



**MINES**  
**Saint-Étienne**

Une école de l'IMT

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES

# Simulation numérique des milieux granulaires

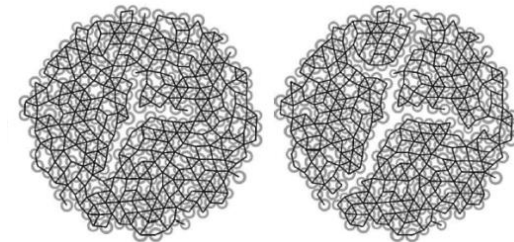
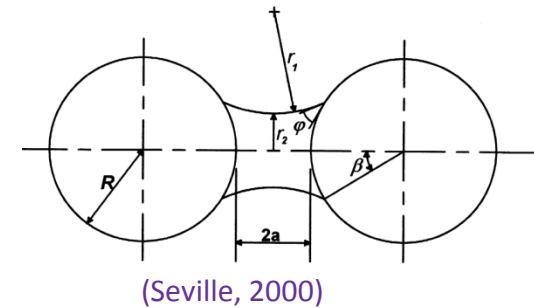
Sylvain MARTIN



INSPIRING  
**INNOVATION**  
SINCE 1816

# Contexte scientifique

- **Comportement dirigé par les interactions locales**
  - **Agglomération et défluidisation**
    - Forces de Van der Waals
    - Ponts capillaires
    - Cous solides (frittage)
  - **Rupture des milieux granulaires**
    - Hétérogénéité des contraintes
    - Rupture du contact



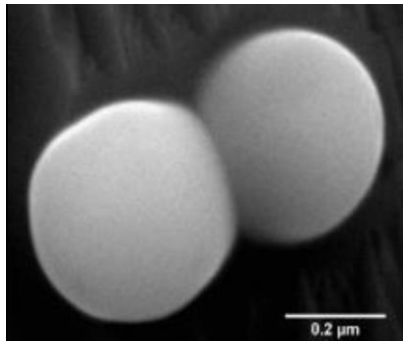
(Delenne, 2004)

Phénomène local → Conséquence globale

# Contexte scientifique

## De la particule au procédé

Physique :  
Échelle du contact

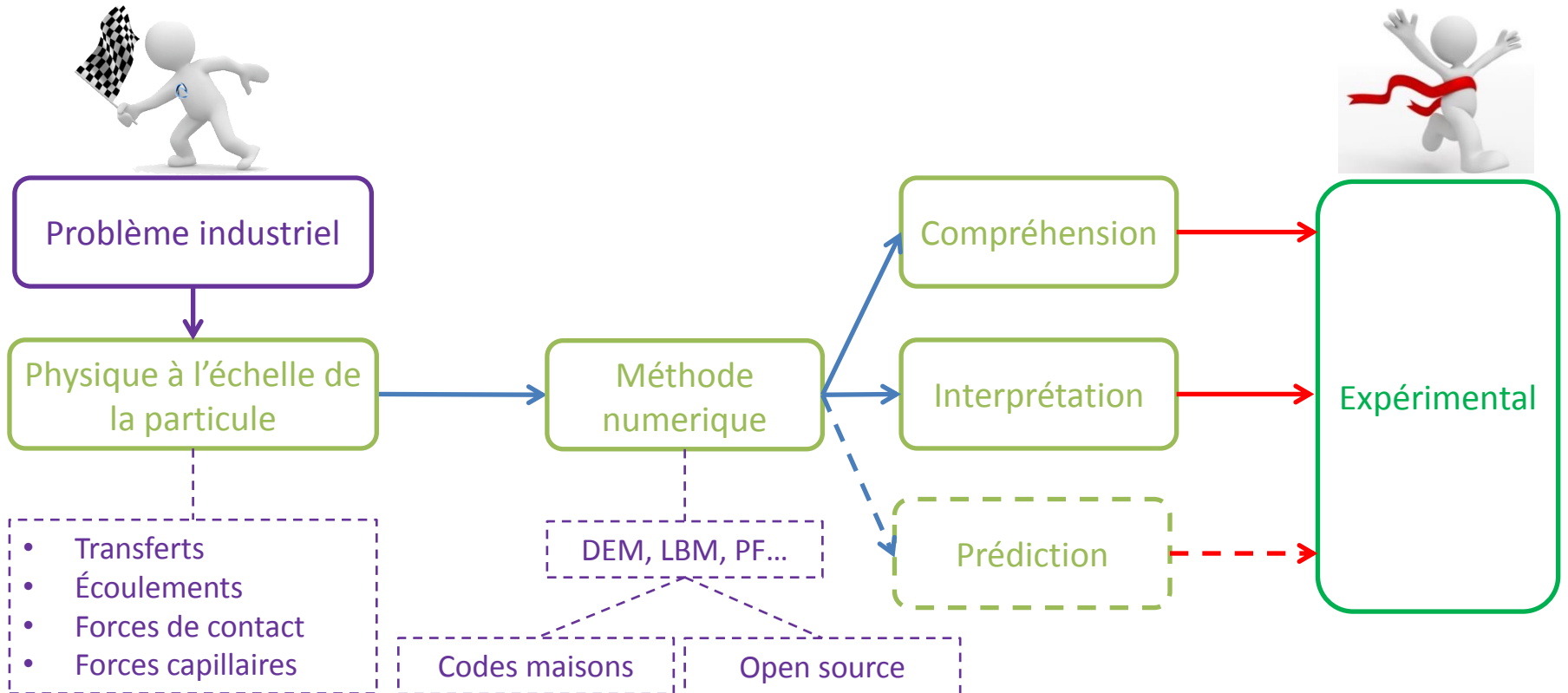


Simulation  
numérique

Échelle d'intérêt :  
Échelle du procédé

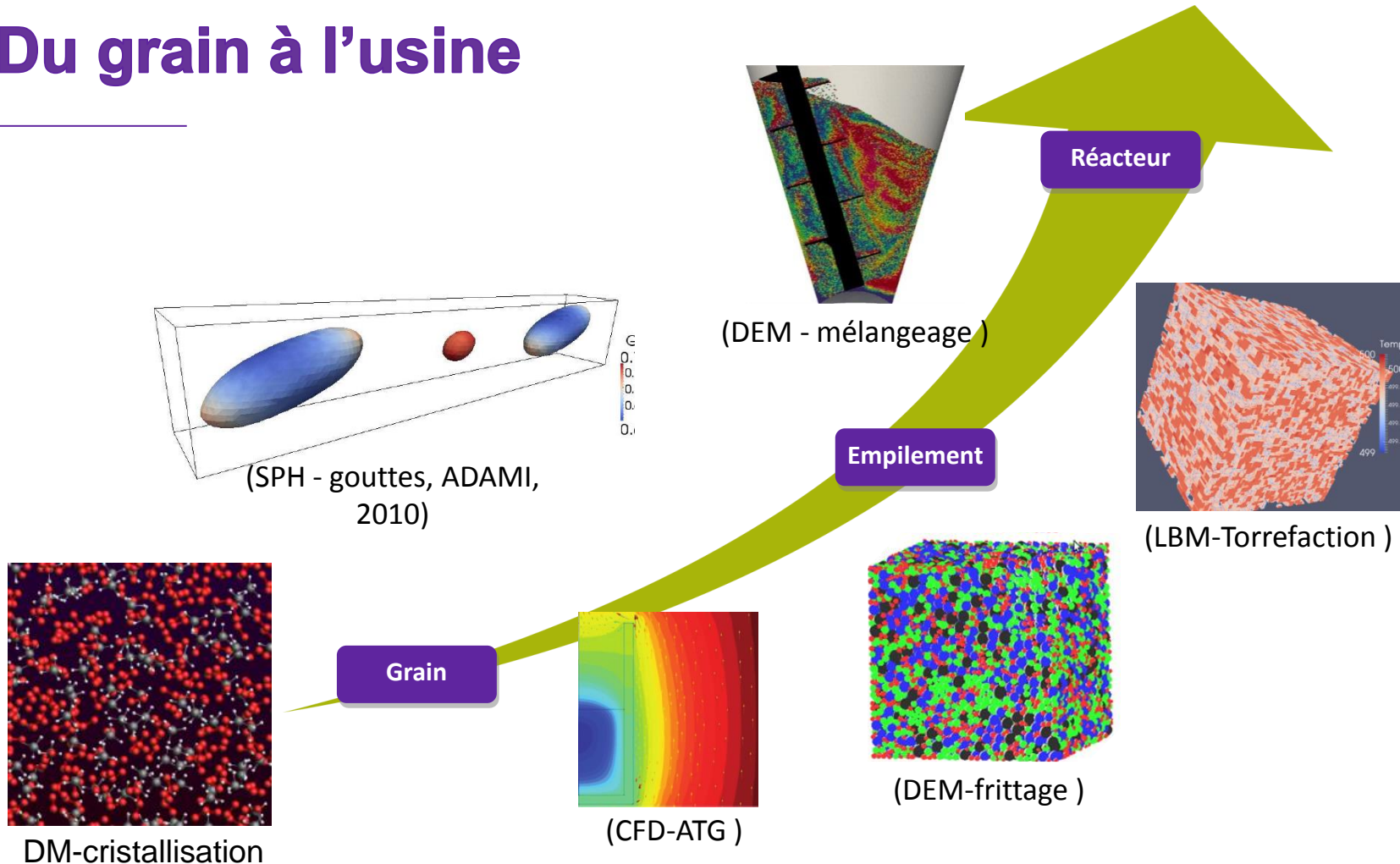


## Démarche de simulation



# Le paysage numérique à SPIN

## Du grain à l'usine



## Trois méthodes phares

Éléments Discrets



Rhéologie des poudres, (FT4, Freeman)

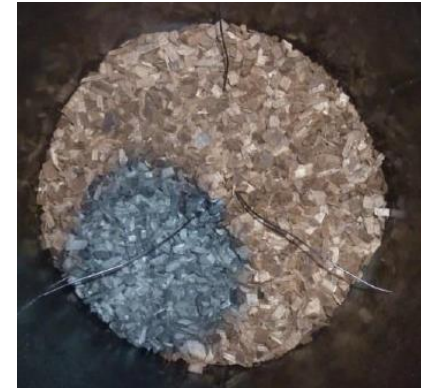


Mélangeur conique à vis, (Nautamix)



Suspensions

LBM



Écoulements réactifs en milieux poreux, (Evangelista, 2017)

SPH



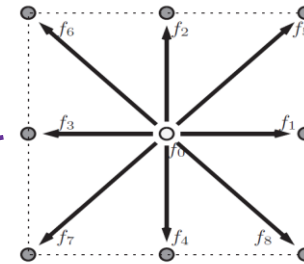
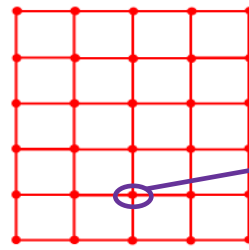
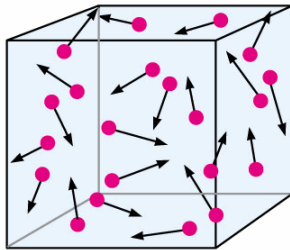
Atomisation (Hilderbrand)



Compaction, (Medel'Pharm)

## Méthode de Lattice Boltzmann (LBM)

- Code TEMPO (développement interne)
- Basé sur la théorie cinétique des gaz



Les 

- Facile à implémenter
- Couplage multiphysique
- Parallélisable

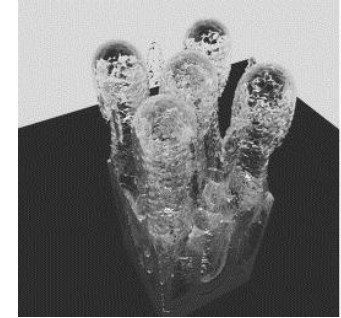
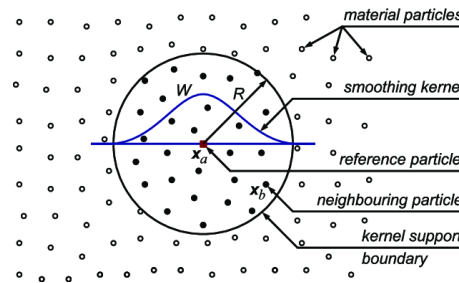
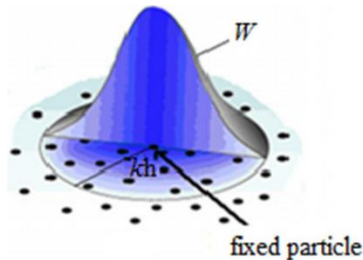
Les 

- Conditions limites
- Estimation d'erreur

→ Simulation des écoulements réactifs en milieux poreux

## Méthode SPH – thèse de S. Geara

- Code universitaire (TU Munchen)
- Méthode CFD lagrangienne



(Rayleigh Taylor, ADAMI, 2013)

Les 

- Suivi des interfaces
- Multiphysique

Les 

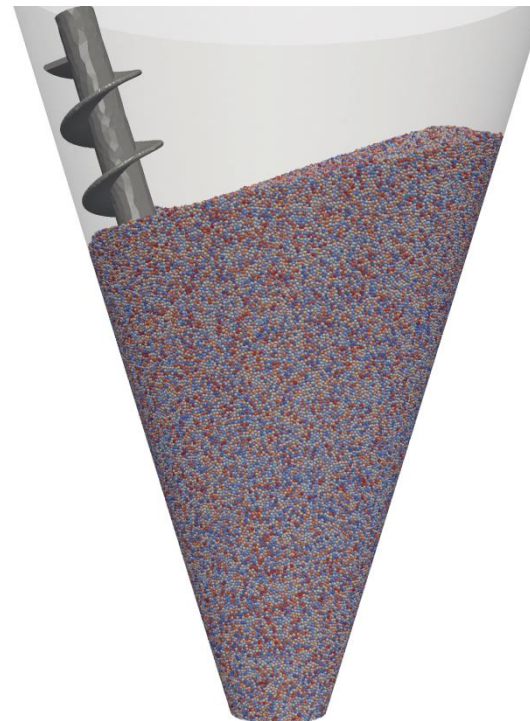
- Temps de calcul
- Conditions aux limites
- Diversité des algorithmes

→ Simulation des écoulements à surface libre (atomisation)



Mélangeage de poudres : vers les  
systèmes réels

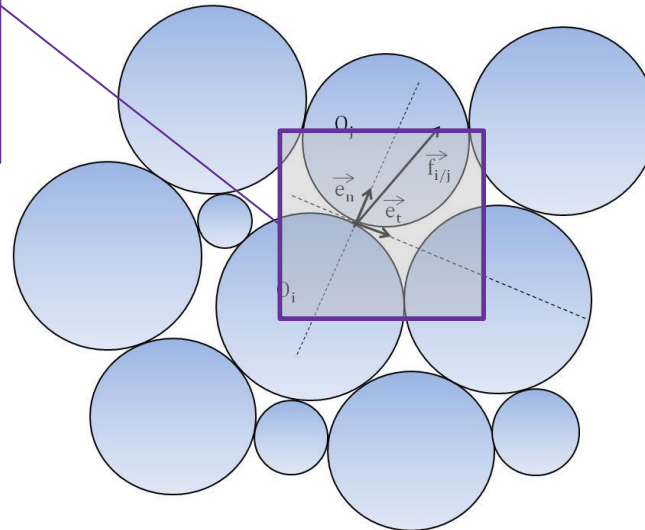
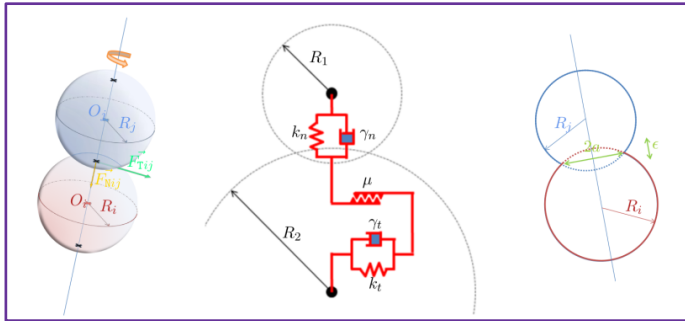
# Simulation d'un mélangeur conique à vis par la méthode des éléments discrets



X .Bednarek  
H. Louati  
O. Bonnefoy

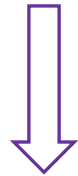
## Méthode des Eléments Discrets (DEM)

- Collection de particules en interaction



Entrée :

- Propriétés physiques des particules



Sortie :

- Vitesses
- Contraintes
- Etat du mélange

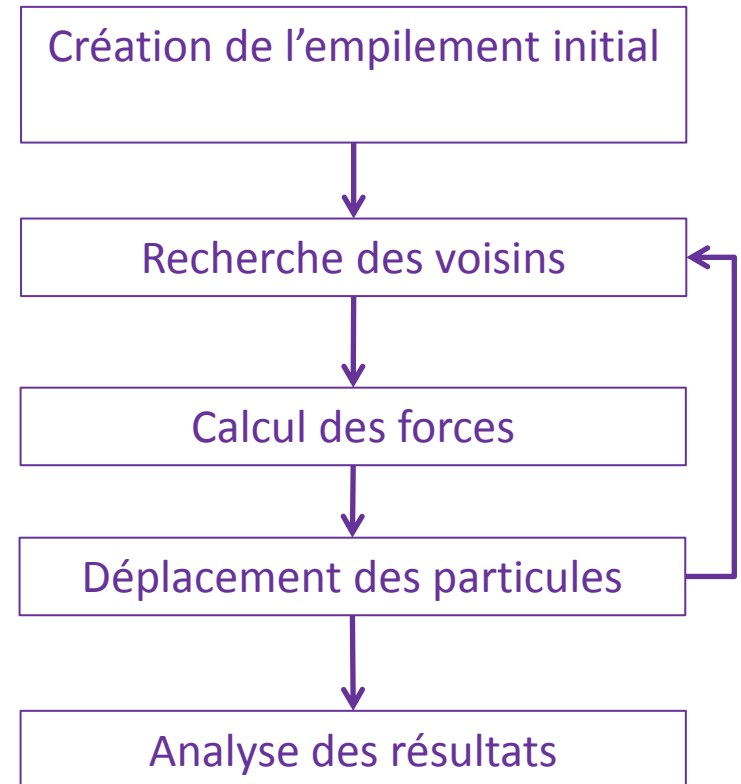
# Mélangeage de poudres : vers les systèmes réels

## DEM

---

### • Forces et limites

- **Représentation simple mais réaliste de la physique**
- **Seule méthode à traiter le milieu 'discret'**
- **Temps de calcul**
- **Choix des paramètres de contact entre les particules**



→ Deux verrous principaux

## Mélangeage de poudres : vers les systèmes réels

# Procédé vs simulation

## Mélangeur

- $10^{11}$  particules
- Formes diverses
- $(R1/R2)_{\max} = 100$

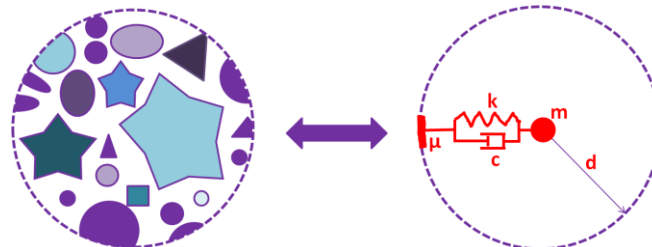
## DEM

- $10^6$  particules max
- Sphères
- $(R1/R2)_{\max} = 10$

Et le calcul intensif ?

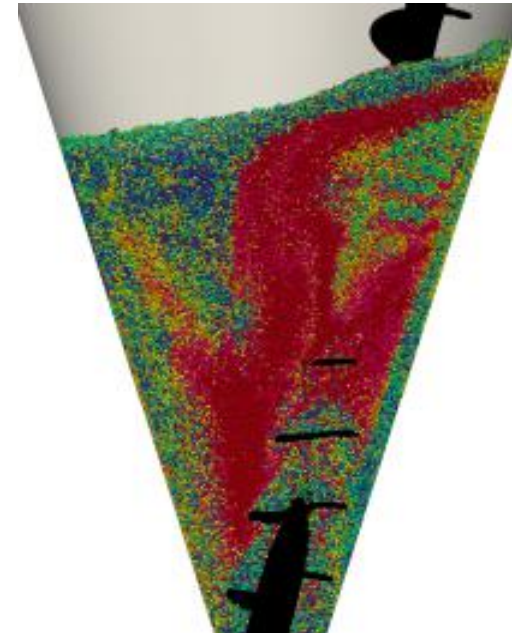
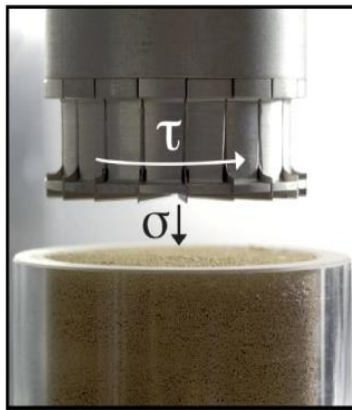
Qu'est ce qu'un grain ?

Que représente une particule DEM ?



## Procédé vs simulation


- 1 grain DEM  $\approx 10^5$  grain réels
- Nombre de particules élémentaire représentatif
- Calibration à partir du comportement vrac



## Procédé vs simulation

- 1 grain DEM  $\approx$  10 grain
- Nombre de particules  $\approx$  10<sup>6</sup> - 10<sup>7</sup> (non représentatif)
- Calibration  $\approx$  10<sup>3</sup> - 10<sup>4</sup> (non représentatif)  $\rightarrow$  vent vrac

Validation expérimentale



*Ceci n'est pas une pipe.*



*Ceci n'est pas le  
mélangeage de poudre*

# Mélangeage de poudres : vers les systèmes réels

## Procédure de simulation

- 19
  - Nombre
  - Calibration
- ...mentale  
...representatif  
...nt vrac

Cinétique de mélangeage

Validation

*Ceci n'est pas une pipe.*

*Ceci n'est pas le  
mélangeage de poudre*

## Procédés de simulation

Ci... ale

- 
- 
- 

# Effet des paramètres procédés

Validation

*Ceci n'est pas une pipe.*

Mélangeage

*Ceci n'est pas le  
mélangeage de poudre*



# Mélangeage de poudres : vers les systèmes réels

**CONFIDENTIEL**

*Ceci n'est pas une pipe.*

*Ceci n'est pas le  
mélangeage de poudre*

## Objectif : simulations aux temps longs

---

- Simulation avec  $10^6$  particules numériques
- 1 tour de vis (30s)  $\approx$  6 jours de calcul (40x2.6GHz)
- **Objectif 30 minutes  $\rightarrow$  Simulation > 4 mois?**

$\rightarrow$  **Proposition : algorithme d'extrapolation**

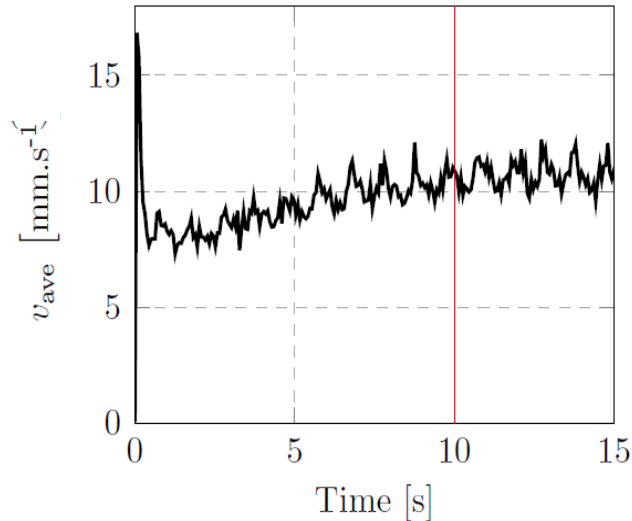
- **Procédé cyclique**
- **Particules (presque) identiques**
- **Milieu dense**



Redde Xavieri quae  
sunt Xavieris

## Algorithme d'extrapolation

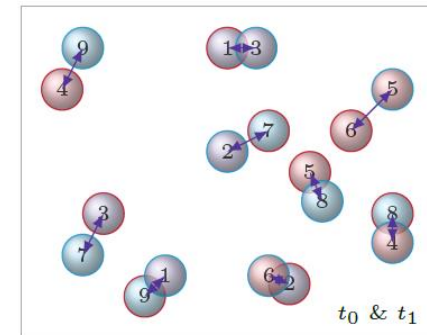
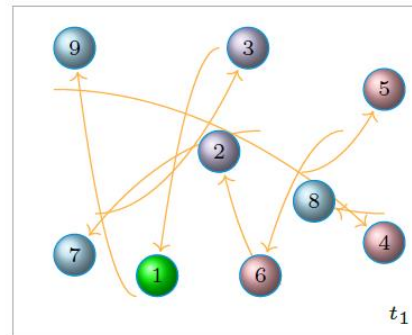
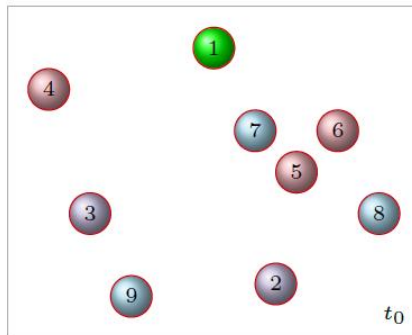
- **Etape 1 : Simulation DEM jusqu'au régime permanent**



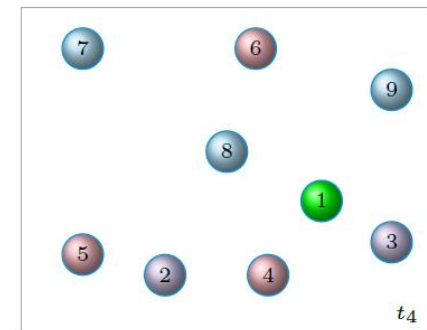
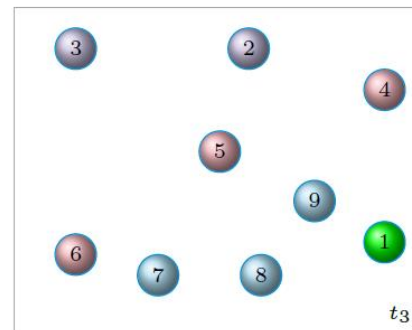
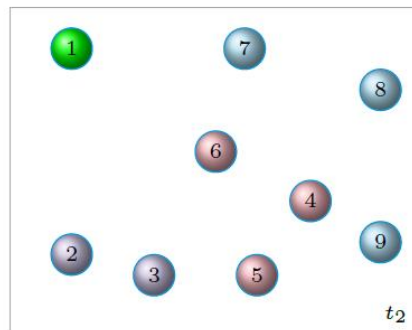
- **Définition des temps  $t_0$  et  $t_1$**

## Algorithme d'extrapolation

- Etape 2 : Appariement des particules entre  $t_0$  et  $t_1$



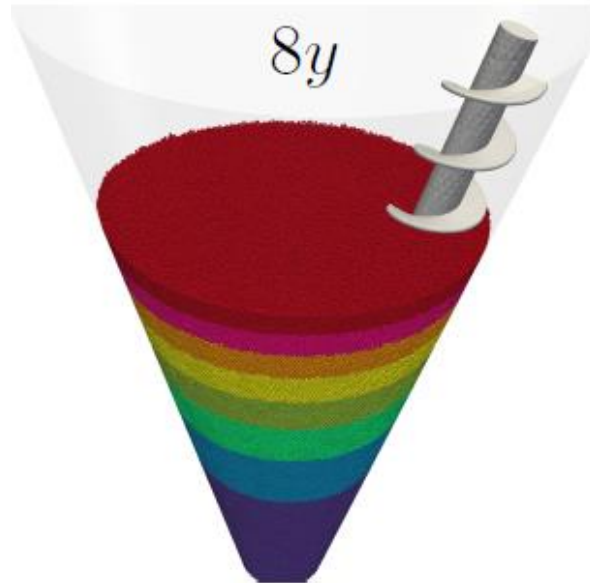
- Etape 3 : Extrapolation des résultats



## Algorithme d'extrapolation

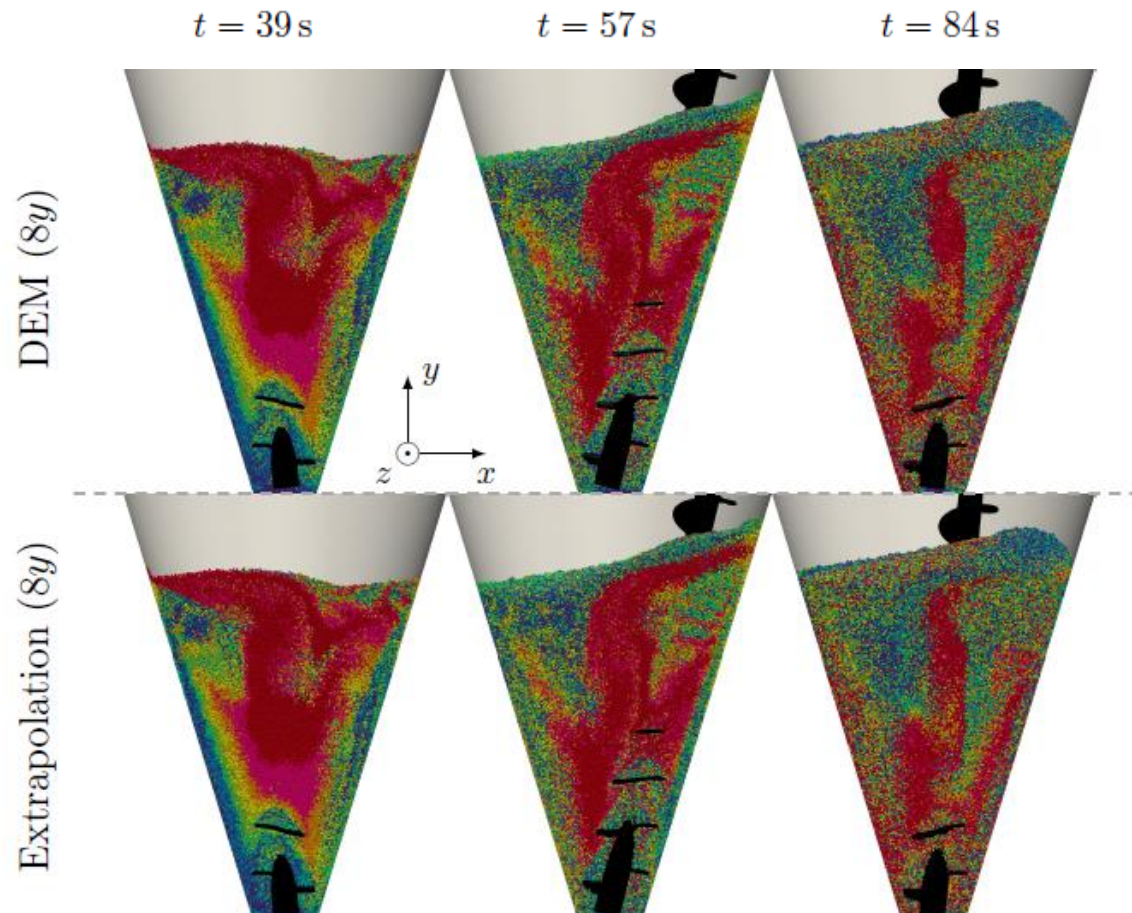
---

- Validation de l'algorithme pour un empilement initial de 8 strates



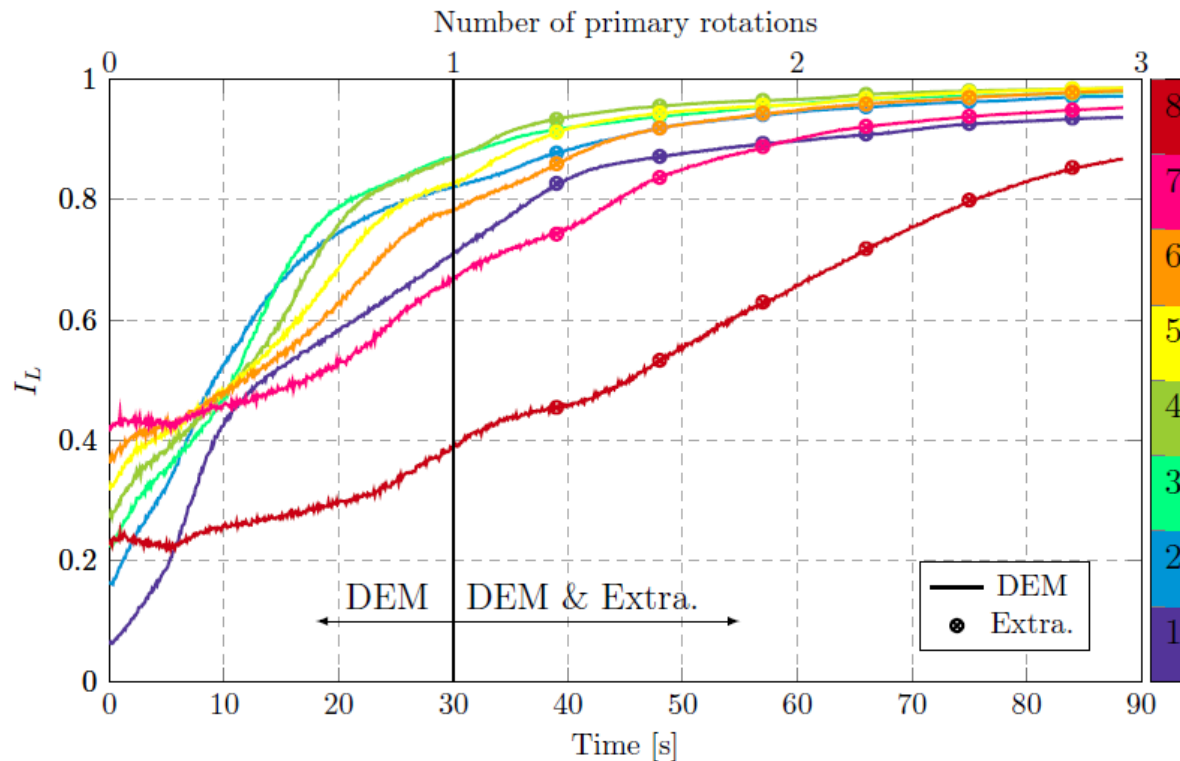
## Algorithme d'extrapolation

- Résultats





## Algorithme d'extrapolation

- Validation : Indice de Lacey



## Algorithme d'extrapolation

- **Les** 
  - Un gain de temps CPU considérable (facteur  $10^5$ )
  - Précision
  - Adaptable à tout système cyclique/périodique
  - Bien adapté à l'étude des paramètres process
- **Les** 
  - Nécessite une simulation DEM initiale
  - Non généralisable pour des particules différentes

→ **D'autres solutions à l'étude pour les systèmes complexes**



# Conclusion

## Simulation numérique & milieux granulaires

- **Un outil indispensable mais limité**
  - Par la représentation physique
  - Par l'échelle du procédé
  - Attention à l'interprétation des résultats
- **Deux axes de recherche**
  - Echelle physique
  - Echelle temporelle
- **Les règles de vie du numéricien**
  - "All models are wrong but some are useful" (G. Box)
  - "Garbage in, garbage out" (someone)





Une école de l'IMT

**Merci  
de votre attention**

