

# Géométrie des granulats et compacité d'un empilement

Camenen Jean-François, I2M-DuMAS (ex LAMEFIP), Talence

**Clôture de l'opération AGREGA**

Ifsttar (centre de Nantes) - Mardi 10 décembre 2013



**IFSTTAR**

«**erema**»

*Le nouvel établissement en marche*

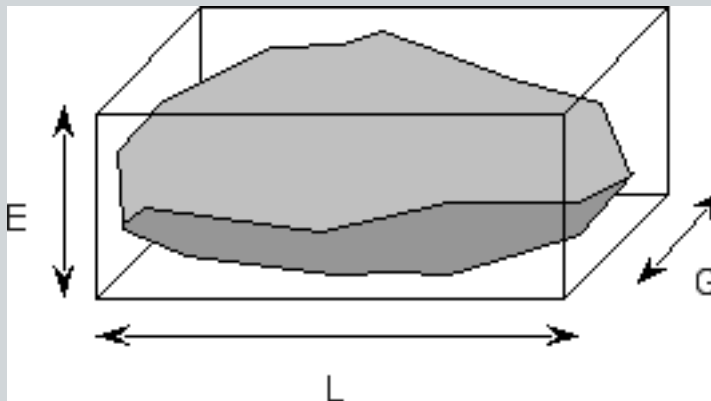
# PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Formulation des matériaux du Génie Civil
- Approche numérique
- Résultats : relations géométrie / compacité
- Conclusions
- Perspectives



# FORMULATION DES MATÉRIAUX DU GÉNIE CIVIL

- Rechercher la compacité maximale et l'état le plus désordonné du squelette granulaire [thèse Ifsttar soutenue le 09/12/11, directeur : Y. Descantes, co-encadrant : N. Roquet]
- Ajuster les caractéristiques géométriques des grains :
  - Granularité [Paute *et al.*, 1994][Caquot, 1937]
  - Angularité [Moreaud, 1969]
  - Forme : facteur d'allongement  $L / G$  et d'aplatissement  $G / E$  [Tourenq *et al.*, 1982][Descantes, 2007]



# FORMULATION DES MATÉRIAUX DU GÉNIE CIVIL

- Respecter les seuils fixés empiriquement [NF P 18-545][SHRP Superpave] :

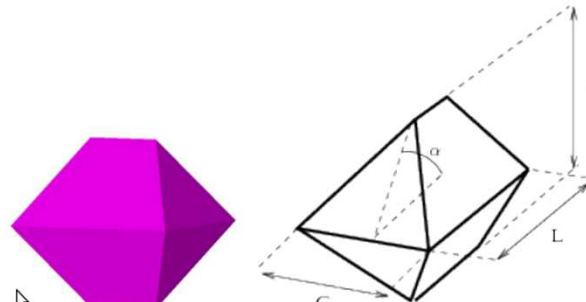
Domaine d'application	Proportions massiques admissibles
Ballast de voie ferrée	6% de longs et 15% de plats
Bétons hydrauliques d'ouvrage d'art	35% de plats
Enrobés de couche de roulement	10% de longs et plats

- **Pertinence de ces seuils vis-à-vis de la compacité maximale ?**



# APPROCHE NUMÉRIQUE

- Objectif : construire des empilements de polyèdres désordonnés avec une compacité maximale
  - Pluviation sans frottement [Roux, 2004][Agnolin *et al.*, 2007]
  - Modèle de granulat :

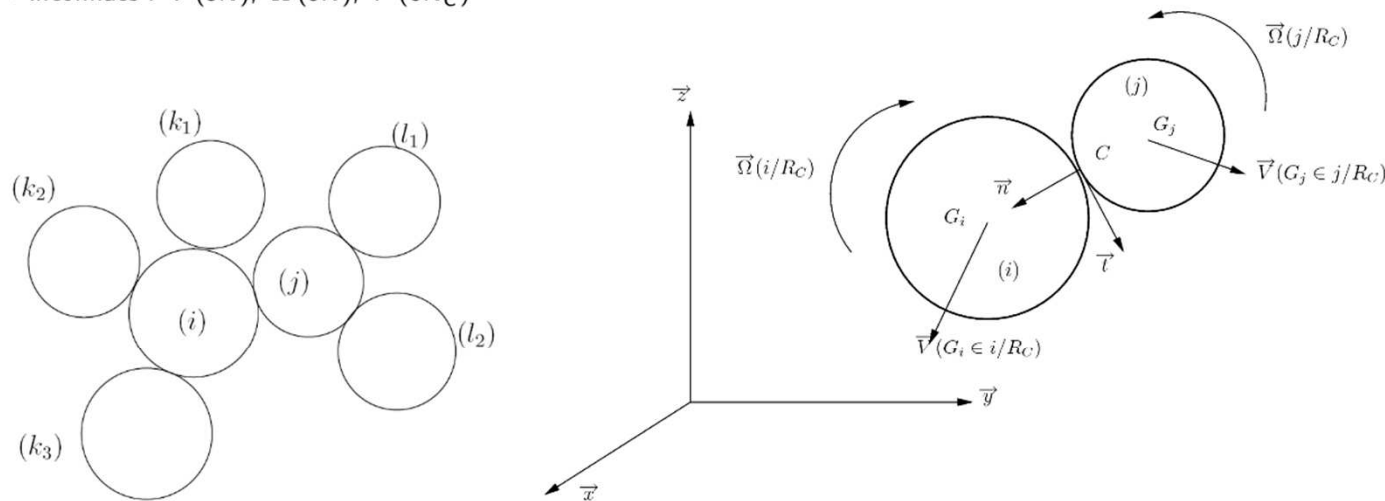
Roches dures	Grains indéformables
Grains roulés	Sphères
Grains concassés	Pinacoïde (polyèdre convexe 8 faces) [Tourenq <i>et al.</i> , 1982]
	 $\frac{L}{G} = 1 \quad \frac{G}{E} = 1 \quad \alpha = 60^\circ$ $d = \text{diamètre sphère circonscrite}$
	Contact sans frottement et sans cohésion
Empilement infini	Conditions aux limites périodiques (CLP)



# APPROCHE NUMÉRIQUE

- Outils : code de calcul aux éléments discrets
  - Plateforme LMGC90 [Dubois *et al.*, 2003]
  - Méthode de Dynamique des Contacts [Moreau 1994][Jean 1997]

→ Inconnues :  $\vec{V}(3N)$ ,  $\vec{\Omega}(3N)$ ,  $\vec{P}(3N_C)$



→ Conservation de la quantité de mouvement :

$$m_i(\vec{V}^+ - \vec{V}^-) = \sum_k^{n_{ci}} \vec{P}(k \rightarrow i) = \vec{P}(j \rightarrow i) + \sum_{k \neq j}^{n_{ci}} \vec{P}(k \rightarrow i) \quad (3N \text{ équations})$$

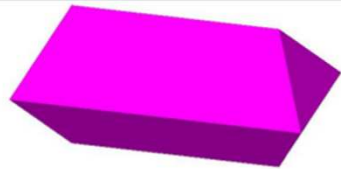
$$I_i(\vec{\Omega}^+ - \vec{\Omega}^-) = \sum_k^{n_{ci}} \vec{G}_i C_{ik} \wedge \vec{P}(k \rightarrow i) \quad (3N \text{ équations})$$

→ Manque  $3N_C$  équations : lois de contact



# APPROCHE NUMÉRIQUE

- Programme de simulation :
  - Mélanges binaires de 3000 particules
  - Assemblages cubiques



Long

$$\frac{L}{G} = 2 \quad \frac{G}{E} = 1$$



Plat

$$\frac{L}{G} = 1 \quad \frac{G}{E} = 3$$



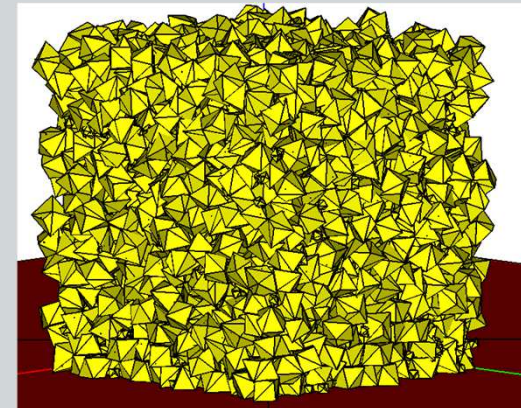
Long et plat

$$\frac{L}{G} = 2 \quad \frac{G}{E} = 3$$

Particules ajoutées	Proportions volumiques	Seuils (rappel)
Petites $d/3$ (pinacoïdes)	2%, 13%, 30%, 50%, 70%	-
Petites $d/3$ (sphères)	3%, 13%, 23%, 30%, 41%, 55%	-
Pinacoïdes bonne forme	100%	-
Longs	5%, 10%, 20%, 35%, 47%, 100%	6%
Plats	6%, 11%, 27%, 46%, 59%, 100%	35%
Longs et plats	4%, 8%, 12%, 20%, 28%, 100%	10%

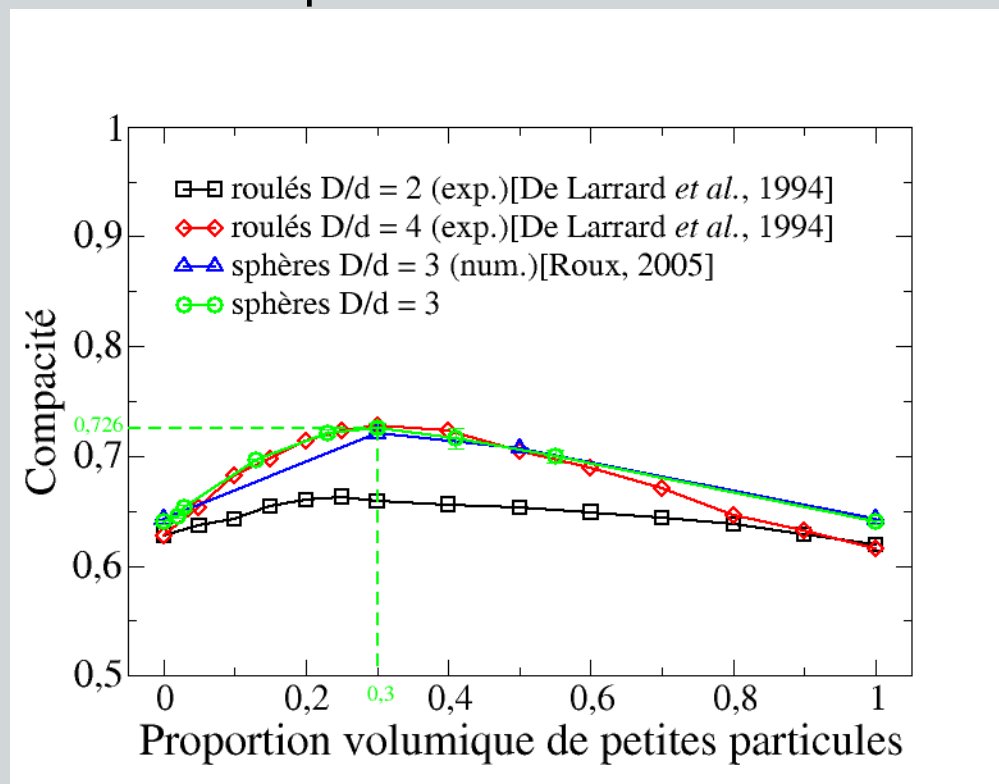
→ 5 répétitions pour chaque mélange

mélange bidisperse :



# RELATIONS GÉOMÉTRIE / COMPACITÉ

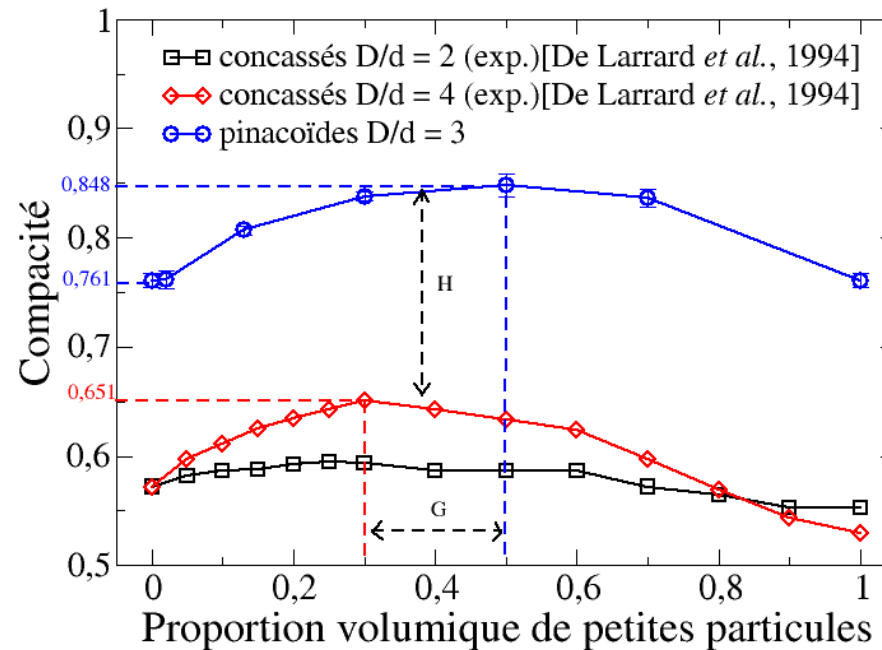
- Compacité des assemblages polydisperses de sphères :
  - Approche numérique validée pour les sphères
  - Sphères bon modèle pour les roulés





# RELATIONS GÉOMÉTRIE / COMPACITÉ

- Compacité des assemblages polydisperses de pinacoïdes :

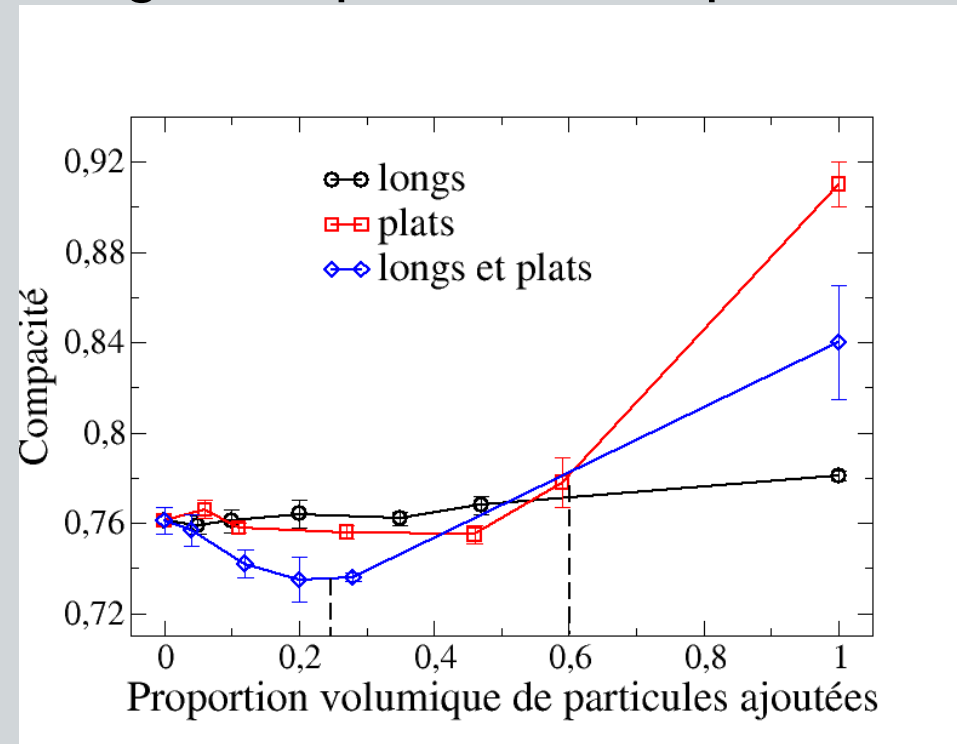


- Pas d'effet de taille, d'angularité
- Effet de l'état de surface ?



# RELATIONS GÉOMÉTRIE / COMPACITÉ

- Compacité des assemblages en présence de particules de mauvaise forme :

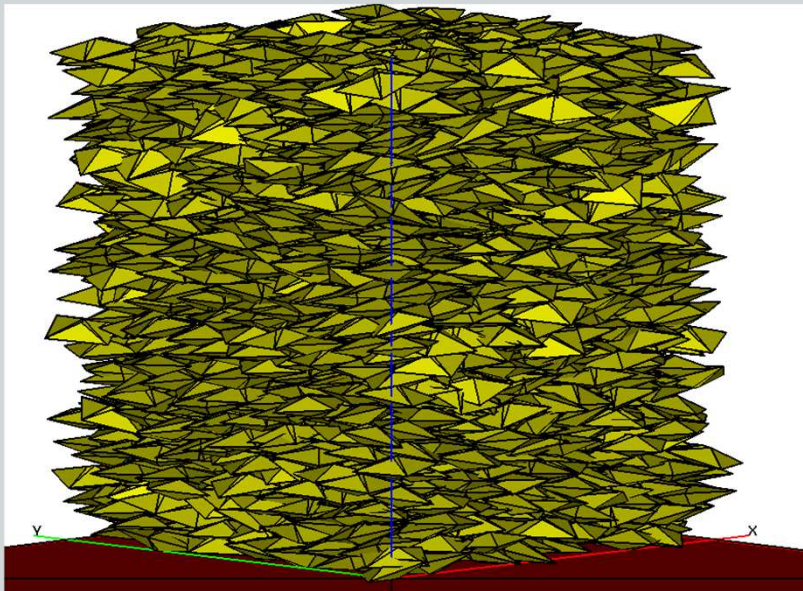


- Pas d'effet des longs
- Compacité des plats (longs ou pas) augmente à partir de 60%
- Compacité des longs et plats diminue jusqu'à 25%

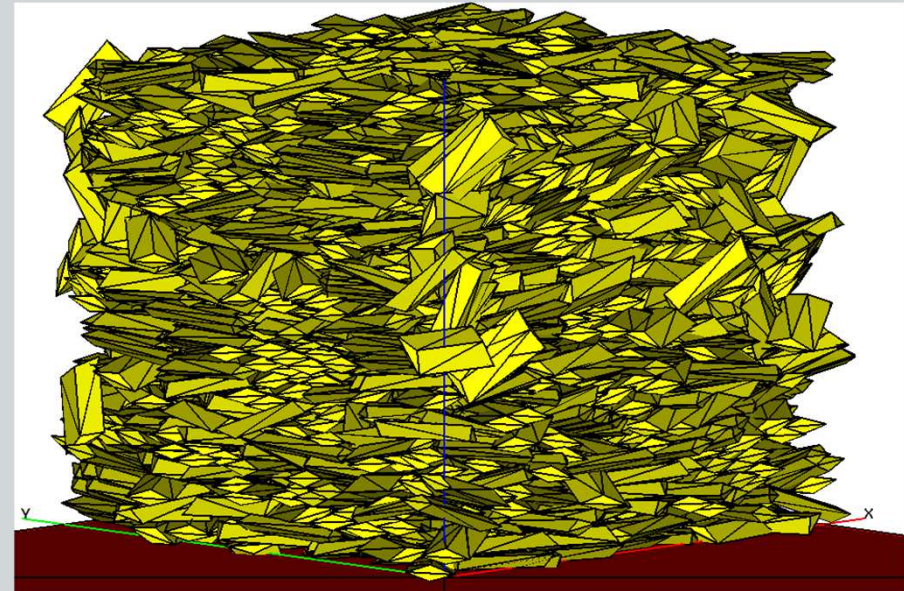


# RELATIONS GÉOMÉTRIE / COMPACITÉ

- Structure de l'empilement :  
plats :



- longs et plats :



- Pas d'ordre ni d'orientation privilégiée pour les longs et bidisperses
- Orientation privilégiée significative au-delà de 60% pour les plats / longs et plats



# CONCLUSIONS

- Validation du modèle physique d'obtention d'empilements désordonnés et de compacité maximale
- Compacité :
  - Granulats anguleux > granulats arrondis
  - Pas d'effet de la présence de longs
  - Augmente significativement en présence de plus de 60% de plats
- Structure de l'empilement :
  - Structuration significative au-delà 60% de plats (longs ou pas)
  - Pas de structuration en présence de longs



# PERSPECTIVES

- Incidence de la structuration sur la transmission des efforts dans les empilements avec des plats, longs ou pas
- Comment compacter un empilement de grains frottants pour tendre vers la compacité maximale sans frottement
- Études de particules plus complexes (nombre de faces, polydispersité, symétrie)

