



**HAL**  
open science

# Tomographie aux rayons X de l'écoulement des matériaux granulaires ensilés

Minh-Phong Luong

► **To cite this version:**

Minh-Phong Luong. Tomographie aux rayons X de l'écoulement des matériaux granulaires ensilés. 3e Colloque francophone Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Nov 2002, Saint-Aubin de Médoc, France. hal-00117722

**HAL Id: hal-00117722**

**<https://hal.science/hal-00117722>**

Submitted on 12 Mar 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Tomographie aux rayons X de l'écoulement des matériaux granulaires ensilés

Minh Phong LUONG

*Laboratoire de Mécanique des Solides, CNRS UMR 7649, Ecole Polytechnique, Palaiseau*

**Résumé:** Cette communication propose l'utilisation de la tomographie aux rayons X pour mettre en évidence l'intérêt d'un indicateur de l'effet de voûte, appelé *indice de coulabilité* des matériaux granulaires, facilement obtenu à partir des essais triaxiaux conventionnels bien connus en mécanique des sols. En extension, cette analyse permet d'interpréter correctement le *bouchonnage* des pieux tubulaires à fond ouvert observé en géotechnique pétrolière.

## 1. Introduction

Le stockage en silo des produits en vrac génère souvent toute une classe inhabituelle d'incidents structuraux (pliage, flambage, fissuration, fendage et effondrement des parois,...) [1] et fonctionnels (formation des voûtes, de cheminée ou de noyau au sein du matériau ensilé et surtout difficulté voire impossibilité d'extraire le produit stocké) [2]. Ces différents problèmes résultent souvent d'une prise en compte incorrecte du *comportement rhéologique* des matériaux granulaires stockés.

## 2. Evaluation des efforts dans les silos

A côté des tests de cisaillement traditionnellement utilisés en industrie chimique [3], cette communication propose d'utiliser l'appareil triaxial cylindrique conventionnel de la mécanique des sols pour élucider à la fois le comportement mécanique (signification physique des critères de résistance et des règles d'écoulement) et les caractéristiques de coulabilité (effet de voûte) des matériaux en vrac ensilés [4].

L'existence des forces de frottement de la matière ensilée sur les parois s'opposant aux forces de gravité du produit a amené Janssen dès 1895 à formuler la théorie de voûte [5] applicable à un silo vertical de section constante, de longueur indéfinie et rempli de matière pulvérulente incompressible. Cette méthode simplificatrice considère l'équilibre statique d'une tranche horizontale de matériau pesant et frottant sur les parois. En 1934 Caquot [6] a donné une solution statiquement et plastiquement admissible, par conséquent mécaniquement plus cohérente. Cette méthode et ses dérivées utilisent la notion d'un rayon hydraulique moyen défini par le rapport de la section transversale au périmètre, admettant implicitement un écoulement homogène en masse du matériau ensilé.

De nombreuses expérimentations, tant en France qu' à l'étranger, ont montré que les pressions sur les parois varient avec le temps et que les opérations de vidange de quantité infime de produit changent les valeurs des efforts dans des proportions très importantes. Il en est de même au cours des phases de fonctionnement du silo en remplissage ou en vidange. Il a été en outre très facile de constater que la distribution des efforts varie d'une façon extrême s'il s'agit de produits très compressibles comme les matériaux agroalimentaires, ou de matériaux fins foisonnants comme du charbon pulvérisé, du ciment, du gypse, ou encore de matériaux dilatants comme les minerais endurés à particules anguleuses. Le comportement rhéologique des matériaux en vrac à ensiler influence donc de façon très significative la détermination des efforts à considérer pour le dimensionnement du silo.

Ce travail a été motivé par l'industrie sucrière qui a eu besoin de stocker d'énormes quantités de sucre en poudre dans de très grands silos métalliques de l'ordre de 60m de diamètre et 50m de hauteur. Il y avait donc nécessité d'approfondir le comportement rhéologique de ce matériau granulaire aussi bien en paroi [7] que dans la masse [8].

## 3. Rhéologie des cristaux de sucre

Pour le stockage en silo du sucre en poudre, le problème industriel se pose en terme d'exigences à imposer aux produits stockés, au silo et aux éléments d'extraction pour garantir un fonctionnement non perturbé des opérations d'ensilage et de vidange.

Des éprouvettes cylindriques de sucre sec en poudre à granulométrie uniforme (Fig. 1) ont été soumises en cellule triaxiale cylindrique conventionnelle [9] sous différentes pressions de confinement (Fig. 2) pour correspondre à différents effets du poids propre à différentes hauteurs d'ensilage. Soumis à une pression de confinement constante ( $\sigma_c = 100$  kPa), le sucre en poudre à un poids volumique sec initial  $\gamma_d = 9,73$  kN.m<sup>-3</sup> présente un comportement contractance / dilatance habituel des matériaux granulaires [10] sous trajet de contrainte triaxial conventionnel (Fig. 3a et 3b).

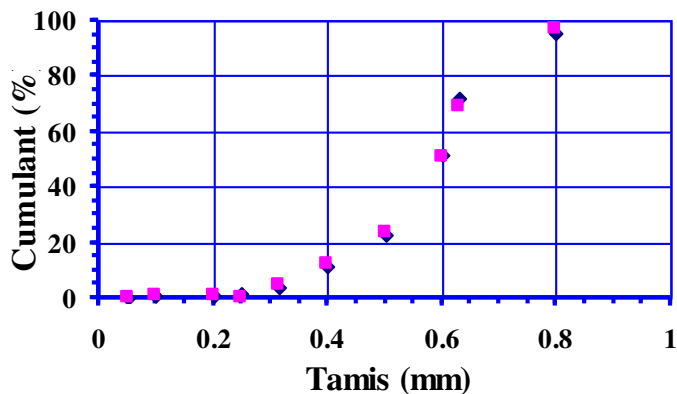


Fig. 1 : Granulométrie du sucre sec en poudre.

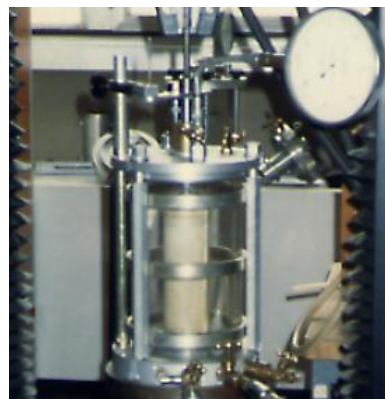


Fig. 2 : Essai triaxial conventionnel.

#### 4. Indice de coulabilité

L'essai triaxial conventionnel est apte à reproduire les états de contrainte et les trajets de charge subis par les matériaux au cours des différentes phases de stockage. Il permet de déterminer, d'une façon relativement simple et réaliste, la réponse rhéologique qui conditionne l'écoulement des matériaux lors de la vidange.

Les constatations expérimentales sur des silos en service distinguent divers modes d'écoulement du produit ensilé [11].

##### *Écoulement en cheminée*

« Le produit n'est extrait qu'en forme d'un trou de rat dans une zone très limitée au-dessus de la sortie. Le produit se trouvant contre les bords reste dans le silo ». Ce type d'écoulement se manifeste pour un matériau peu compressible présentant une résistance maximale de cisaillement très supérieure au seuil caractéristique.

##### *Écoulement en noyau*

« Seule une zone centrale est en mouvement lors de l'extraction, les zones extérieures restent d'abord immobiles et s'effondrent en partant du haut quand la vidange est plus avancée ». Ce mode suggérerait que le produit présente également une résistance maximale supérieure au seuil caractéristique, mais beaucoup plus compressible et dépendant d'une manière significative de la contrainte moyenne. Ce qui permet une propagation des zones en mouvement du haut (où la contrainte moyenne est faible) vers le bas par suite d'une redistribution progressive des contraintes au sein de la matière ensilée.

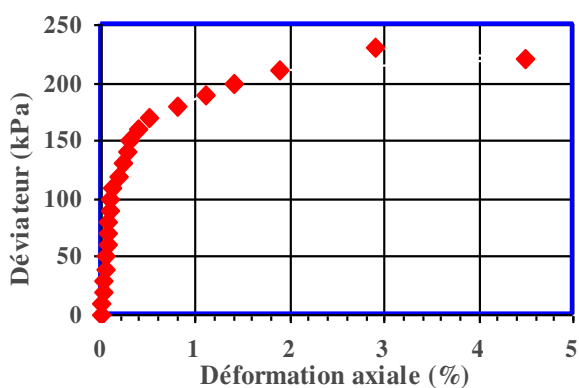


Fig. 3a : Comportement rhéologique du sucre sec sous une pression de confinement de 100 kPa.

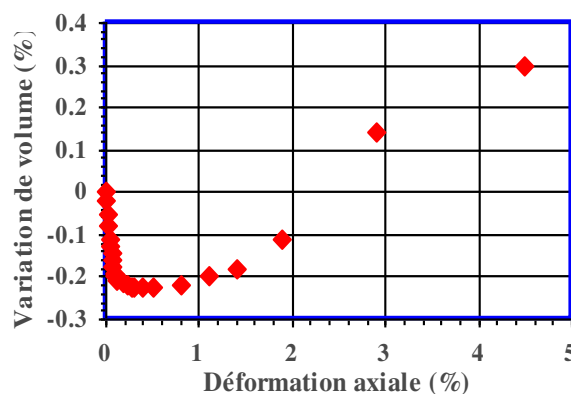


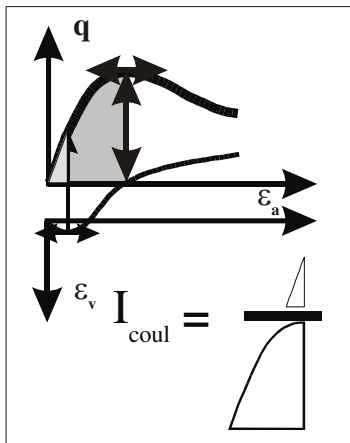
Fig. 3b : Variation volumique de l'échantillon sous charge croissante

##### *Formation de voûte*

« L'extraction est interrompue par une voûte de produit, il faut tisonner pour que l'écoulement se poursuive jusqu'à une nouvelle voûte ». La formation d'une voûte bloquant l'écoulement du matériau ensilé est due à une absence du mécanisme de désenchevêtrement de la structure granulaire. Le seuil caractéristique du matériau n'est pas atteint au sein du matériau dans la partie formée en voûte.

### Écoulement en masse

« Toute la masse du produit ensilé se met en mouvement dès le début de la vidange ». C'est le cas où la résistance maximale au cisaillement est faible par rapport à la contrainte gravitaire qui est le moteur de l'écoulement. L'incompressibilité du matériau ensilé entraîne un mouvement homogène et rapide de toute la masse ensilée ; alors qu'une certaine déformabilité de la matière en mouvement entraîne une redistribution des efforts en fonction de l'état de contrainte et favorise un écoulement plus progressif. Ces constatations expérimentales ont suggéré [12] la prise en compte de façon très simple, lors d'un essai triaxial conventionnel, d'un *indice de coulabilité*  $I_{\text{coul}}$  défini par le rapport du travail  $W_{\text{de}}$  de distorsion jusqu'au seuil d'enchevêtrement au travail  $W_{\text{dm}}$  mobilisé jusqu'à la résistance maximale du matériau : la coulabilité du matériau ensilé est d'autant meilleure que cet indice est faible par rapport à l'unité.



| $\sigma_c = \gamma_d h$ | 100 kPa | 200 kPa | 400 kPa | 500 kPa |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| $I_{\text{coul}}$       | 19 %    | 42 %    | 80 %    | > 1 %   |

Tableau I : Influence de la contrainte gravitaire sur l'indice de coulabilité du sucre en poudre.

Fig. 4 : Définition de l'indice de coulabilité  $I_{\text{coul}}$  du matériau testé.

Des essais triaxiaux sous différentes pressions de confinement pour représenter l'effet de la contrainte gravitaire  $\sigma_c = \gamma_d h$  ont montré que l'indice de coulabilité  $I_{\text{coul}}$  du sucre en poudre augmente avec le confinement (Tableau I). Vers  $\sigma_c = 500$  kPa, le sucre en poudre ne présente plus de dilatance jusqu'à la résistance maximale et se fritte à froid. Il en résulte, pour un silo de stockage de sucre en poudre, une hauteur limite  $h_{\text{lim}}$  indiquée par la pression de confinement correspondant à un indice  $I_{\text{coul}} = 1$ .

### 5. Tomographie de l'écoulement des cristaux de sucre

Utilisée dès l'origine pour l'analyse médicale [13], la tomographie numérisée aux rayons X a été appliquée à l'étude des géomatériaux [14]. Comme la radiographie conventionnelle, le principe de base de la tomodensitométrie aux rayons X est l'atténuation du rayonnement X à la traversée des matériaux. En tomographie numérisée, l'objet est pénétré par un éventail plan de raies, et l'atténuation est mesurée par 1024 détecteurs. La source et le détecteur sont attachés à un rotor qui tourne sur une piste circulaire autour de l'objet (Fig. 5).

La tomographie par absorption de rayons X est une technique radiologique qui permet la reconstitution d'images *en coupe* de la boîte de sucre en poudre en observation. Cette reconstitution est non destructive, elle fournit une grande partie de l'information que permettrait d'obtenir une coupe réelle de la boîte de cristaux de sucre en mouvement de vidange. Le scanner mesure la transmission de rayons X à travers une coupe fine du sucre en poudre et sous de multiples orientations. Les données recueillies (coefficients d'atténuation) sont utilisées pour calculer et reconstruire la distribution de densité radiologique du sucre en poudre afin d'en former l'image visuelle.

L'appareil CE 12000 CGR de l'IFP comporte une source à rayons X qui émet un faisceau de rayons en éventail. La coupe du sucre en poudre est totalement irradiée. L'intensité transmise est mesurée par un réseau de 1024 détecteurs. L'acquisition des données se fait entre 2 secondes et 13 secondes suivant le temps de pose choisi. Pendant l'acquisition, l'ensemble source-détecteurs opère une rotation complète autour du spécimen. Durant la rotation, chaque détecteur est numériquement échantillonné en 150 fois par seconde. Les données sont fournies à un ordinateur central et l'image sera reconstruite par un algorithme de rétro-projection filtrée. Les images ainsi produites sont stockées sur disque. Elles peuvent être photographiées ou archivées sur bande magnétique ou sur disquette.

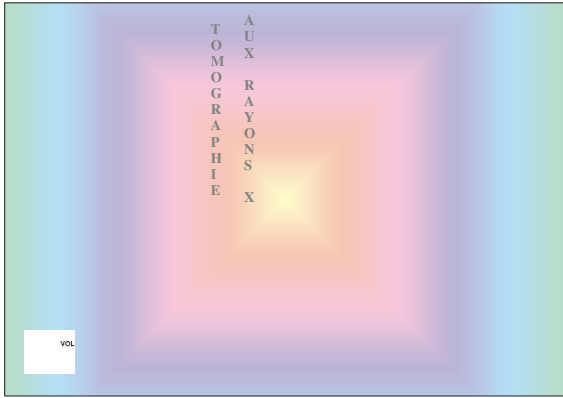


Fig. 5 : Expérimentation en tomographie aux rayons X.

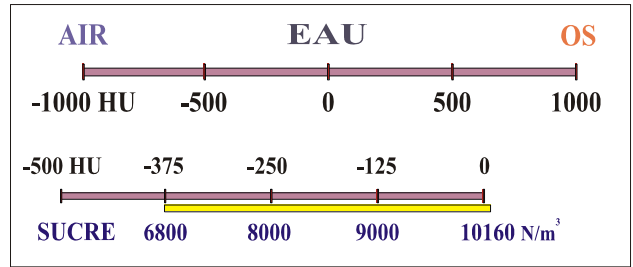


Fig. 6 : Etalonnage en unités Hounsfield pour différents matériaux.

La tomographie numérisée aux rayons X est très sensible aux variations d'absorption radiologique du sucre en poudre étudié. Le scanner a ainsi permis de localiser très finement toute variation de densité du sucre en poudre en utilisant un étalonnage (Fig. 6) qui donne la correspondance entre les unités Hounsfield HU et le poids volumique du sucre en poudre en N/m<sup>3</sup>.

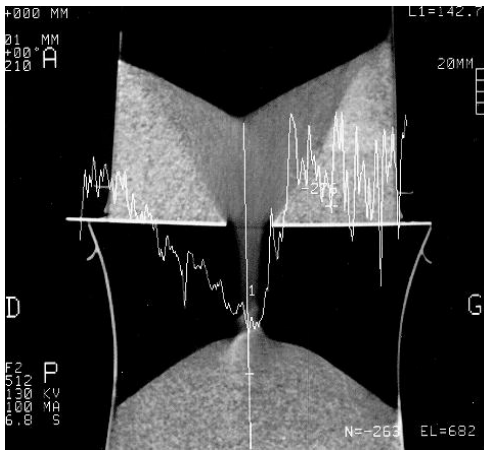


Fig. 7 : Profil vertical de poids volumique du sucre en poudre lors de l'écoulement gravitaire.

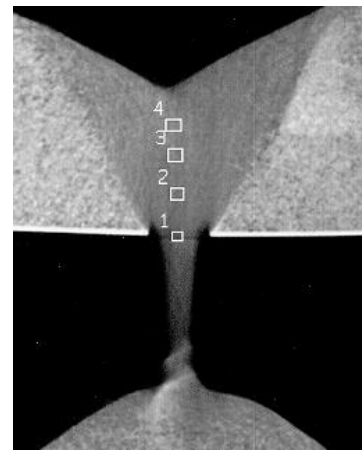


Fig. 8 : Ecoulement gravitaire du sucre en poudre dans un cratère conique ( $I_{\text{coul}} = 19\%$ ).

La tomodensitométrie numérisée détermine le poids volumique moyen du sucre en poudre en tout point de la masse en cours de l'écoulement (Fig. 7). Elle a ainsi montré que l'hypothèse de non variation de volume n'est pas réaliste. L'écoulement ne s'opère pas de façon isochore.

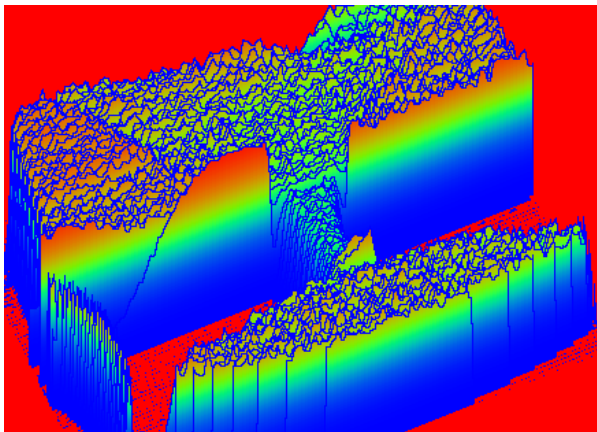


Fig. 9 : Champ de densité lors de l'écoulement du sucre en poudre sans effet de voûte.

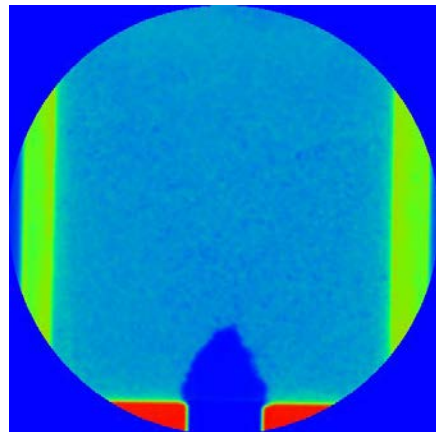


Fig. 10 : Mise en évidence de l'effet de voûte par tomographie numérisée aux rayons X ( $I_{\text{coul}} = 0,99$ ).

## 6. Mise en évidence de l'effet de voûte

En réalisant dans le scanner tomographe disponible à l'Institut du Pétrole une simulation d'écoulement du sucre en poudre confiné sous une pression de confinement de 100 kPa, c'est à dire caractérisé par un indice de coulabilité  $I_{\text{coul}} = 19 \%$ , la tomographie numérisée au rayons X a permis de visualiser un écoulement continu sans blocage des cristaux de sucre (Fig. 8) au sein d'une masse immobile.

Une représentation tridimensionnelle de poids volumique illustre le champ de densité de toute la masse de sucre en poudre soumise à l'écoulement gravitaire (Fig.9).

Une autre simulation physique sous une plus forte pression de confinement sur la masse de sucre en poudre, c'est à dire caractérisée par un indice de coulabilité  $I_{\text{coul}} = 99 \%$  proche de l'unité, confirme la mobilisation de l'effet de voûte empêchant l'écoulement gravitaire du sucre en poudre comme dans le cas précédent (Fig. 10).

Soumise à une forte pression de confinement, la masse de sucre en poudre est figée par l'effet de voûte et présente une distribution de densité relativement homogène (Fig. 11).

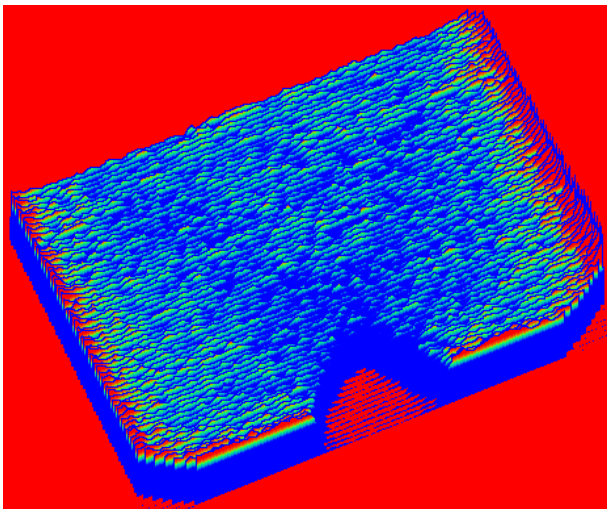


Fig. 11 : Champ de densité de la masse de sucre en poudre bloquée par l'effet de voûte.



Fig. 12 : Grand silo de stockage de sucre.

Ces résultats obtenus par tomographie numérisée aux rayons X valident la prise en considération de l'indice de coulabilité  $I_{\text{coul}}$  facilement déduit des essais triaxiaux conventionnels.

Lors de la construction des grands silos de stockage de sucre en poudre (Fig. 12), la hauteur a été limitée à 50 m et des systèmes d'extraction du matériau sous forme de vis sans fin ont été prévus pour éviter des incidents de blocage de la matière ensilée au cours des opérations de vidange.

## 7. Bouchonnage des pieux tubulaires

Les pieux métalliques tubulaires à fond ouvert de taille croissante, pouvant atteindre plusieurs mètres de diamètre et plusieurs dizaines de mètres de longueur sont couramment utilisés en géotechnique pétrolière marine au cours de ces dernières décennies. Ils nécessitent une bonne interprétation des conditions de fonçage pour être économiques.

Au cours de la phase initiale de l'installation, le sol entre dans le pieu ouvert (comme un simple carottage) au même rythme que sa pénétration. Au cours de l'enfoncement du pieu, le cylindre de sol intérieur peut ensuite développer suffisamment de résistance au frottement sur la paroi pour bouchonner le tube et empêcher toute intrusion supplémentaire [15].

En conditions géotechniques difficiles, les critères d'installation et de contrôle de battage doivent tenir compte de façon appropriée des phases carottante et bouchonnante pour éviter un endommagement de la pointe et de la structure au cours du fonçage et mieux appréhender la tenue du pieu tubulaire et sa capacité portante après travaux. Une interprétation physique réaliste du comportement rhéologique des sols sous fortes contraintes [16] et soumis à des taux de déformation élevés [17] lors des chocs de battage contribue d'une façon déterminante à une bonne compréhension des mécanismes carottant et bouchonnant au fond des pieux tubulaires.

## 8. Conclusion

Les essais triaxiaux conventionnels ont permis de montrer des aspects déterminants du comportement rhéologique des matériaux granulaires dans l'analyse de l'effet de voûte mobilisé par des forces de gravité ou créé par des sollicitations de fôçage des pieux tubulaires.

L'indice de coulabilité  $I_{\text{coul}}$ , paramètre rhéologique sans dimension et prenant en compte des états de contrainte et de déformation, est un indicateur approprié de la formation de l'effet de voûte en silo lorsque sa valeur approche 100 %.

La tomographie numérisée aux rayons X a permis de valider dans l'espace tridimensionnel le grand intérêt de l'indice de coulabilité, capable de caractériser de manière simple et utile les matériaux granulaires, quelque soit leur déformabilité, dans des domaines très différents de l'ingénierie comme le stockage des matériaux en vrac ou la géotechnique marine.

## Références

- [1] Blight, G.E. Pressures exerted by materials stored in silos: part I, coarse materials and part II, fine powders. *Géotechnique*, 36, 1, 33-56 (1986).
- [2] Shamlou, P.A. *Handling of bulk solids - Theory and practice*. Butterworths (1988).
- [3] Carr, R.L. Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineering*, 163-168 (1965).
- [4] Luong, M.P. Reflections on triaxial testing, rheology and flowability. In *SILOS Fundamentals of theory, behaviour and design*, Brown & Nielsen (eds), E & FN Spon, 65-75 (1998).
- [5] Janssen, H.A. Versuche über Gedreidedruck in Silozellen. *Z. Ver. Dt. Ing.*, 39(35), 1045-1050 (1895).
- [6] Caquot, A. *Equilibre des massifs à frottement interne*. Gauthier-Villars (1934).
- [7] Luong, M.P. Wall friction measurement for sugar crystals. In *Powders & Grains 97*, Behringer & Jenkins eds, Balkema, 83-86 (1997).
- [8] Luong, M.P. X-ray computed tomography of sugar crystals flow in silo. *Powders and Grains*, Swets & Zeitlinger, 403-407 (1962).
- [9] Bishop, A.W. and Henkel, D.J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Edward Arnold London (1962).
- [10] Luong, M.P. Etat caractéristique du sol. *C.R. Acad. Sci.*, Gauthier-Villars, 287, B, 305-307 (1978).
- [11] Kühnemund, B. Stockage en silos de produits en vrac. *Extrait Bühler-Miag Nouvelles*, 217 (1987).
- [12] Luong, M.P. Coulabilité des matériaux agro-alimentaires. *Rev. Franç. Géotech.*, 52, 37-49 (1990).
- [13] Hounsfield, G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. *British J. Radiology*, 46, 1016-1022 (1973).
- [14] Coletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J.F. & Balé, P. Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models: Thin-skinned thrust systems. *Geology*, 19, 1063-1067 (1991).
- [15] Murff, J.D., Raines, R.D. & Randolph, M.F. Soil plug behavior of piles in sand. *22<sup>nd</sup> Annual Offshore Technology Conf.*, Houston Texas May 7-10, OTC 6421, 25-32, (1990).
- [16] Luong, M.P. & Touati, A. Sols grenus sous fortes contraintes. *Rev. Franç. Géotech.*, 23, 51-63 (1983).
- [17] Semblat, J.F., Luong, M.P. & Gary, G. 3D-Hopkinson bar : new experiment for dynamic testing on soils. *Soils and Foundations*, 39(1), 1-10 (1999).