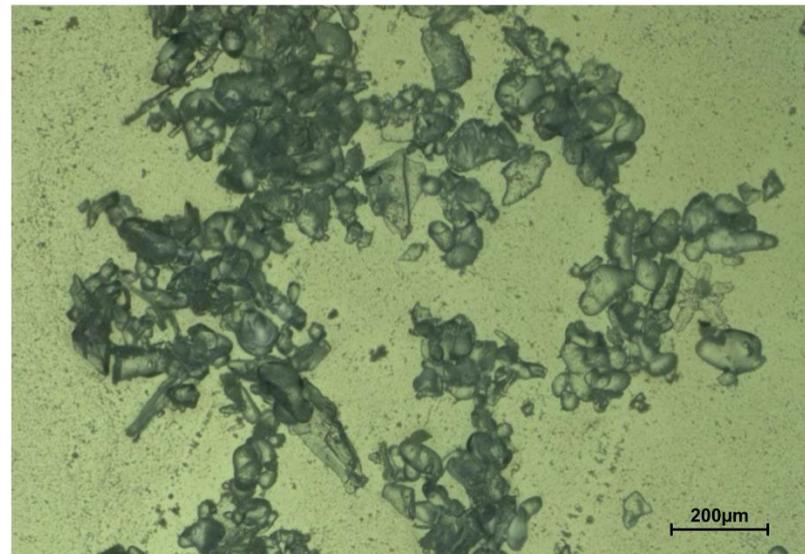
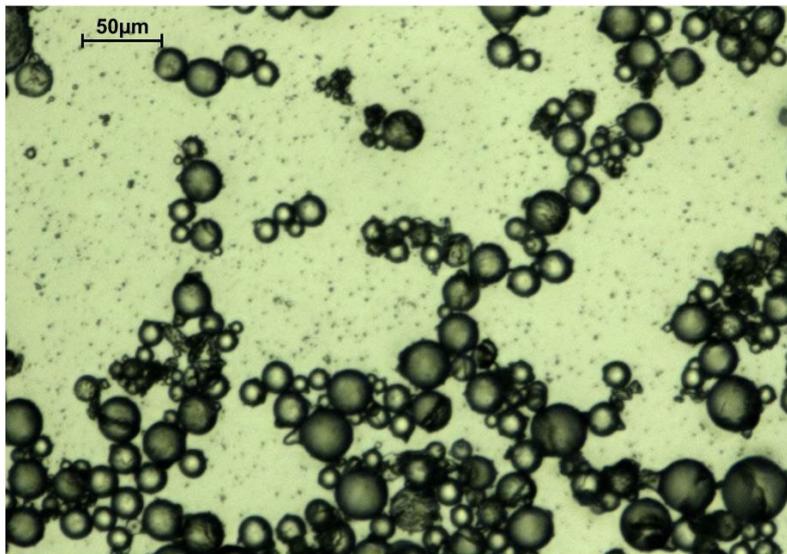
# Contexte et problématiques

- ✓ Comment étudier les régolithes glacés du système solaire en laboratoire ?
- ✓ Quelles sont les lois de comportement de la poudre de glace ?
- ✓ Quelle est l'évolution de ces lois avec la température ? Avec la morphologie des grains de glace ?
- ✓ Comment peut-on estimer la cohésion de ces poudres et son évolution avec la température ?
- ✓ Quelles sont les implications pour les lunes de glace de Jupiter et Saturne, et les futures missions spatiales ?

# Synthèse de poudre de glace

GRIM

Granular Rheology and segregation in Icy Moons

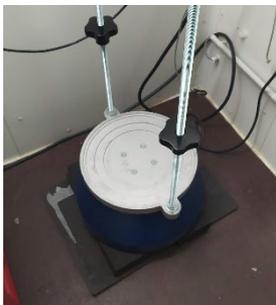


# Synthèse de poudre de glace

## Principes et Méthodes



Glace massive



Tamisage

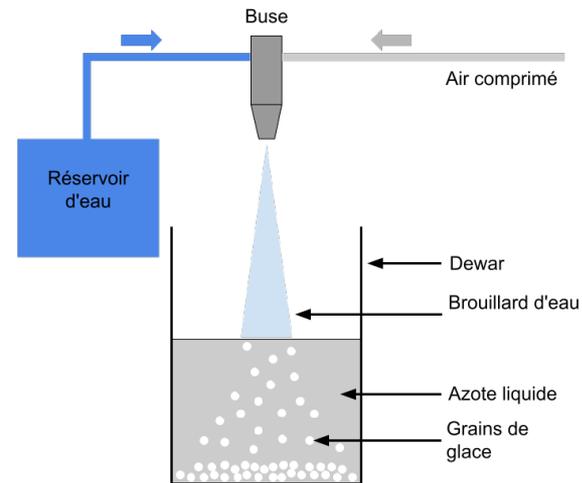


Broyage automatique

Grains anguleux  
Quelques 10aines à 100aines de microns

1

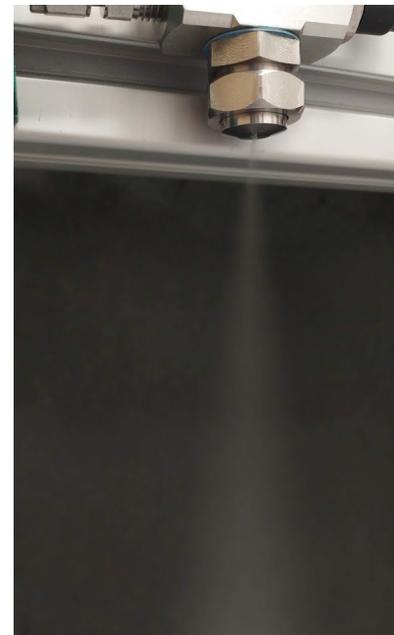
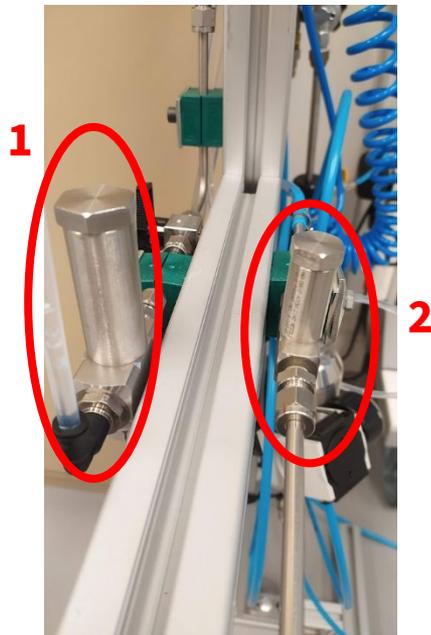
2



Grains sphériques  
Quelques microns à 10aines de microns

# Synthèse de poudre de glace

## Pulvérisation : Détails



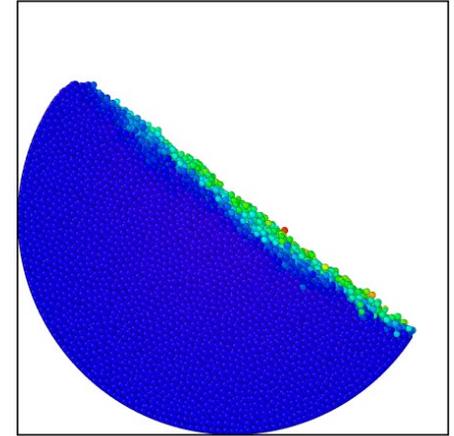
# Méthodes de caractérisation



Microscopie



Tambour tournant



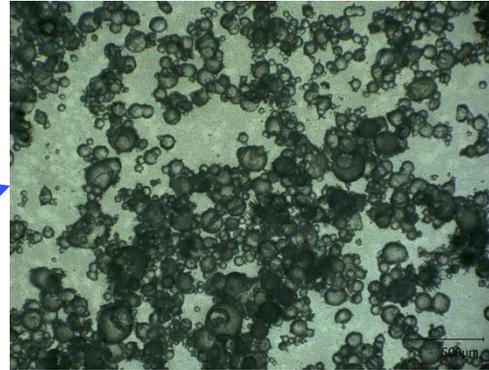
Simulations numériques

# Méthodes de caractérisation

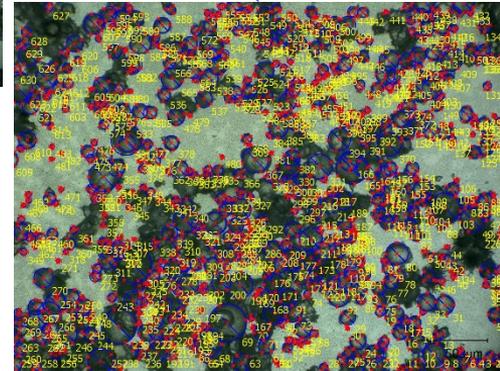
## Microscopie : morphologies et tailles des grains



Acquisitions



Mesures



Cryostat  
T ~ 90K/-180°C  
P = 10<sup>-2</sup>mbar

# Méthodes de caractérisation

## Tambour tournant : mesures dynamiques

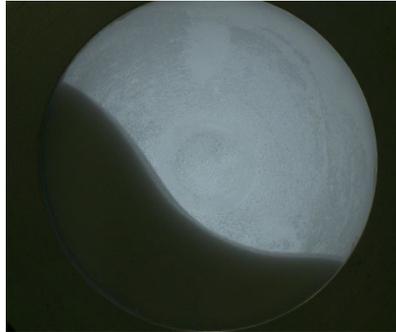
Comportement d'un matériau en rotation dans un tambour

Vitesse de rotation

Degré de remplissage

Propriétés du matériau

Billes de verre  
Non-cohésives



Poudre de calcaire  
Cohésive

- ✓ Déterminer le degré de cohésion d'une poudre par analyse d'images basée sur la quantification des irrégularités de la surface d'écoulement (Lumay et al., 2012)
- ✓ Évaluer l'évolution du comportement dans le tambour avec la température

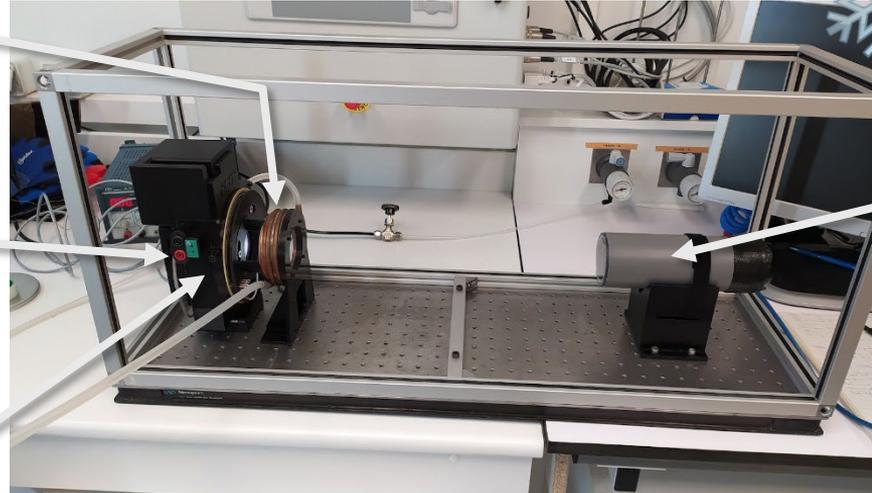
# Méthodes de caractérisation

## Tambour tournant : montage expérimental

Tambour + système de refroidissement à l'azote liquide

Rétro-éclairage

Moteur



Caméra haute résolution avec lentille de 50mm

# Méthodes de caractérisation

## Tambour tournant : montage expérimental



Résistances chauffantes



Contrôle de température (système PID)

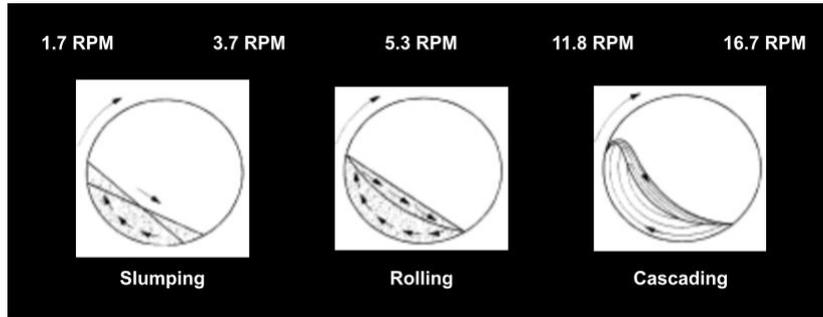


Niveaux de température précis

# Méthodes de caractérisation

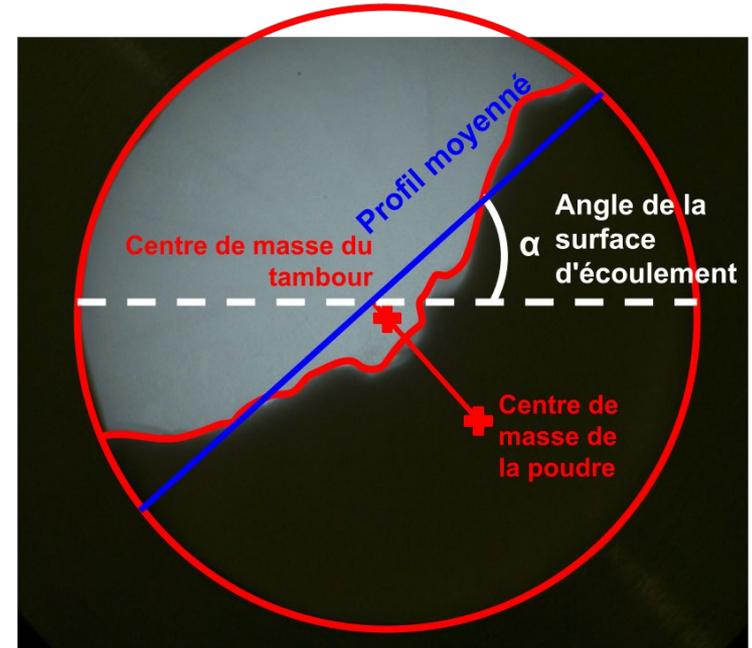
## Tambour tournant : séquence d'acquisition

5 vitesses de rotation



Mellmann (2001)

50 images par vitesse de rotation



# Méthodes de caractérisation

## Simulations numériques : modélisation par éléments discrets (DEM)

Etude de l'effet de la cohésion sur un modèle de poudre : comment choisir une référence ?

Nombre de Bond  $\rightarrow$  rapport entre la force de cohésion et la gravité

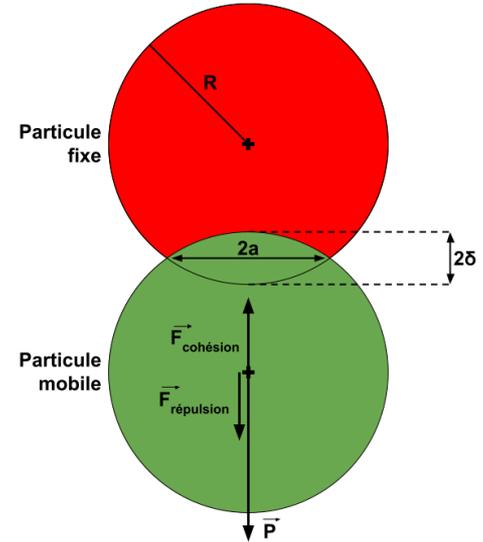
$$Bo = \frac{F_{cohésion}}{F_{gravité}}$$

Référence  $\rightarrow$   $Bo = 1$   $\longleftrightarrow$   $\gamma_{ref} = \frac{2}{3}\rho R^2 g$

$\gamma_{ref}$  = énergie de surface de référence ( $J.m^{-2}$ ) = cohésion

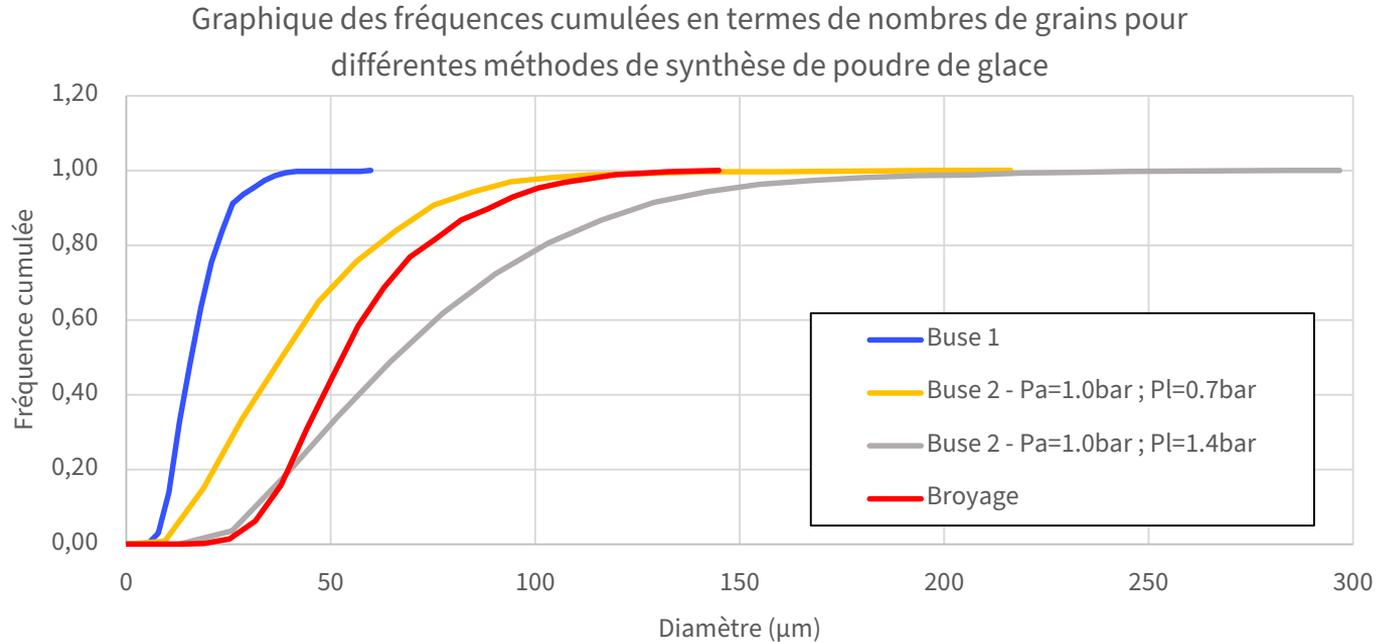
$\rho$  = densité de la particule ( $kg.m^{-3}$ )

$R$  = rayon de la particule (m)



# Résultats

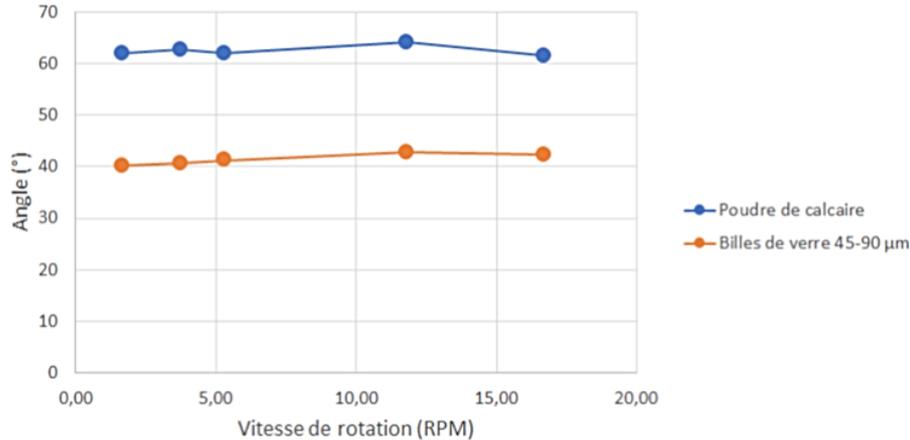
## Microscopie : distribution granulométrique



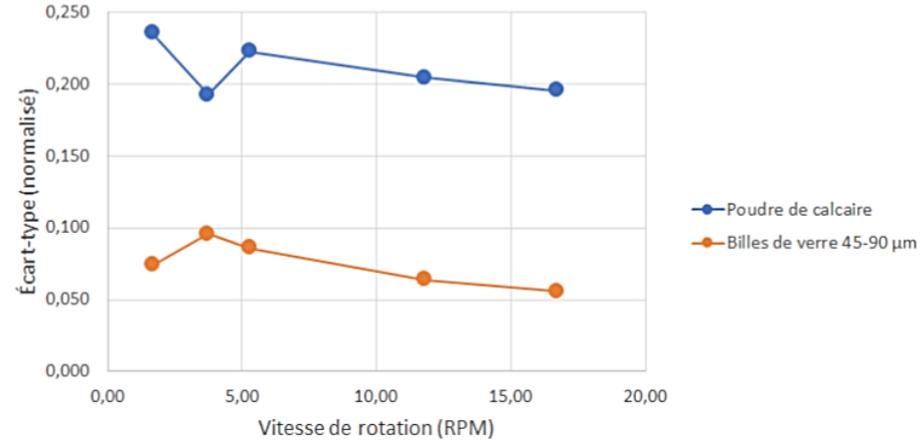
# Résultats

## Tambour tournant : poudres de test

Évolution de l'angle du centroïde avec la vitesse de rotation



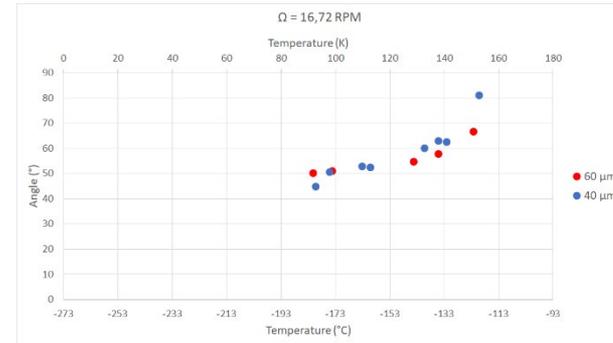
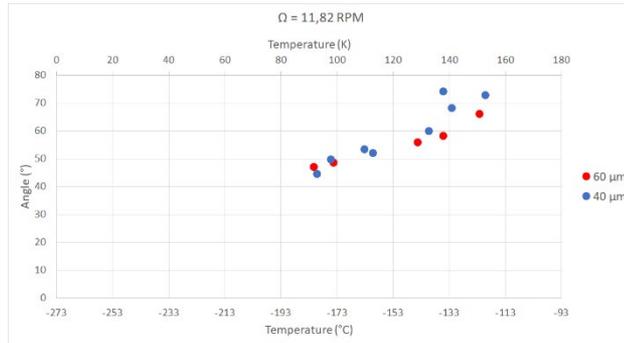
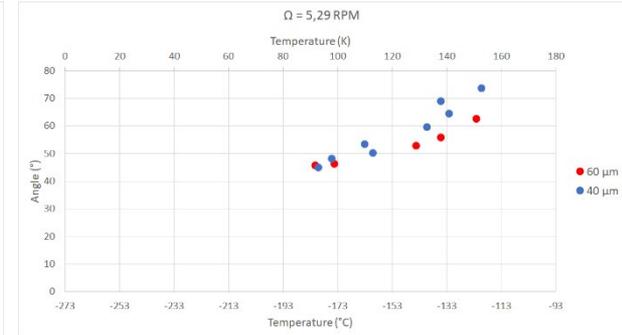
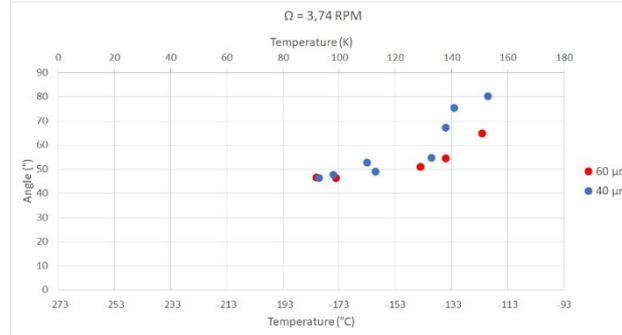
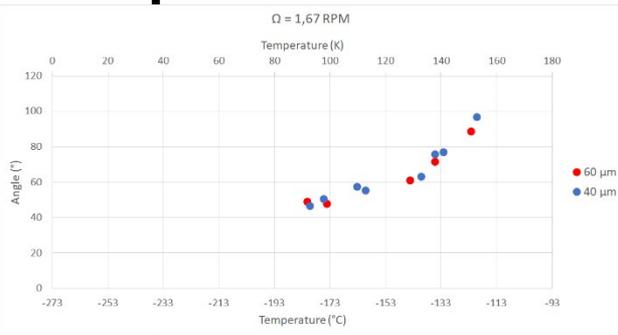
Évolution de l'écart-type avec la vitesse de rotation



- ✓ Différence claire entre une poudre cohésive (poudre de calcaire) et non-cohésive (billes de verre)
- ✓ Irrégularités plus marquées pour les poudres cohésives

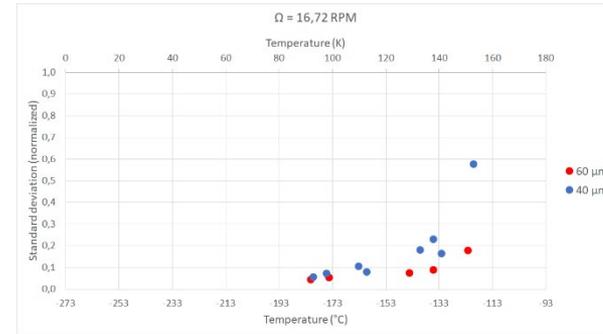
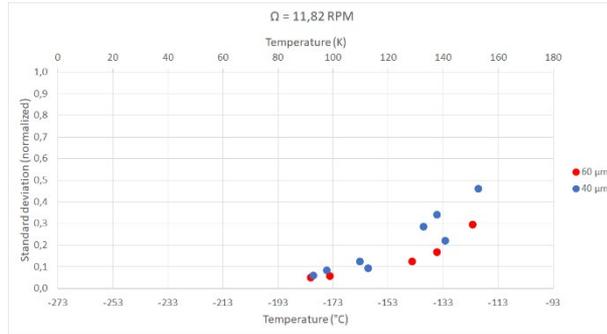
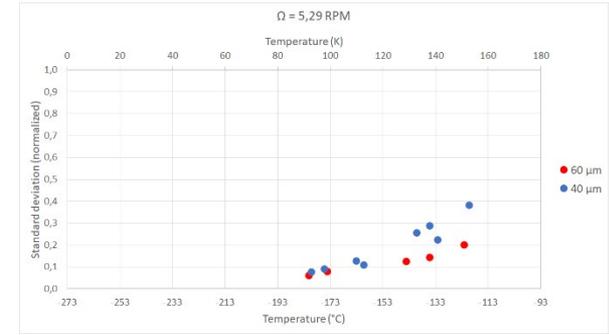
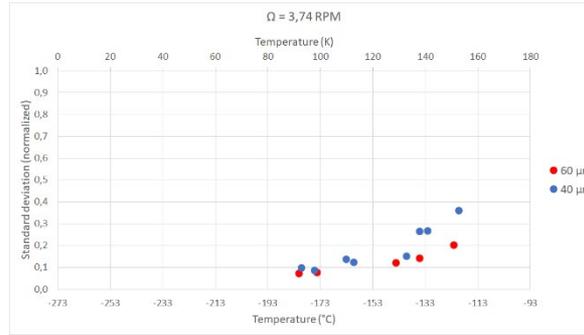
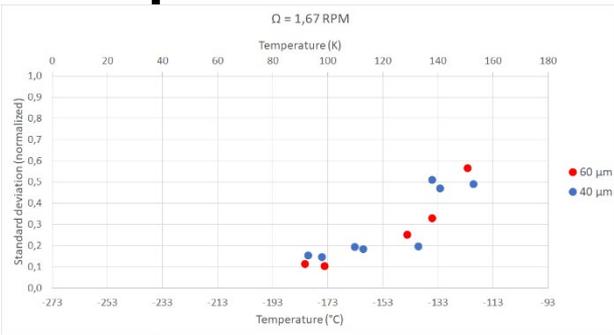
# Résultats

## Tambour tournant : poudres de glace → évolution de l'angle avec la température



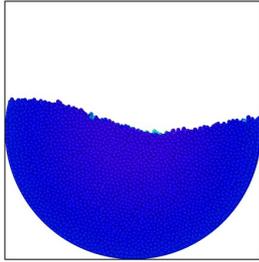
# Résultats

Tambour tournant : poudres de glace → évolution de l'écart-type avec la température

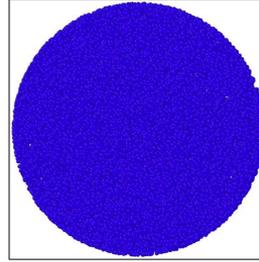


# Résultats

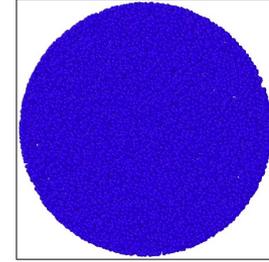
## Simulations numériques : effet de la cohésion



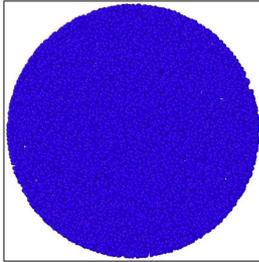
Cohésion = 0



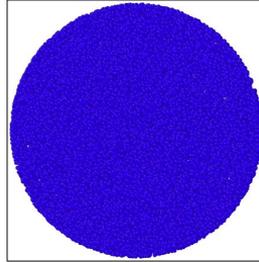
Cohésion = ref



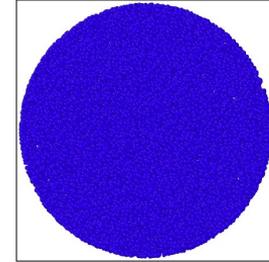
Cohésion = 2\*ref



Cohésion = 4\*ref



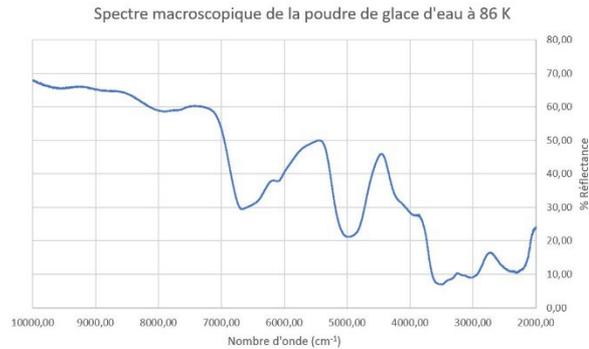
Cohésion = 10\*ref



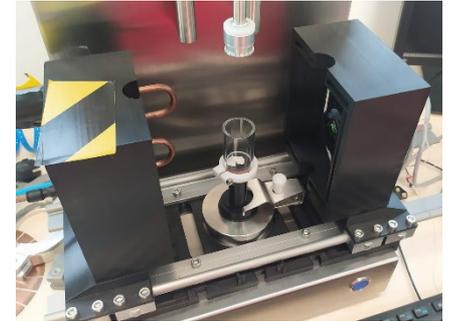
Cohésion = 20\*ref

# Perspectives

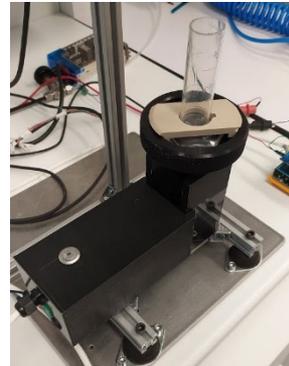
## Travaux en cours et futurs



Campagne de spectroscopie infrarouge  
Erwan Le Menn, Florian Picot, Ambre Priol



Rhéomètre à poudre avec cellule froide (mesures de cisaillement)



Système DENSITAP de  
compaction et mesures de  
densités

Appel à projet OSUNA

**MERCI**