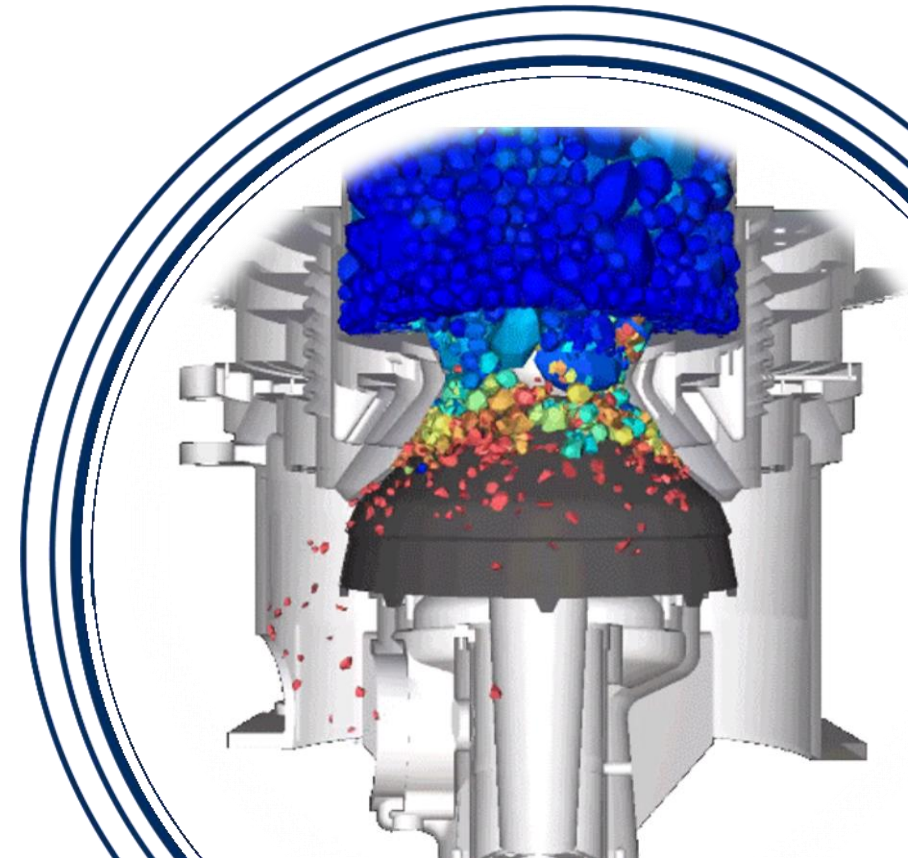


## Rocky DEM Calibration de particules de carottes

Mickaël Gay



# Qu'est-ce que la DEM?

## Discrete Element Method (DEM)

- Méthode numérique qui permet d'étudier le comportement de particules (éléments discrets)
- Chaque particule du milieu granulaire est traitée comme une entité distincte
- Les matériaux simulés sont un ensemble de particules de différentes tailles (plus éventuellement de différentes compositions chimiques, masse volumique, forme) regroupées de façon aléatoire pour former un milieu granulaire



Pandey et al. (2016),  
Advances in DEM of high shear  
wet granulation Using Rocky DEM,  
AIChE Annual Conference



<http://library.esss.co/ims-uses-rocky-dem-to-optimize-mining-equipment-design>



<http://library.esss.com.br/rocky-dem-helps-pepsico-cut-costs>



<https://www.pexels.com/photo/colors-colours-health-medicine-143654/>

# Pourquoi la DEM?

## Domaine d'application

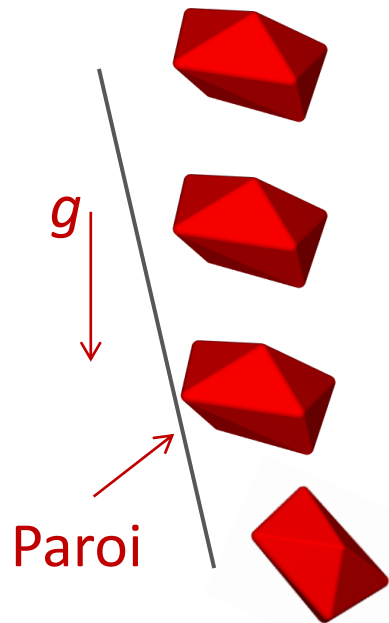
- DEM validée expérimentalement et appliquée dans des domaines tels que :
  - ✓ Exploitation minière - roches (transport, concassage)
  - ✓ Agriculture - transport et manutention des grains
  - ✓ Chimique - fragmentation particulaire, fluidisation
  - ✓ Pétrole et gaz - érosion des conduites par le sable
  - ✓ Environnemental et biologique - purification de l'eau, sang
  - ✓ Produits pharmaceutiques - mélange, broyage, enrobage, etc.
  - ✓ Nourriture - assaisonnement des chips, séchage des haricots, etc.
  
- La DEM est utilisée comme outils d'aide à la conception d'équipements (alimentaire, mine, agriculture...) pour :
  - ✓ Optimiser la capacité et l'efficacité des procédés
  - ✓ Minimiser l'usure et les arrêts pour maintenance
  - ✓ Améliorer le mélange et l'homogénéité
  - ✓ Évaluer les stratégies de mise à l'échelle
  - ✓ Augmenter la durée de vie de l'équipement
  - ✓ Analyse des charges sur les structures
  - ✓ Éliminer la dégradation et l'érosion par les particules



# Quelques notions de base théoriques

2<sup>nde</sup> loi de Newton: 
$$\sum \bar{F} = \bar{F}_{body} + \bar{F}_{surface} = ma = m \frac{dv}{dt}$$

Exemple: Chute d'une particule:



Time =  $t$ ,  $\dot{\bar{a}}\bar{F} = \bar{F}_{body} = mg$

Time =  $t + Dt$ ,  $\sum \bar{F} = \bar{F}_{body} = mg$

Time =  $t + 2Dt$ ,  $\sum \bar{F} = \bar{F}_{body} + \bar{F}_{surface} = mg + \bar{F}(t)_{contact}$

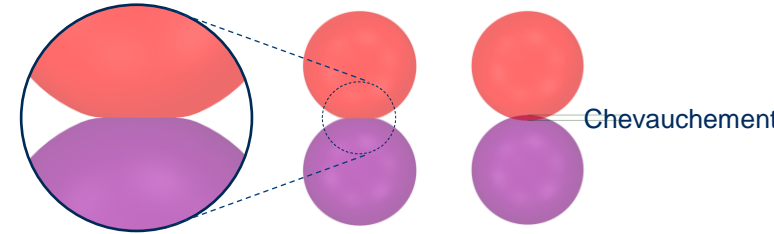
Time =  $t + 3Dt$ ,  $\sum \bar{F} = \bar{F}_{body} = mg$

$\bar{F}$  = Force,  $m$  = mass,  $a$  = acceleration,  $g$  = acceleration due to gravity

# Quelques notions de base théoriques

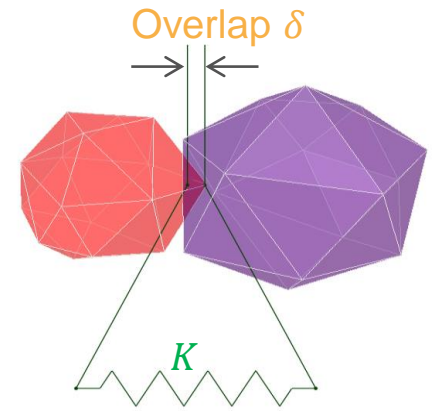
## Forces de contact :

- Les particules se déforiment au contact (déformation variant selon les propriétés du matériau)
- En DEM, toute déformation au contact est modélisée comme un "chevauchement"
- Aucune déformation visible n'est modélisée, elle est prise en compte dans le modèle de force des contacts:
  - ✓ La force est fonction des caractéristiques de chevauchement
  - ✓ Valable uniquement pour les petites déformations / chevauchements  $\sim 1\%$  du diamètre des particules



## Dynamique des contacts :

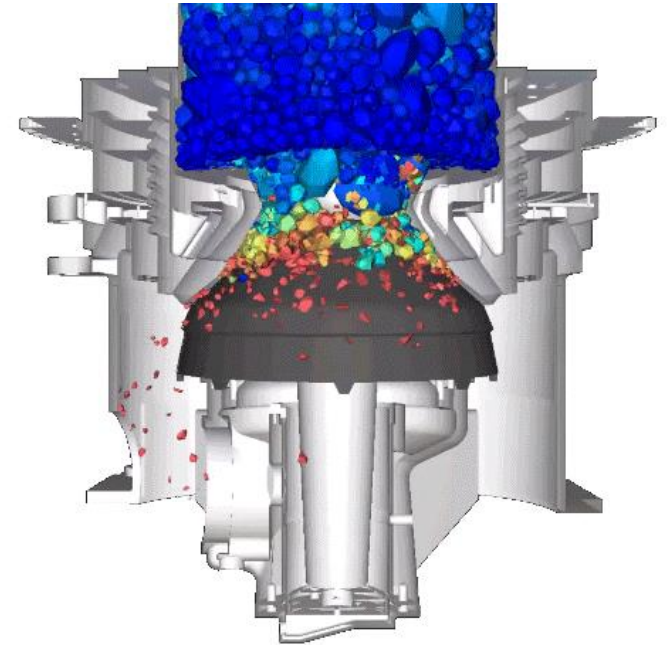
- Formulation mathématique permettant de prédire le comportement de deux solides ayant un impact
- Utilisé pour calculer les forces normales et tangentielles (de contact) lors de collisions particules-particules et particules-paroi
- Le chevauchement des particules est approximé à l'aide d'une analogie "masse-ressort"



Pas de temps :  $\Delta t_s \propto \sqrt{m/K}$

# Rocky DEM

- **PRÉCIS:** Représentation physique réelle (taille, forme, fragmentation des particules – Interactions, usure...)
- **RAPIDE:** Performance de solveur sans précédent (CPU, GPU et multi GPU)
- **INTÉGRATION** avec les logiciels ANSYS (couplage avec Mechanical et Fluent)
- **FACILE À UTILISER:** Interface graphique moderne et personnalisée
- **CALIBRATION SUITE:** Outil d'aide à la calibration des particules intégré





# Calibration des propriétés matériaux

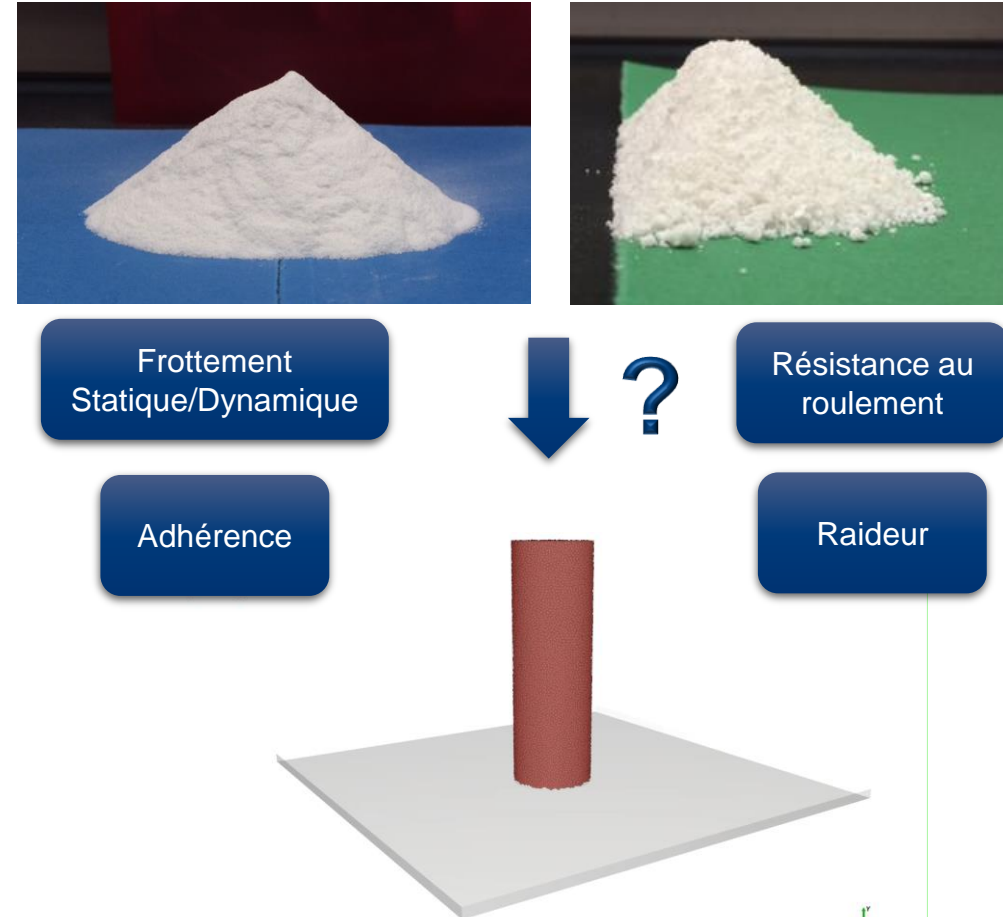
L'étalonnage d'un matériau consiste à simuler son écoulement afin d'ajuster les données d'entrée pour la simulation DEM:

- Coefficient de friction
- Coefficient de restitution
- Facteur d'adhérence / cohésion
- Masse volumique
- Module de Young

Il n'existe pas de test d'étalonnage de DEM universellement accepté !

Tests couramment utilisés :

- Angle de déposition et de retrait
- Essai de frottement sur paroi inclinée
- Essai d'adhérence à l'impact



# Rocky Calibration Suite

L'étalonnage d'un matériau consiste à simuler son écoulement afin d'ajuster les données d'entrée pour la simulation DEM

La **Rocky Calibration Suite** contient :

- 8 tests de calibrations pré-préparé
- Scripts de mise en donnée simplifié
- Scripts de post-traitement automatique



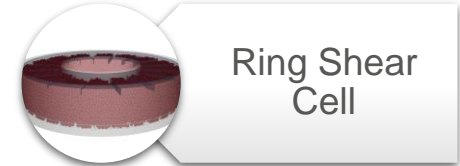
Static Angle of Repose with Cylinder



FT4 Rheometer



Drained Angle of Repose



Ring Shear Cell



Loose Bulk Density



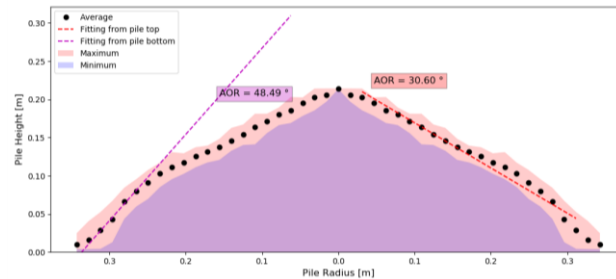
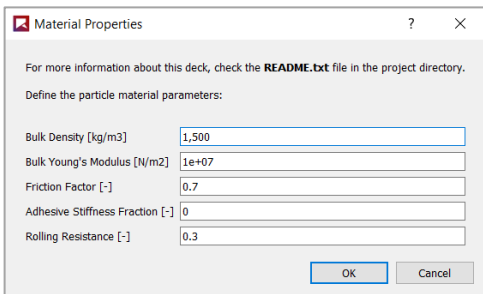
Dynamic Angle of Repose



Pour Static Angle of Repose



Inclined Plane Test





# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Objectifs

Etablir un modèle de simulation afin d'effectuer la calibration des propriétés physiques des aliments.

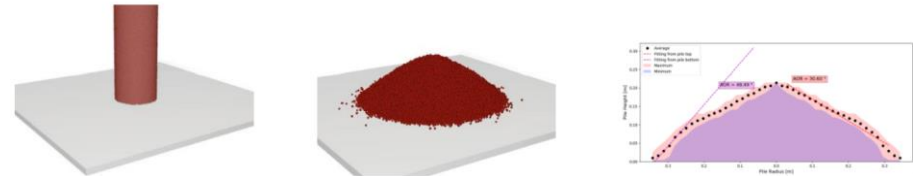
Le modèle de calibration est basé sur un test de type « Angle de repos statique ».

Ajuster les propriétés des particules en reproduisant les mesures réalisées par le client lors des essais.

## Résultat à atteindre



Angle supplémentaire de l'angle de repos égal à  $147^\circ$

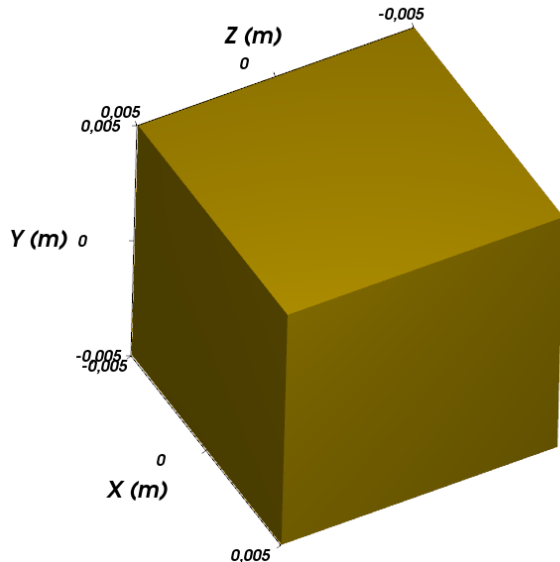


Modèle de calibration « Angle de Repos Statique »

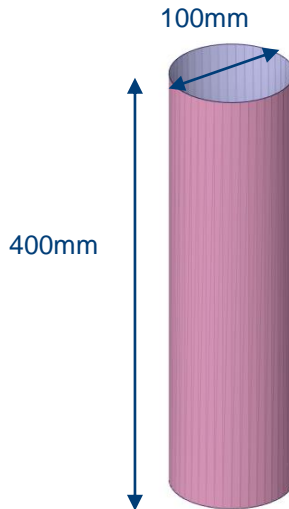
# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Données d'entrées

Géométrie de la particule :  
cube de  $1\text{cm}^3$



Géométrie du cylindre :  
 $h=400\text{mm}$  ;  $d=100\text{mm}$



Masse totale des particules = 1kg

Hauteur de remplissage = 235 mm

Masse volumique  $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

Vitesse de levée du cylindre : 5,7mm/s

# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Données à calibrer :

### Module d'Young

Caractérise la raideur des particules

### Coefficient de frottement statique

Caractérise la résistance au frottement pour les particules sans mouvement relatif

### Coefficient de frottement dynamique

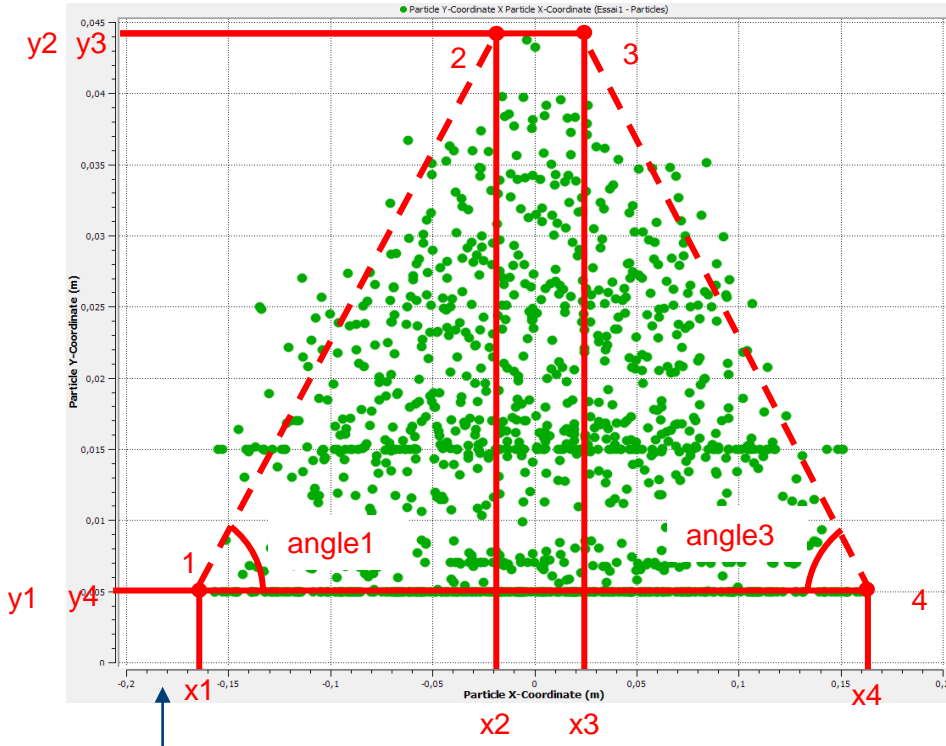
Caractérise la résistance au frottement pour les particules une fois que le glissement a débuté

### Distance adhésive et fraction de raideur

Caractérisent l'adhésion des particules du fait de leur humidité

# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Détermination de l'angle à la base du cône

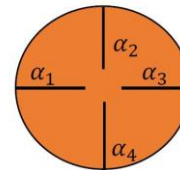


Echelles x et y différentes

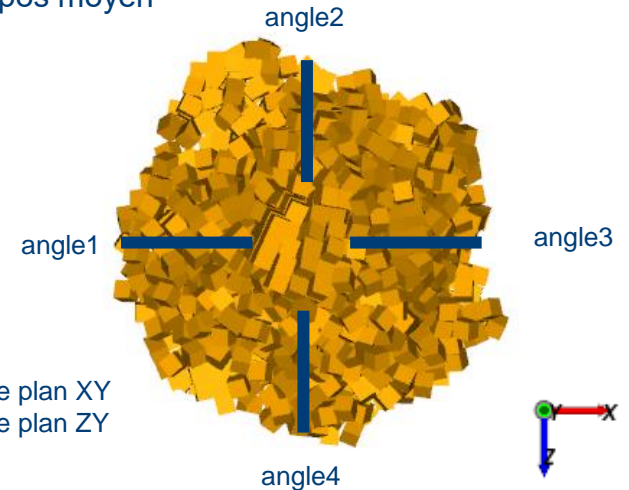
La méthode utilisée est la même que celle utilisée par le client lors de ses essais.

A la fin de la simulation :

- Projection du centre des particules dans les plans XY et ZY
- Détermination des coordonnées des 4 points dans chacun des plans
- Calculs des 4 angles de repos
- Calcul de l'angle de repos moyen

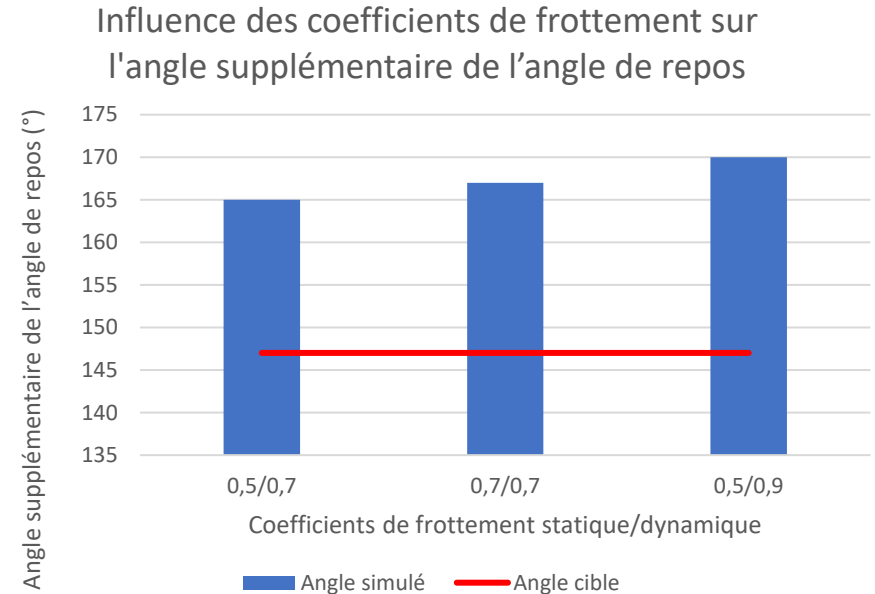
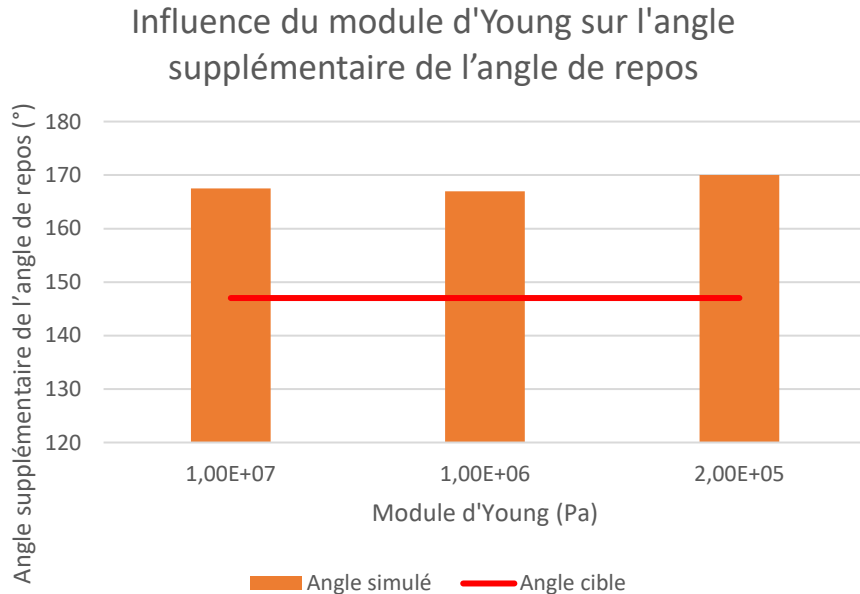


angles 1 et 3 dans le plan XY  
angles 2 et 4 dans le plan ZY



# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Résultats: Paramètres peu influents



Le module d'Young a peu d'impact sur l'angle de repos, la valeur fixée pour le reste de la calibration est de 200 000 Pa, issue d'une recherche bibliographique<sup>1</sup>.

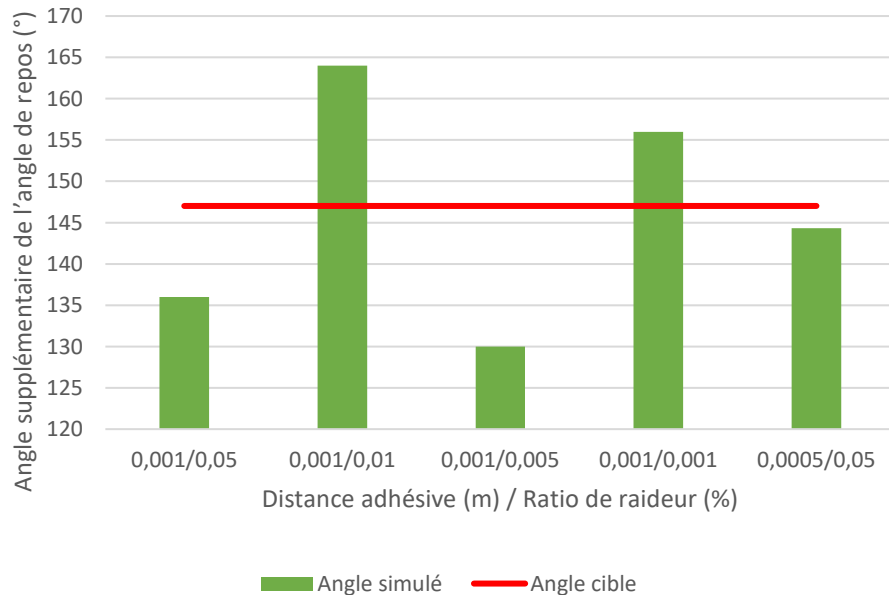
Les coefficients de frottement ont peu d'impact sur l'angle de repos, le couple conservé pour la suite est le couple 0,5/0,9.

Determination of physical and mechanical properties of carrot in order to reduce waste during harvesting and post-harvesting - Ahmad Jahanbakhshi, Yousef Abbaspour-Gilandeh, and Tarahom Mesri Gundoshmian - Journal of Food Science and Nutrition  
 Young's Modulus and Poisson's Ratio Changes in Japanese Radish and Carrot Root Tissues during Boiling - Yukiharu Ogawa, Motoki Matsuura & Nami Yamamoto - International Journal of Food Properties

# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Résultats: Paramètres influents

Influence de la distance adhésive et fraction de raideur sur l'angle supplémentaire de l'angle de repos



- La distance adhésive et la fraction de raideur sont les paramètres les plus influents. Le couple (0,5mm / 5%) aboutit à l'angle de repos le plus proche de la mesure expérimentale.
- La distance adhésive correspond au seuil au-delà duquel l'effort d'adhésion disparaît
- La fraction de raideur définit la raideur du ressort virtuel utilisé pour modéliser la force d'adhésion



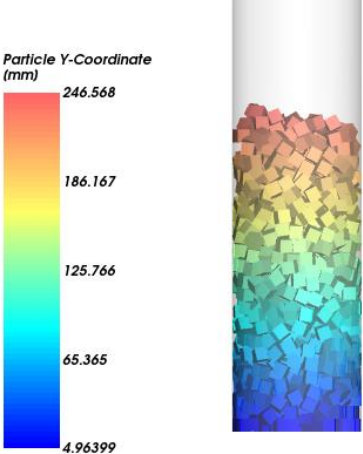
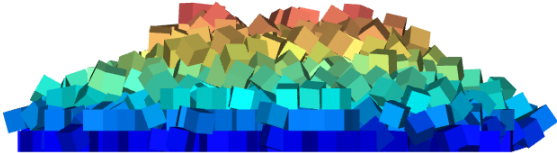
# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

## Jeux de paramètres conservés :

Les recherches bibliographiques soulignent une forte variation du module d'Young selon la teneur en eau des carottes. Le modèle d'adhésion utilisé étant basé sur la raideur des particules, les coefficients d'adhésion ont donc été adaptés proportionnellement.

Paramètre		Valeur déterminée Option 1	Valeur déterminée Option 2
Module de Young		200 000 Pa	1 500 000 Pa
Coefficient de frottement statique	particules/frontières	0,5	0,5
	particules/particules	0,9	0,7
Coefficient de frottement dynamique	particules/frontières	0,5	0,5
	particules/particules	0,9	0,7
Distance adhésive		0,5 mm	0,5 mm
Fraction de raideur		5%	0.04%

# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

	Hauteur de remplissage du cylindre	Angle supplémentaire de l'angle repos
Mesure expérimentale	23,5 cm	147°
Simulation	24,7 cm	147°
		
Ecart relatif	5%	0,3%

# Rocky Calibration Suite: Application à des particules de carottes

Essai



Simulation sous Rocky 4.4



# CADFEM

La simulation est plus qu'un logiciel

QUESTIONS?

[www.cadfem-france.fr](http://www.cadfem-france.fr)

[contact@cadfem.fr](mailto:contact@cadfem.fr)

04 37 29 21 19



**CADFEM**  **Ansys**

