

MODÉLISATION DES PROCÉDÉS GRANULAIRES

MODÉLISATION DES PROCÉDÉS GRANULAIRES

P. Pizette⁽¹⁾

(1)



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

O. Bonnefoy⁽²⁾

(2)



MINES
Saint-Étienne
Une école de l'IMT

C. Gatumel⁽³⁾

H. Berthiaux⁽³⁾

(3)



IMT Mines Albi-Carmaux
École Mines-Télécom

J-M Lopez-Cuesta⁽⁴⁾

(4)



IMT Mines Alès
École Mines-Télécom

SOMMAIRE

1. MILIEUX GRANULAIRES
(PRÉSENTATION)
2. PROCÉDÉS GRANULAIRES
(DES DISPOSITIFS VARIÉS À DIFFÉRENTES ÉCHELLES)
3. MODÉLISATION
(PLUSIEURS OUTILS DE SIMULATION NUMÉRIQUE)
4. CAS D'ÉTUDES DANS DIFFÉRENTES ÉCOLES
5. PERSPECTIVES
(PLACE DE LA MODÉLISATION COMME UN OUTIL DE R&D)

MILIEUX GRANULAIRES PRÉSENTATION

ENERGIE NUCLEAIRE



Céramiques

ENERGIE CARBONE



Fossiles

CHIMIE



Polymères
Composites

SANTE



Organiques

CONSTRUCTION



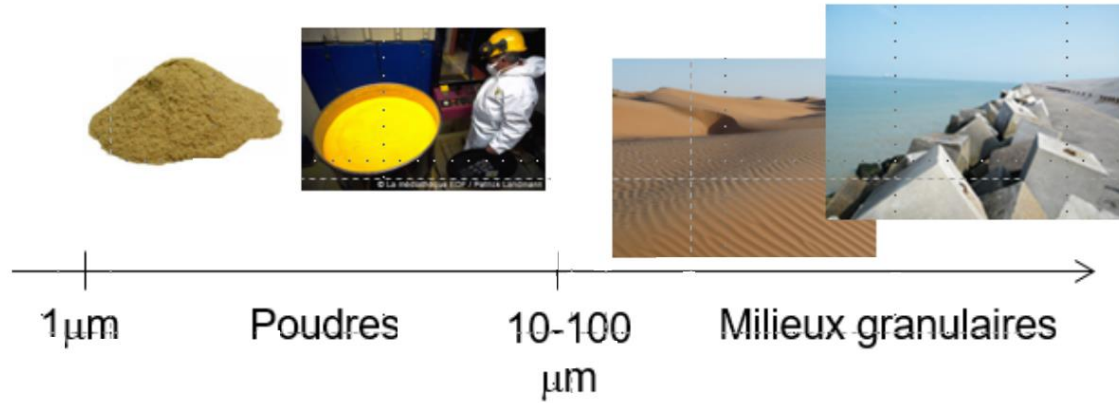
Ciments

MATERIAUX



Métaux

Etat granulaire : 50% des produits vendus dans le monde
(dizaines de milliards de tonnes / an)



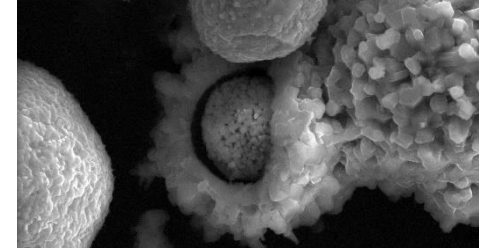
P & MG : collection de particules solides macroscopiques (Duran, 1997)



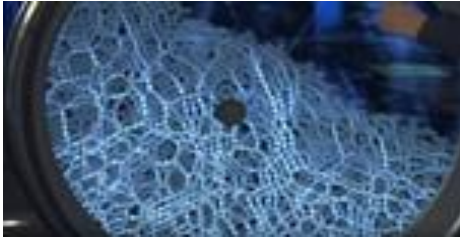
Dilatance de Reynolds



Ségrégation



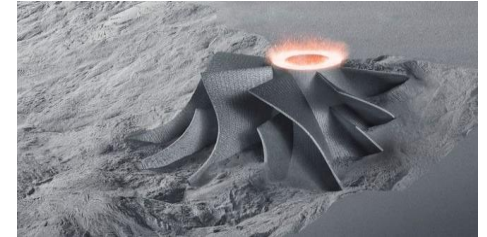
Surface spécifique
—> réactivité chimique



Chaînes de forces



Bandes de cisaillement



Thermique



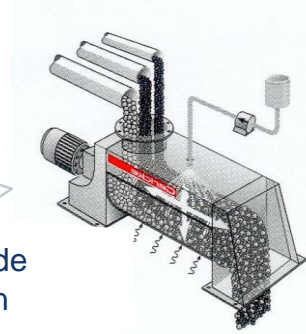
Échelle mésoscopique
Coefficient de friction,
cohésion



Ecoulements

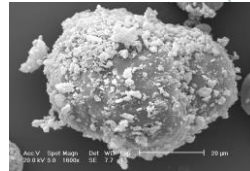
Microstructure

Mécanismes de transformation

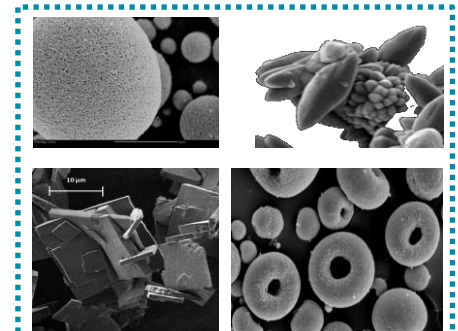
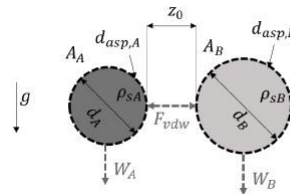


Échelle macroscopique

Technologie
Paramètres opératoires



Échelle des particules
Taille, forme
Interactions entre grains



Des morphologies variées








PROCÉDÉS GRANULAIRES DES DISPOSITIFS VARIÉS À DIFFÉRENTES ÉCHELLES



FABRICATION ADDITIVE



FOUR TOURNANT

	Agitation mélange	Réaction solide-gaz	Transport Stockage	Compression	Frittage	Broyage fragmentation	Granulation – agglomération
							
Albi	X	X		X		X	X
Saint-Etienne	X	X	X	X	X	X	
Alès	X			X	X	X	
Douai			X	X		X	

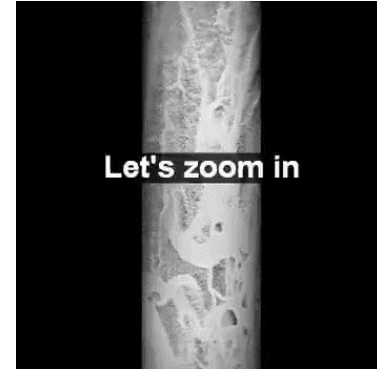
Des phénomènes difficiles à contrôler : ségrégation, mottage, fragmentation, agglomération, ...

Matériaux, petite échelle (qqs grains \rightarrow cm³)

- géométrie (sphérique, polyédrique)
- lois de contact
- réactivité chimique des grains et des interfaces
- ...

Procédés, échelle moyenne à grande (dm³ \rightarrow m³)

- taille du système
- nature des sollicitations (mécanique, thermique, chimique, ...)
- instrumentation in-situ
- ...



... qui rendent nécessaire une étude à des échelles intermédiaires ou le recours à des géométries simplifiées

Caractérisation des poudres



Rhéométrie



Zétamétrie



Turbidimétrie



ATG-DSC



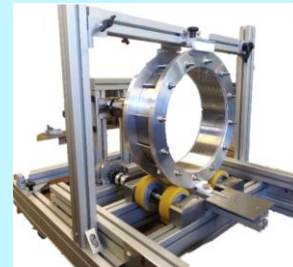
Adsorption

Transformation chimique

(réaction solide-gaz)

Tambour tournant

batch (1-10 kg)
25°C, 3 bars



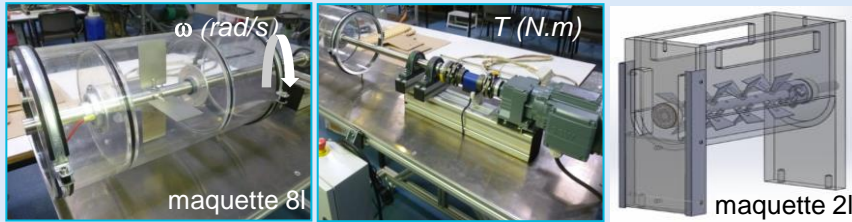
Four tournant

continu (1-10 kg/h)
1450°C



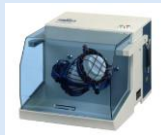
Agitation et mélange de poudres

- ✓ Conception de maquettes réduites et instrumentées de mélangeurs industriels pour la compréhension des mécanismes d'agitation et de mélange



- ✓ Scale-up de mélangeurs de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle

Recherche d'invariants
Homogénéité
Mélangeurs Turbula®



Laboratoire 2l
Modèle T2F



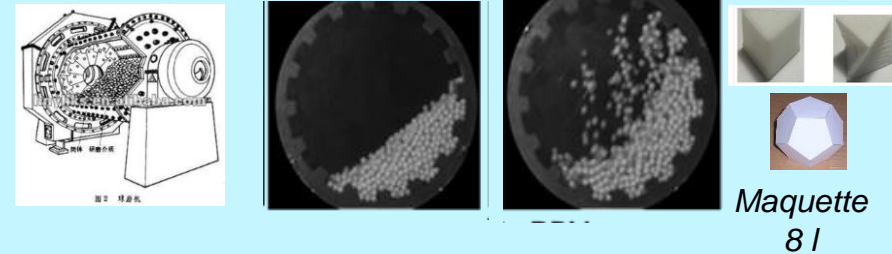
Pilote 17l
Modèle T10B



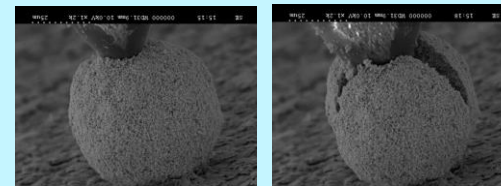
Industriel 55l
Modèle T50A

Broyage / Fragmentation

- ✓ Modèle réduit de procédé / Forme simplifiée des particules



- ✓ Fragmentation à l'échelle du grain



Agglomérat de poudre

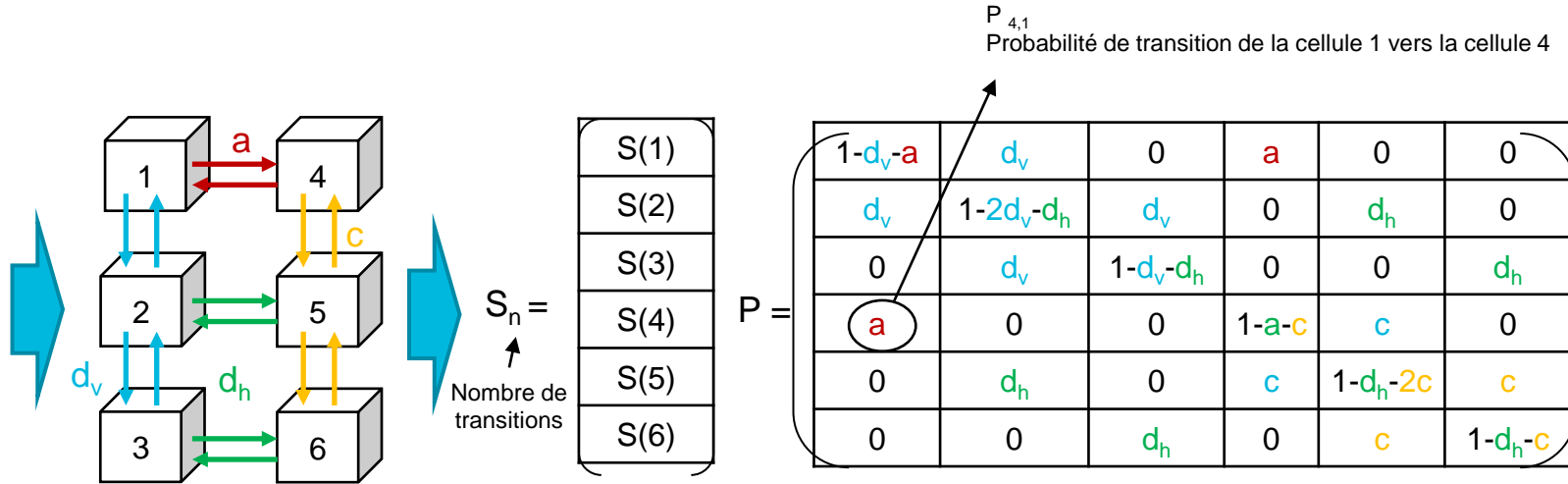
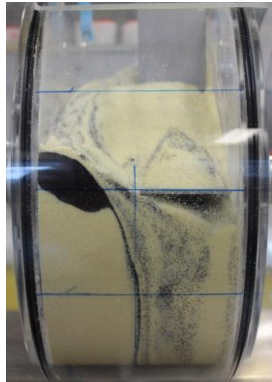


Granulat de ballast

MODÉLISATION

PLUSIEURS OUTILS DE SIMULATION NUMÉRIQUE

Les chaînes de Markov

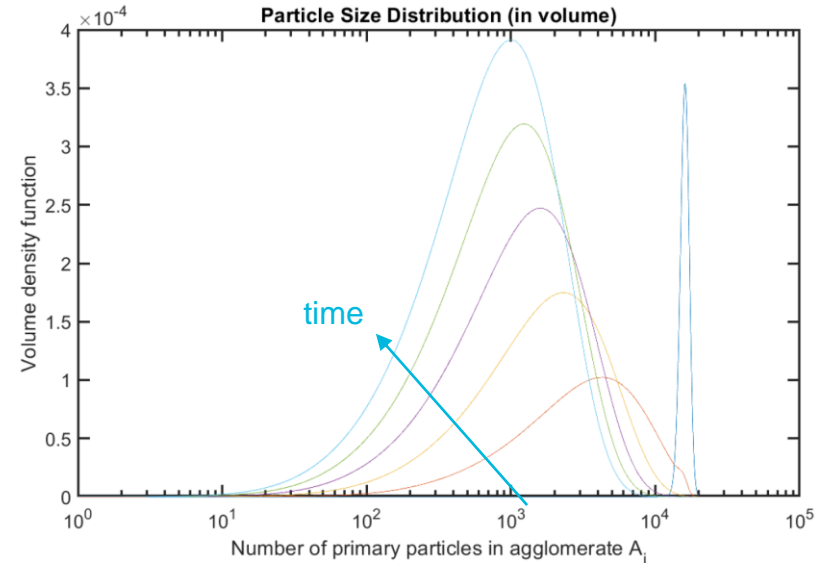
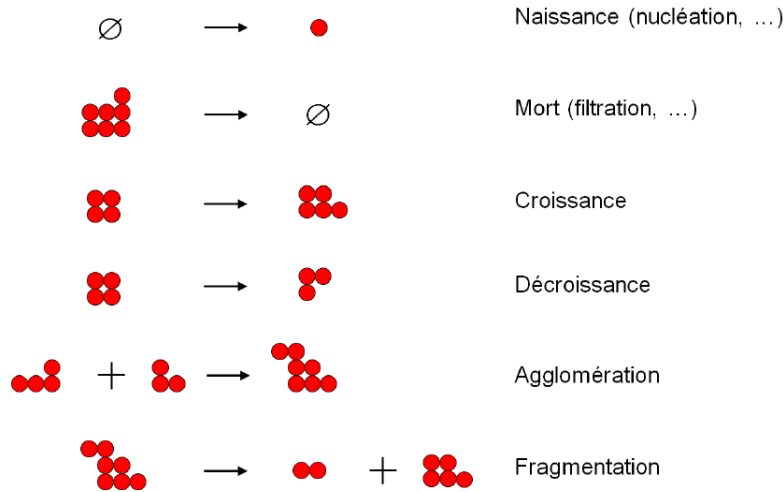


Vecteur d'états
fractions massiques

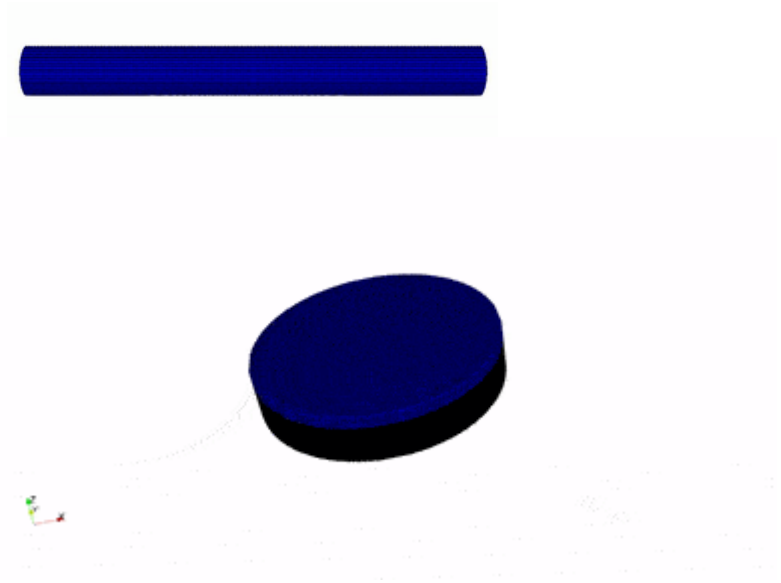
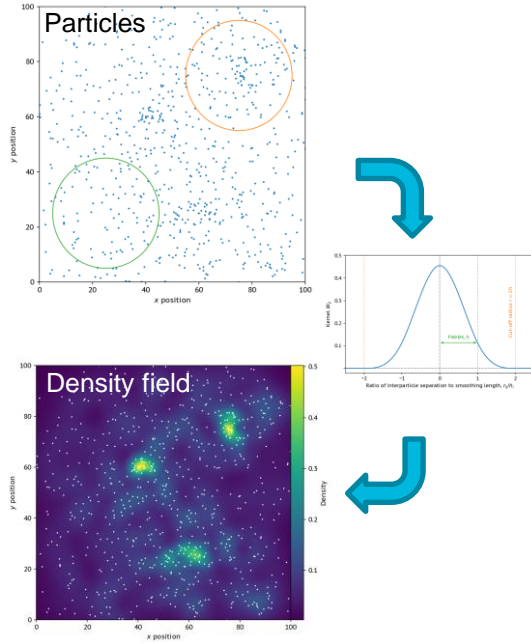
Matrice de transitions
probabilités

$$S_n = P S_{n-1}$$

Les bilans de population (PBM)



La SPH les écoulements fluides à interface libre

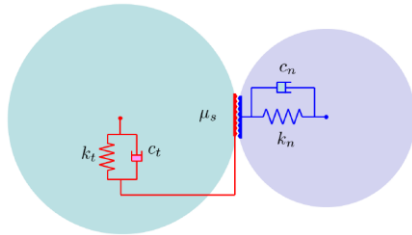


Production de gouttelettes à partir d'un cylindre liquide ou d'une nappe
Couplage possible avec la thermique (fusion – solidification)

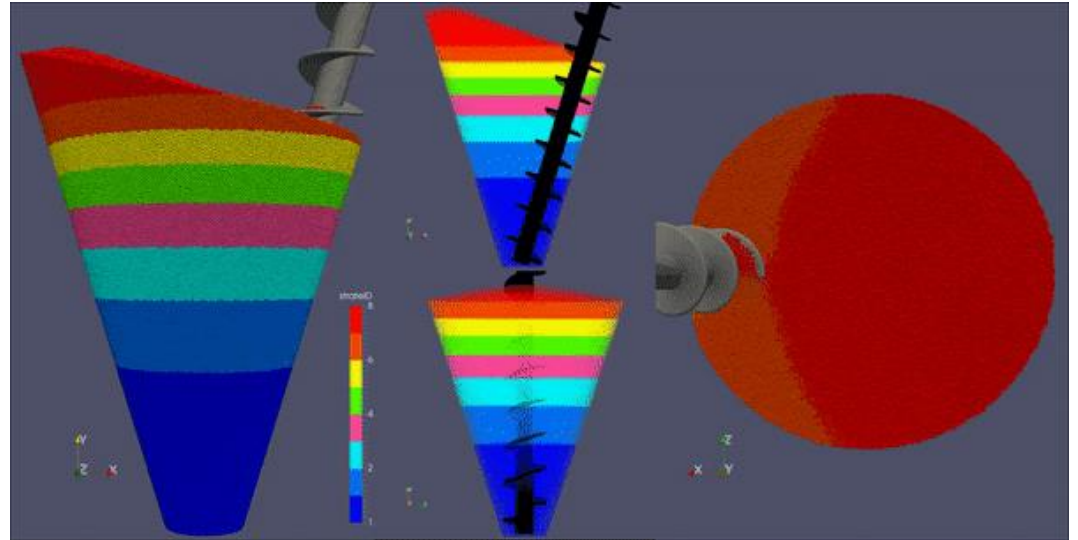
La DEM = Méthode des Éléments Discrets

Principe = calcul de la trajectoire
de chaque grain

$$\sum \vec{F} = m \vec{a}$$

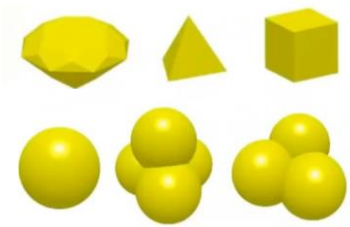


Max 10 millions de grains
cluster HPC, long temps de calcul
Calibration des paramètres à soigner

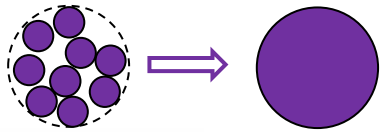


Exemple: homogénéisation dans un mélangeur conique à vis

La DEM = Méthode des Éléments Discrets (variantes)



Prise en compte
de la morphologie,
des forces à distance (van
der Waals, électrostatiques
ou électromagnétique)



Coarse graining



Ecoulement dans
une trémie



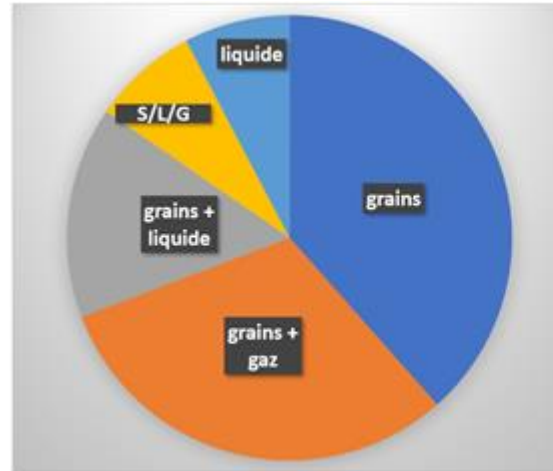
Refroidissement dans lit à jet
(couplage fluide et thermique CFD)

CAS D'ÉTUDE DANS LES DIFFÉRENTES ÉCOLES

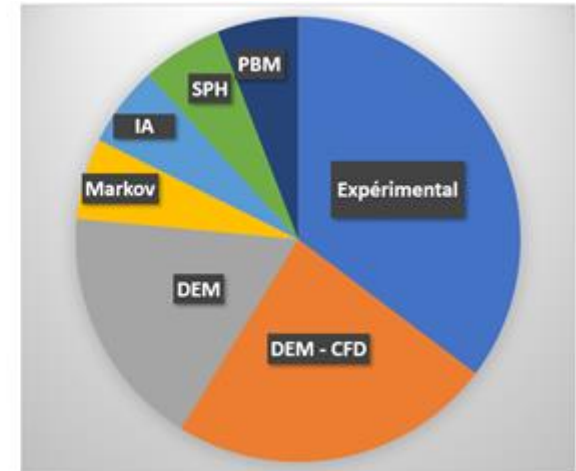
13 projets : 8 thèses, 3 post-docs, 2 stages M2

- ◆ Mélange de poudres
- ◆ Vibrations
- ◆ Fragmentation poudre
- ◆ Atomisation métal liquide
- ◆ Atomisation suspension S/L
- ◆ Écoulement grains
- ◆ Écoulement grains + 1 ou 2 fluides
- ◆ Séchage
- ◆ Transferts thermiques
- ◆ Oxydation

Systèmes étudiés



Approches



20% des projets ont une composante « Expérimentale »
45% des projets ont une composante DEM

...

Axes de développement

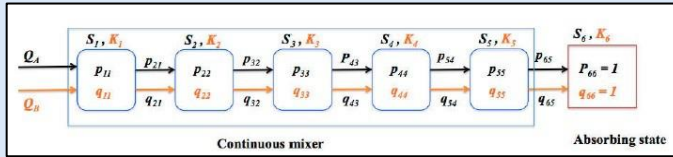
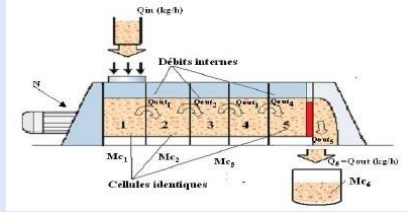
- ◆ Modélisation State-of-the-art
- ◆ Méthodes d'accélération de temps de calcul (hardware + modèles et post-processing)
- ◆ Incorporation de la cinétique chimique
- ◆ Scale-up
- ◆ Validation expérimentale
- ◆ Consolider la plateforme « Powders and Grains »
 - ◆ caractérisation
 - ◆ prototypes
 - ◆ aide à la conception

...

Show case = jumeau numérique d'un four tournant

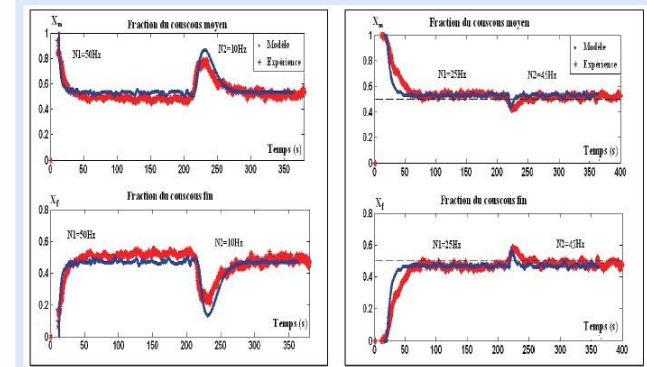
- ◆ Applications : recyclage catalyseurs, batteries, terres rares
- ◆ Multi-physique
- ◆ Viser le temps réel
- ◆ Rétro-action : capteurs fours → modèle → consigne





- Chaînes non homogènes et non linéaires : couvrent les phases transitoires
- Identification expérimentale des probabilités de transition à partir des masses retenues (intègre les phénomènes mésoscopiques)

Simulation d'une situation courante



50 à 10 Hz

25 à 45 Hz

Thèse Chawki Ammarha (2010)
Thèse Xiaojuan Zhao (2012)

**Obtention en temps réel
de données
macroscopiques à large
échelle**

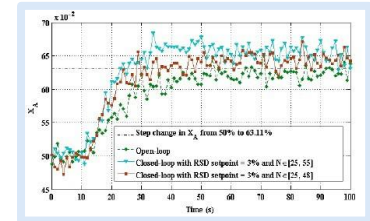
Contrôleur PID réglé à partir de modèle

Cas d'étude

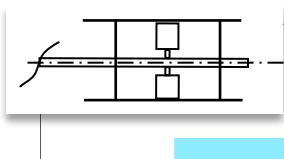
- Débit total 32,4 kg/h
- Teneur en couscous fin perturbée
- 0,5 à 0,63

Avec et sans régulation

- Comparaison teneur moyenne
- Comparaison CV



- ✓ Modèle sous forme de relation de procédé

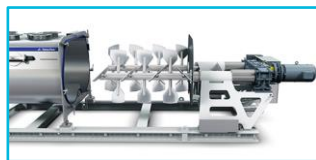


$$N_p = aFr^b$$

Legoix et al., 2017

$$N_p = \mu_{eff} \frac{H}{L} \frac{S}{L^2} Fr^{-1}$$

- ✓ Etude de l'agitation du mélangeur industriel à l'échelle du laboratoire, design et scale-up des mélangeurs



3500 l



2 – 60 l



2 l



8 l



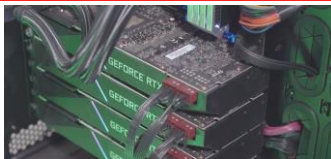
Prévoir les efforts appliqués sur les pales à partir d'une mesure en laboratoire ?

Application en mélangeur à double arbre à pales et changement d'échelle

Thèse Hayfa Boussoffara



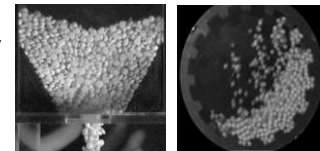
DEM et SPH sous cartes graphiques GPU



N. Wilke
N. Govender
J. Joubert

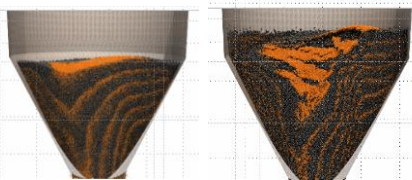
Laboratoire granulaire

(Maquette échelle réduite / Caméra HV / Scan 3D / Xray microtomo/ caractérisation milieux granulaires)



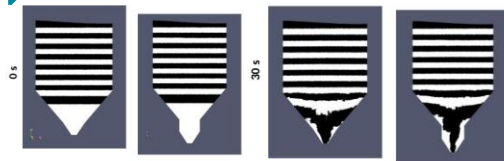
Écoulement aux grandes échelles

Silo stockage (centrale à béton)



BlazeDEM

Effet de la cohésion



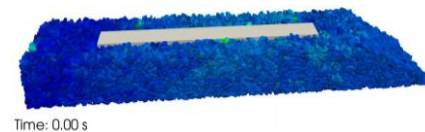
Forme des trémies

(Echelle 1 - ~ dizaine de millions de particules)

→ Validation & calibration des modèles (DOE)

Effet de forme des particules

Voies ballastées ferroviaires



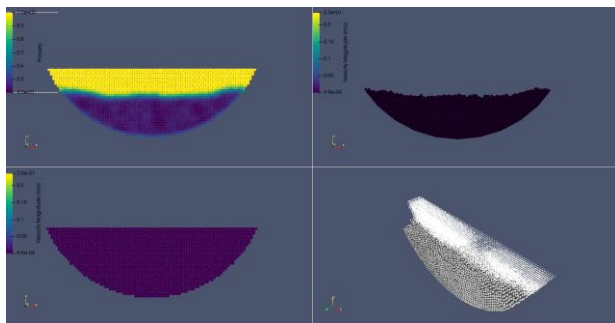
Time: 0.00 s

BlazeDEM

Couplage fluide/grain

DEM/SPH avec calculs HPC GPU

(Thèse J. Joubert 2021)

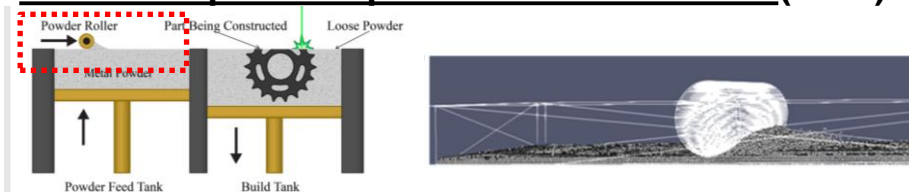


→ Code de calculs FastParticle

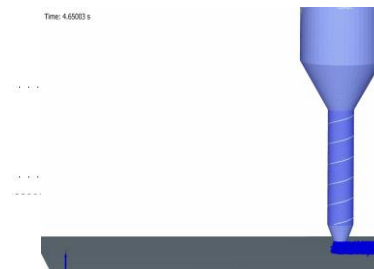


Procédés avancés : Fabrication additive

Étalement poudre : procédé SLS/SLM/MJF (DEM)



Impression 3D de mortier (DEM) (Interreg CIRMAR)



Formation : Cours en ligne MOOC IMT

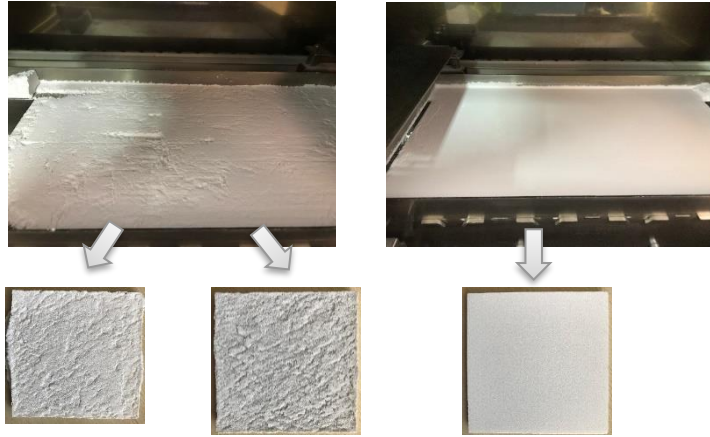
IMT Nord Europe / INSiC / Sigma
Clermont / Industriels
→ Plateforme MOOC Coursera.org

coursera

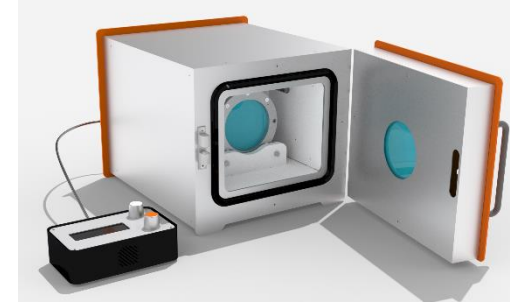
Parcourir > Sciences physiques et ingénierie > Génie mécanique



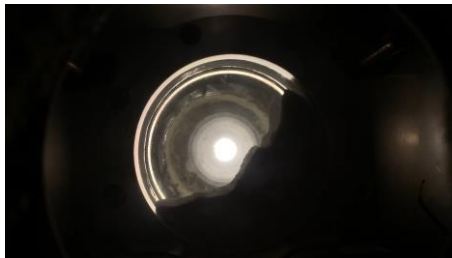
Fabrication additive :
l'impression 3D dans
l'industrie



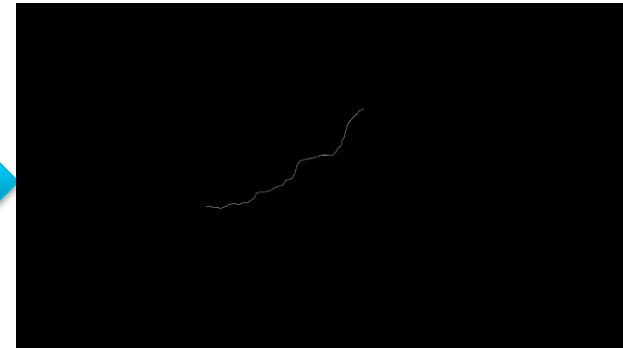
- Modification de l'écoulement des poudres lors de l'ajout d'aditifs (RFs, Charges, fibres).
- Écoulement peut être fonction de la température.
- Peu de méthodes existantes adaptées au procédé.



- Plus d'autonomie sur les propriétés mesurés
- Contrôle de la température



Contour final



Caractérisation multi-échelle des suspensions minérales et des poudres



Rhéométrie



Zétamétrie

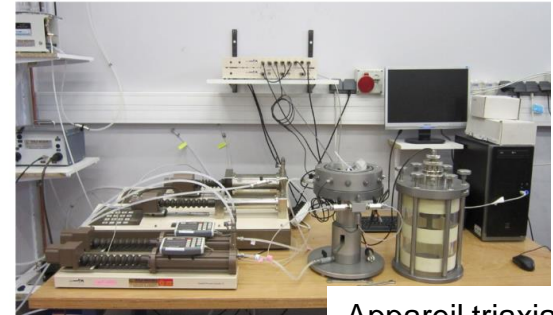
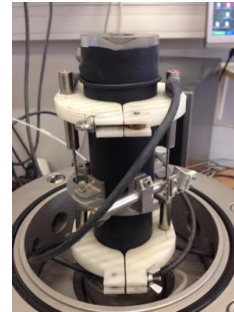


Adsorption



Turbidimétrie

Caractérisation des milieux granulaires et modélisation



Appareil triaxial

- Essais mécaniques (Essais triaxiaux- Cisaillement direct- Compression)
- Essai œdométrique
- Modélisation FEM (théorie de la consolidation, poromécanique)

PERSPECTIVES

PLACE DE LA MODÉLISATION COMME UN
OUTIL DE R&D

Modèle et technicité

Calcul haute performance

Simulation multi-échelle

Couplage de modèles

Application R&D

Fabrication additive
à base poudre

Conception des
procédés

Formulation des
poudres

Optimisation
des procédés

Jumeau numérique

Diffusion des connaissances et compétences

Degré de technicité des
utilisateurs

Outils métiers

Formation



IMT Mines Albi
Laboratoire RAPSODEE
Cendrine GATUMEL
cendrine.gatumel@mines-albi.fr



IMT Mines Alès
Centre des Matériaux (C2MA)
José-Marie LOPEZ-CUESTA
jose-marie.lopez-cuesta@mines-ales.fr



Mines Saint Etienne
Centre SPIN
Olivier BONNEFOY
bonnefoy@emse.fr



IMT Nord Europe
CERI Matériaux et Procédé
Patrick PIZETTE
patrick.pizette@imt-nord-europe.fr

