

pertinence d'essais sur modèle réduit en centrifugeuse pour l'étude du comportement d'un silo métallique céréalier

pertinence of centrifuge model tests for the study
of the behaviour of grain silos

J.-F. CORTÉ, P. LEPERT

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

Rev. Franç. Géotech. n° 52, pp. 27-36 (juillet 1990)

Résumé

L'article présente les résultats d'une série d'expériences faites sur un modèle réduit en centrifugeuse, à l'échelle 1/10^e, d'un silo à céréales. La comparaison entre les observations faites sur l'ouvrage grandeur réelle et celles obtenues sur le modèle permet d'apprécier la valeur de la modélisation et les perspectives ouvertes par les essais sur modèles en centrifugeuse pour l'étude des silos et des écoulements en milieu granulaire.

Abstract

The paper presents the results of a series of experiments on a centrifuge model at a 1/10th scale of a grain silo. The comparison between observations made on the fullscale structure and those made on the model enables to assess the value of the modelling and the perspectives opened to centrifuge model testing for the study of silos and of granular flows.

* Centre de Nantes, BP 19, 44340 Bouguenais.

1. INTRODUCTION

Les travaux présentés dans cet article ont été menés dans le cadre d'une action de recherche concertée sur le comportement des silos métalliques sous l'action de la matière ensilée (BROZZETTI, 1989). Le principal outil de recherches, bâti spécialement à cet usage, était constitué par un ensemble de quatre cellules grandeur réelle situées à Chartres. Les expérimentations sur ouvrages réels étant onéreuses, et lourdes de mise en œuvre, il fut décidé d'intégrer au programme général de recherche des études sur modèle réduit en centrifugeuse. L'objectif fixé à cette partie du programme était d'évaluer la qualité de la similitude, ce par référence aux résultats obtenus sur l'une des structures réelles de la base prise comme prototype, et par là-même de préciser objectivement les possibilités d'emploi de la modélisation en centrifugeuse pour l'étude des silos céréaliers.

Les études sur modèle réduit de problèmes d'écoulement en silos ou trémies ont été assez nombreuses dans le passé. Mais la plupart de ces essais furent menés sous gravité naturelle, ce qui ne permettait pas de satisfaire convenablement aux conditions de similitude même approchées. C'est certainement la raison principale pour laquelle ces études n'ont pas été souvent concluantes. L'utilisation de la centrifugeuse, comme moyen de reproduire correctement dans le modèle les forces de masse avait déjà été retenue au Danemark mais avec des corps d'épreuve de très petite taille (décimétrique). Les essais concernaient des silos en béton contenant des céréales ou des poudres (MUCH ANDERSEN et NIELSEN, 1984, 1986). Une seule étude semble avoir été faite avec un modèle de silo métallique, en vue de discuter les propositions de Jenike sur l'écoulement de poudres, plus ou moins cohérentes, par un silo à trémie (KRISTIANSEN et al., 1988). Dans ces différents cas malheureusement aucun rapprochement n'a pu être fait avec des mesures obtenues sur ouvrage réel. Cette comparaison avec une structure grandeur nature est l'un des traits d'originalité de l'étude menée par le LCPC.

Les résultats ont été présentés par LEPERT et CORTÉ (1989), on en reprend ici les aspects principaux.

2. LA MODÉLISATION EN CENTRIFUGEUSE

2.1. Principe

Le comportement des matériaux ensilés n'est généralement pas linéaire, mais dépend du niveau de chargement auquel ils sont soumis. Aussi, une expérience sur modèle réduit physique ne sera représentative du comportement de l'ouvrage vraie grandeur que si l'on parvient à reproduire en tout point du modèle, les contraintes et déformations existant au point homologue de la structure réelle. Les matériaux utilisés dans le modèle devant exhiber les mêmes comportements que ceux de l'ouvrage prototype, ceci conduit, chaque fois que possible, à retenir dans les deux cas les

Tableau 1. — Facteurs d'échelle de la similitude

Table 1. — Scale factors for the similitude

Grandeurs	Facteur d'échelle
Longueur, distance	10^{-1}
Temps	10^{-1}
Vitesse	1
Accélération	10
Masse volumique, densité	1
Débit massique	10^{-2}
Contrainte, pression	1
Force	10^{-2}
Déformation	1

mêmes matériaux. Lorsque l'action des forces de masse est prépondérante, on peut chercher à satisfaire aux conditions de similitude en plongeant le modèle dans un champ de pesanteur accru, ce, par l'intermédiaire d'une centrifugeuse. Les facteurs d'échelle s'appliquant aux différentes grandeurs mécaniques, pour cette similitude, sont listés dans le tableau 1. Pour une discussion plus approfondie, le lecteur pourra se reporter à CORTÉ (1989b).

2.2. Application aux silos céréaliers

Dans l'analyse du comportement de la matière ensilée, le milieu pulvérulent est en interaction avec le fluide interstitiel qui peut avoir une influence importante sur les champs de contrainte et de déformation du squelette des grains.

L'étude des conditions de similitude doit donc a priori être menée sur le milieu diphasique en traduisant que sont représentés correctement les comportements du fluide et du milieu pulvérulent ainsi que leurs interactions. Cette étude théorique a été faite par NIELSEN (1987) à partir des équations générales de la mécanique appliquées aux phases solide et fluide.

Une similitude complète nécessiterait en premier lieu que la taille des particules ensilées soit réduite dans le même rapport que les dimensions du silo. Dans l'impossibilité de disposer de céréales de taille réduite ayant le même comportement rhéologique que le blé utilisé dans le silo de la base de Chartres, il a été décidé de conserver ce dernier matériau, et d'accepter une distorsion d'échelle sur la taille des grains. Cette distorsion n'introduira pas de biais pour les phénomènes dont la dimension caractéristique est grande devant la taille des grains. Dans les autres cas, ce sont les résultats des expériences et la comparaison avec les observations faites sur la cellule prototype qui fourniront les éléments de jugement.

La conservation des mêmes matériaux (grains de taille réduite et fluide), et l'adoption d'un champ de pesanteur accru dans le rapport inverse de l'échelle des longueurs ne suffisent pas dans le cas général pour garantir que la similitude soit correcte.

En effet, si le fluide est doté de viscosité et/ou si le milieu pulvérulent a un comportement dépendant du temps (fluage par exemple) certaines incompatibilités

apparaissent dans les relations faisant intervenir le facteur temps.

Le choix de l'échelle des temps dépendra donc de la nature de la matière ensilée et de la vitesse des opérations de remplissage et de vidange. Il n'y aura de similitude satisfaisante que si deux phénomènes, diversement fonction du temps, n'ont pas la même importance concurrentement.

Dans le cas présent, la matière ensilée retenue (blé) présentant une grande perméabilité vis-à-vis des mouvements d'air interstitiel, et la loi de comportement étant peu affectée par le facteur temps, il a été considéré que les phases de remplissage et de vidange étaient contrôlées par les forces d'inertie, et qu'on pouvait admettre que les essais en centrifugeuse se déroulaient en similitude de vitesse.

3. LA CENTRIFUGEUSE DU LCPC

Les essais en centrifugeuse ont été réalisés sur le moyen d'essai du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées installé sur le centre de Nantes (fig. 1). Une description de cette installation et des équipements annexes peut être trouvée dans (CORTÉ et GARNIER, 1986 ; CORTÉ, 1989a). Nous rappelons simplement ici que :

— la longueur du bras (5,50 m) permet de limiter à quelques % les variations relatives du champ d'accélération centrifuge entre deux points quelconques du modèle ;

— le corps d'épreuve est placé dans une nacelle pivotant librement en extrémité du rotor ce qui assure qu'à tout moment la résultante de l'accélération centrifuge et de la pesanteur coïncide avec la verticale du modèle ;

— la nacelle permet d'embarquer des modèles de plus de 2 m³ et d'une masse de 2 000 kg pour des accélérations allant jusqu'à 100 g ;

— enfin, un ensemble complet de liaisons électriques et fluides permet en cours de rotation le transfert des mesures effectuées sur le modèle et la commande à distance du fonctionnement d'équipements embarqués dans la nacelle avec le corps d'épreuve.

4. L'OUVRAGE ÉTUDIÉ

4.1. Le silo prototype

L'ouvrage prototype servant de référence est la cellule D de la base expérimentale. C'est une structure cylindrique de 7,50 m de haut et de 6 m de diamètre (fig. 2). La paroi est formée d'un ruban métallique de 7 mm d'épaisseur enroulé selon une spirale ascendante et sertie. Un toit conique est fixé au sommet par plusieurs pattes sur la tôle. L'ensemble repose simplement dans une rigole aménagée dans la dalle en béton formant le fond. L'extraction de la matière ensilée peut être effectuée par gravité ou par l'intermédiaire d'une vis sans fin. Le moteur d'extraction est disposé au centre, protégé par un carter. Il existe sur une dalle de fond un second orifice excentré par

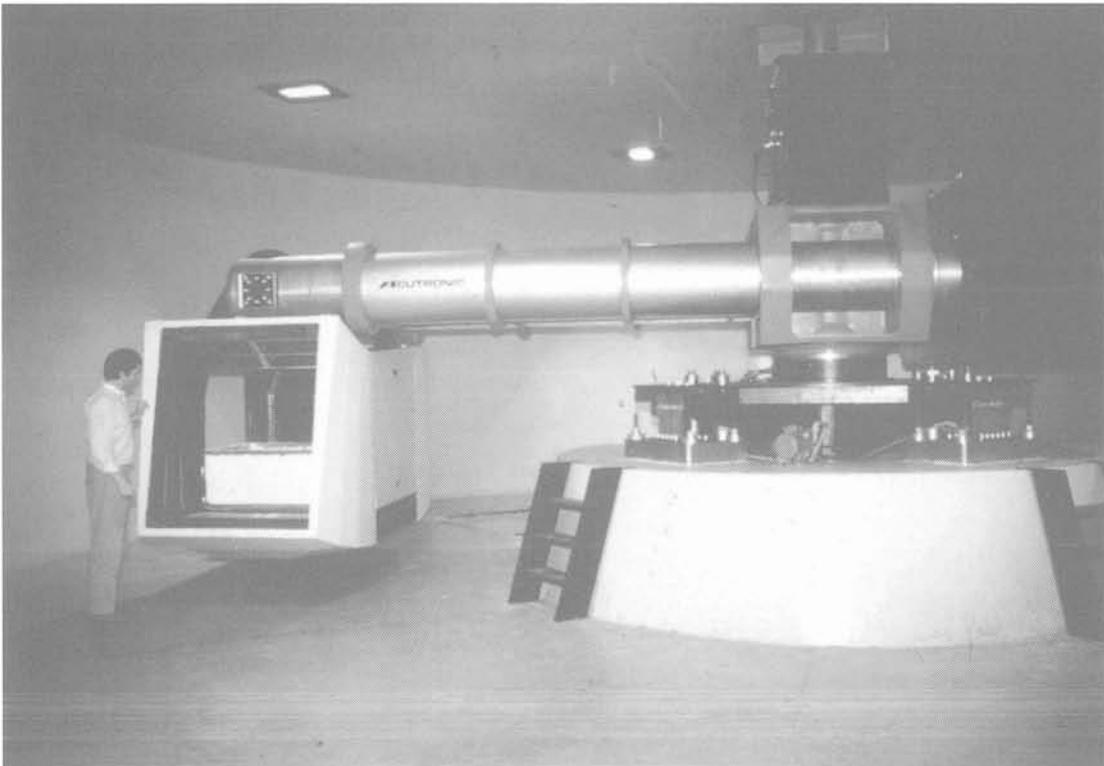


Fig. 1. — La centrifugeuse du LCPC.
Fig. 1. — LCPC Centrifuge.

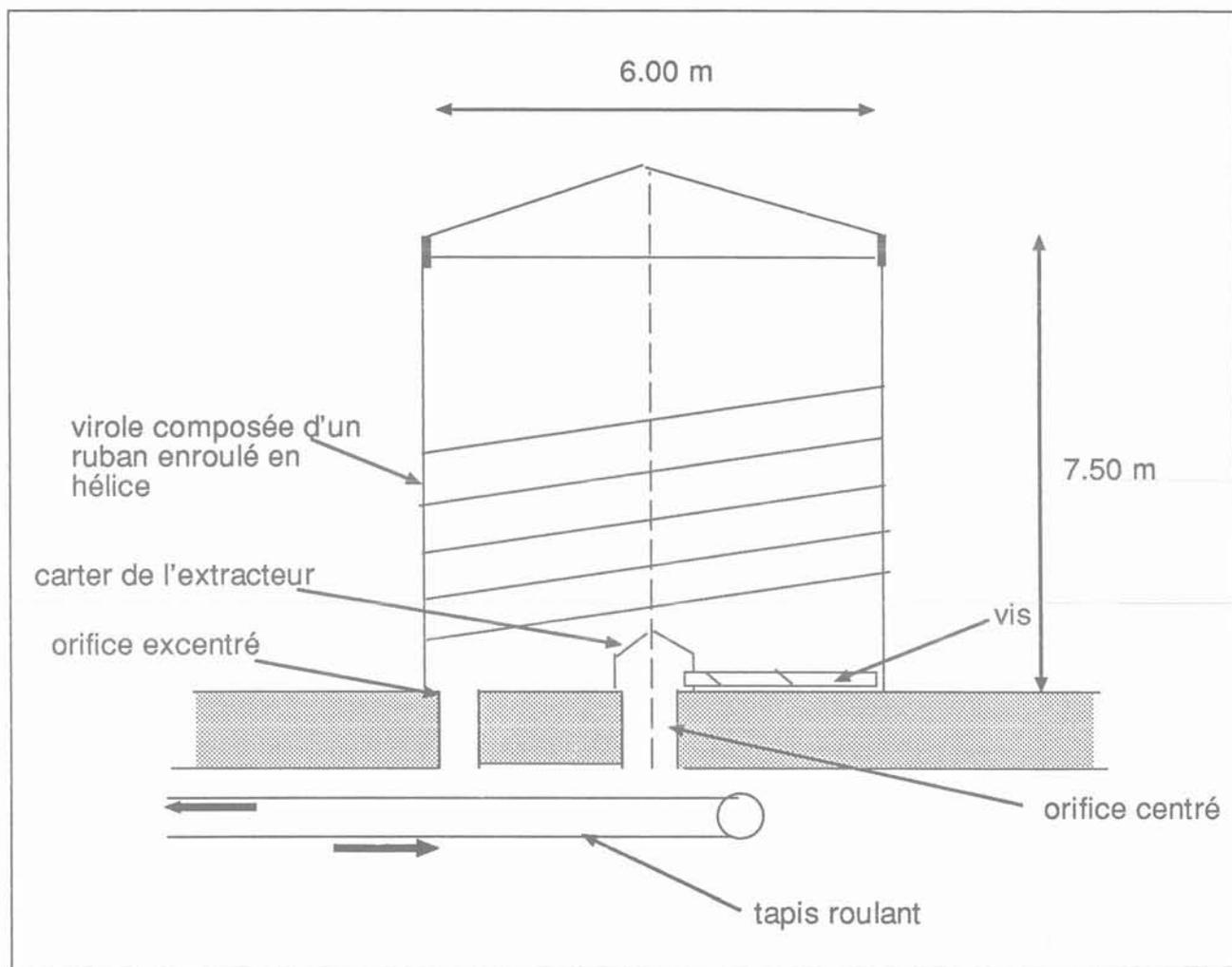


Fig. 2. — La cellule D, silo prototype de référence pour cette étude.

Fig. 2. — Cell D, reference prototype silo for this study.

lequel il ne peut être procédé qu'à des vidanges gravitaires.

4.2. Le modèle réduit

Dans le choix de la taille du modèle réduit, on a choisi le plus grand corps d'épreuve possible compte tenu des dimensions de la nacelle de la centrifugeuse, afin de minimiser les distorsions dues à la non réduction de la taille des grains. Ceci a conduit à la réalisation d'un modèle à l'échelle du dixième, soit le plus grand modèle de silo en similitude jamais étudié en centrifugeuse.

Pour que le modèle réduit fournisse des résultats valides, il faut que la maquette soit fidèle. Cependant dans la mesure où l'on ne s'intéresse qu'à des comportements globaux de la structure et aux mouvements au sein de la matière ensilée, et non à des aspects attachés à des singularités locales (assemblages des tôles par exemple), il n'est plus nécessaire de reproduire sur le modèle réduit tous les détails des dispositions constructives. Certaines simplifications

seront donc introduites, mais l'incidence des hypothèses faites sera établie expérimentalement par quelques essais particuliers.

La figure 3 représente le montage expérimental réalisé. L'enveloppe du silo est faite d'une tôle d'acier E 24 roulée, de 0,4 mm d'épaisseur. Cette virole est posée dans une gorge usinée dans une plaque métallique épaisse formant le fond du silo. La plaque de fond est percée de deux trous circulaires pour la vidange, l'un centré, l'autre proche de la paroi, dont le diamètre pouvait être varié de 25 à 65 mm.

Pour certains essais la présence du toit a été simulée par un anneau disposé en couronnement de l'enveloppe et lui conférant la même raideur que la structure du toit.

L'encombrement du dispositif d'extraction a été partiellement reproduit pour certains essais, en modélisant le carter central de protection, la vis n'a par contre pas été représentée.

L'ouverture de l'orifice de vidange est assurée en cours de rotation par la télécommande d'un vérin

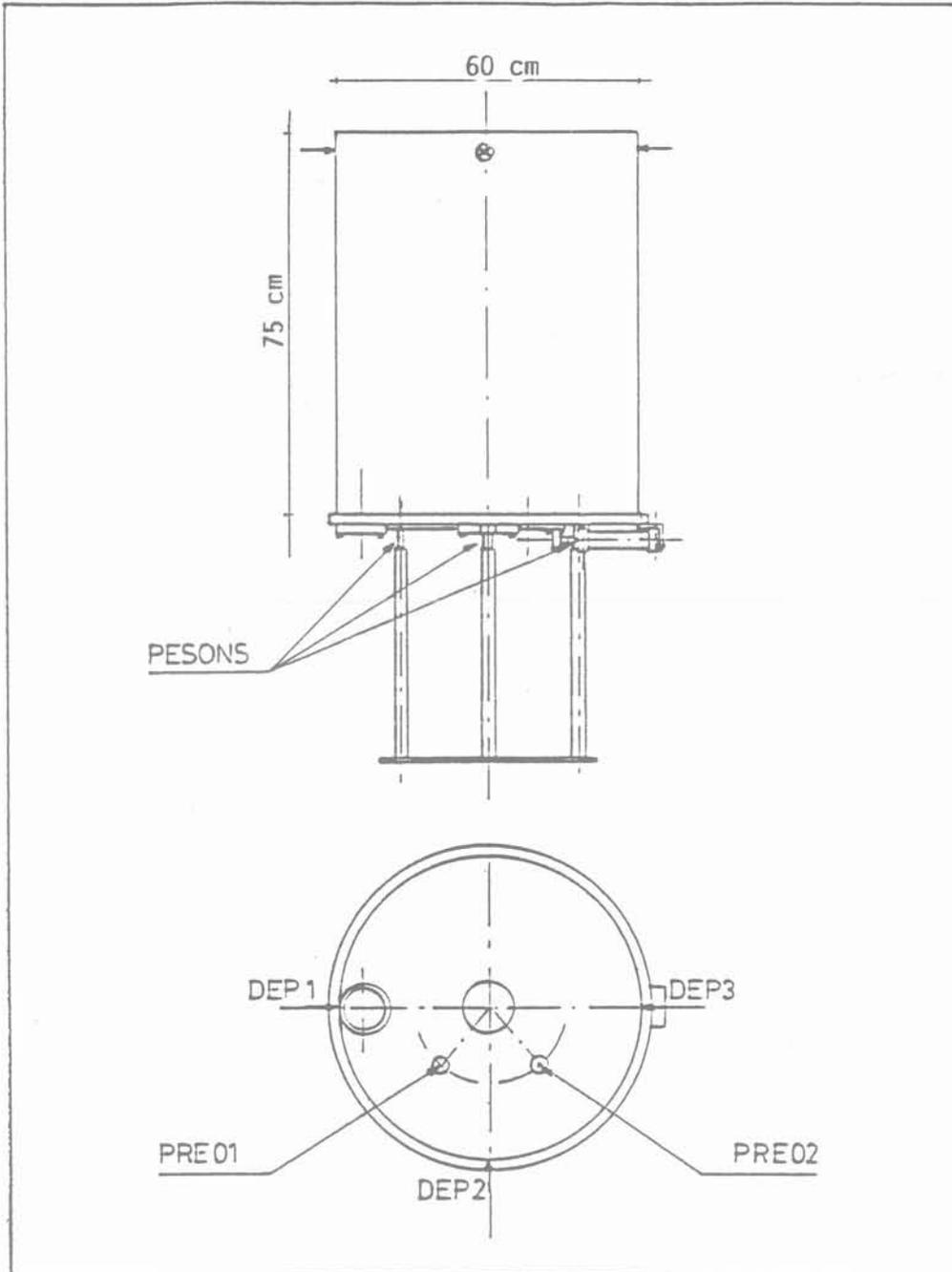


Fig. 3. — Schéma du modèle du silo D.
Fig. 3. — Schematic of the model of silo D.

pneumatique placé sous la plaque de fond. Le modèle du silo reposait sur trois colonnes laissant un libre écoulement du blé en vidange. La figure 4 donne une vue de la maquette installée dans la nacelle de la centrifugeuse.

5. L'INSTRUMENTATION DU MODÈLE

Quarante cinq jauges extensométriques, dont 14 jauges de flexion ont été placées sur la face externe de l'enveloppe selon 4 génératrices.

Trois pesons mesuraient le poids du silo ce qui permettait d'en déduire le débit de vidange.

Deux capteurs de pression totale furent disposés sur le fond. Ces derniers s'avèrèrent donner des informations erronées en dépit des précautions prises pour leur mise en place ; il ne sera donc pas fait état ici de valeurs de pression sur le fond.

Un ensemble d'expériences préliminaires a servi à une vérification et à un étalonnage des moyens de mesure. Les essais de vidange étaient généralement répétés jusqu'à 5 fois pour s'assurer de la reproductibilité

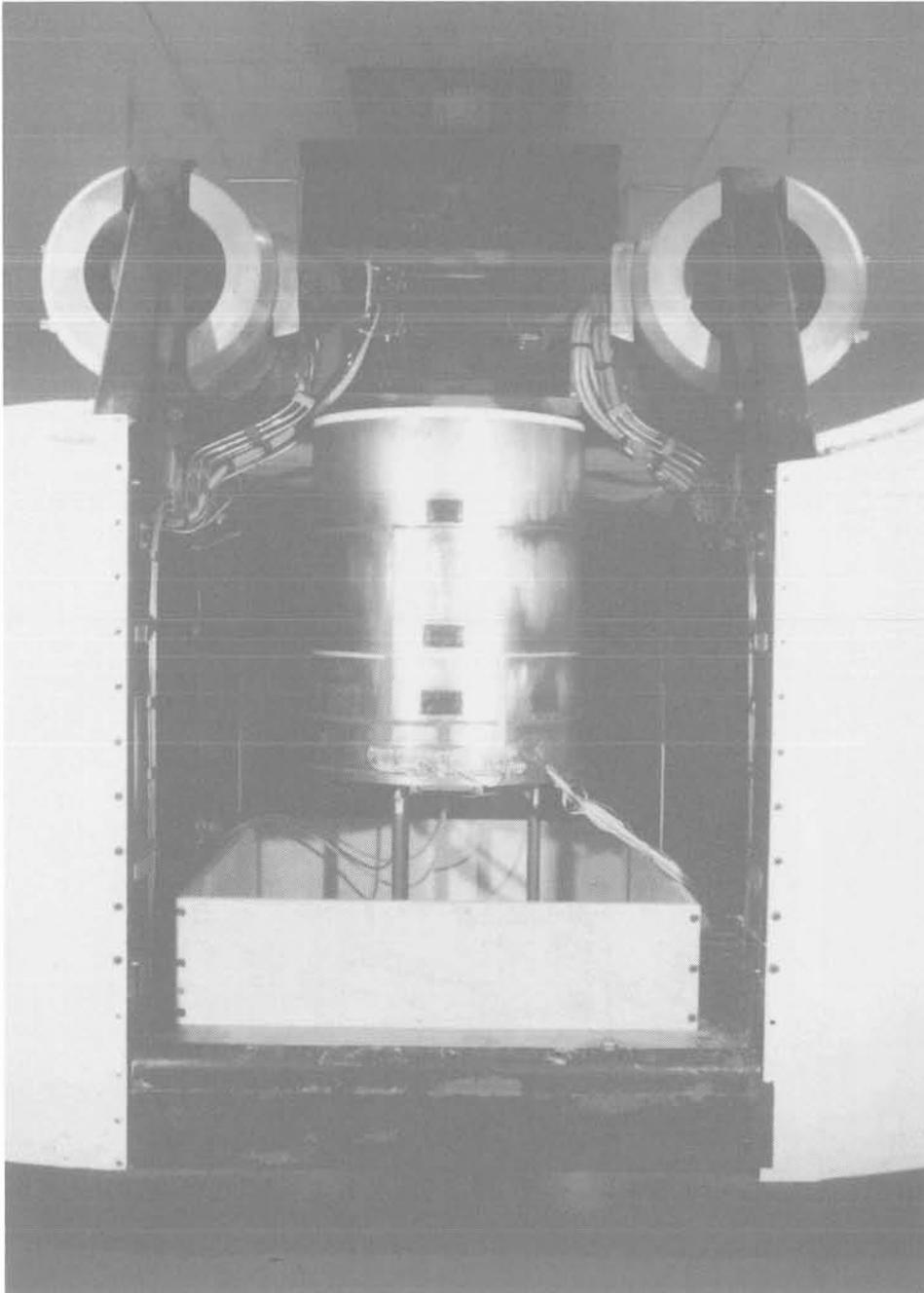


Fig. 4. — Vue de la maquette placée dans la nacelle de la centrifugeuse.
 Fig. 4. — View of the model placed in the nacelle of the centrifuge.

des mesures et des observations, et afin de réduire l'incidence des variations aléatoires par des moyennes.

6. RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES EN CENTRIFUGEUSE ET COMPARAISON AVEC CEUX OBTENUS SUR LE SILO RÉEL

Les expériences faites sur la cellule D avec du blé, servant de référence pour les essais sur modèle, sont

présentés par KHELIL et al. (1989) pour les vidanges centrées.

6.1. Incidence des simplifications géométriques apportées au modèle

Certaines caractéristiques de la cellule D avaient été représentées de façon simplifiée :

- le toit ;
- le relief de la paroi dû au sertissage des spires successives du ruban métallique.

Différents essais destinés à encadrer l'influence de ces aspects :

- essais avec adjonction d'une lierne de couronnement pour simuler la rigidité apportée par le toit ;
- essais avec paroi lisse et paroi encollée de grains ;

n'ont montré aucune influence notable sur le mode d'écoulement, le débit ou les mesures de déformation sur les parois.

6.2. Mode d'écoulement de la matière ensilée

Pour l'ensemble des essais réalisés, que la vidange soit centrée ou excentrée, le blé s'est écoulé selon un mode dit en « cheminée ». Cette observation faite sur le modèle s'accorde pleinement avec celles relatées sur la cellule D. La visualisation de l'écoulement réalisée sur le modèle a permis de plus de préciser l'évolution de la forme de la surface libre et le mouvement des grains au sein du silo (fig. 5).

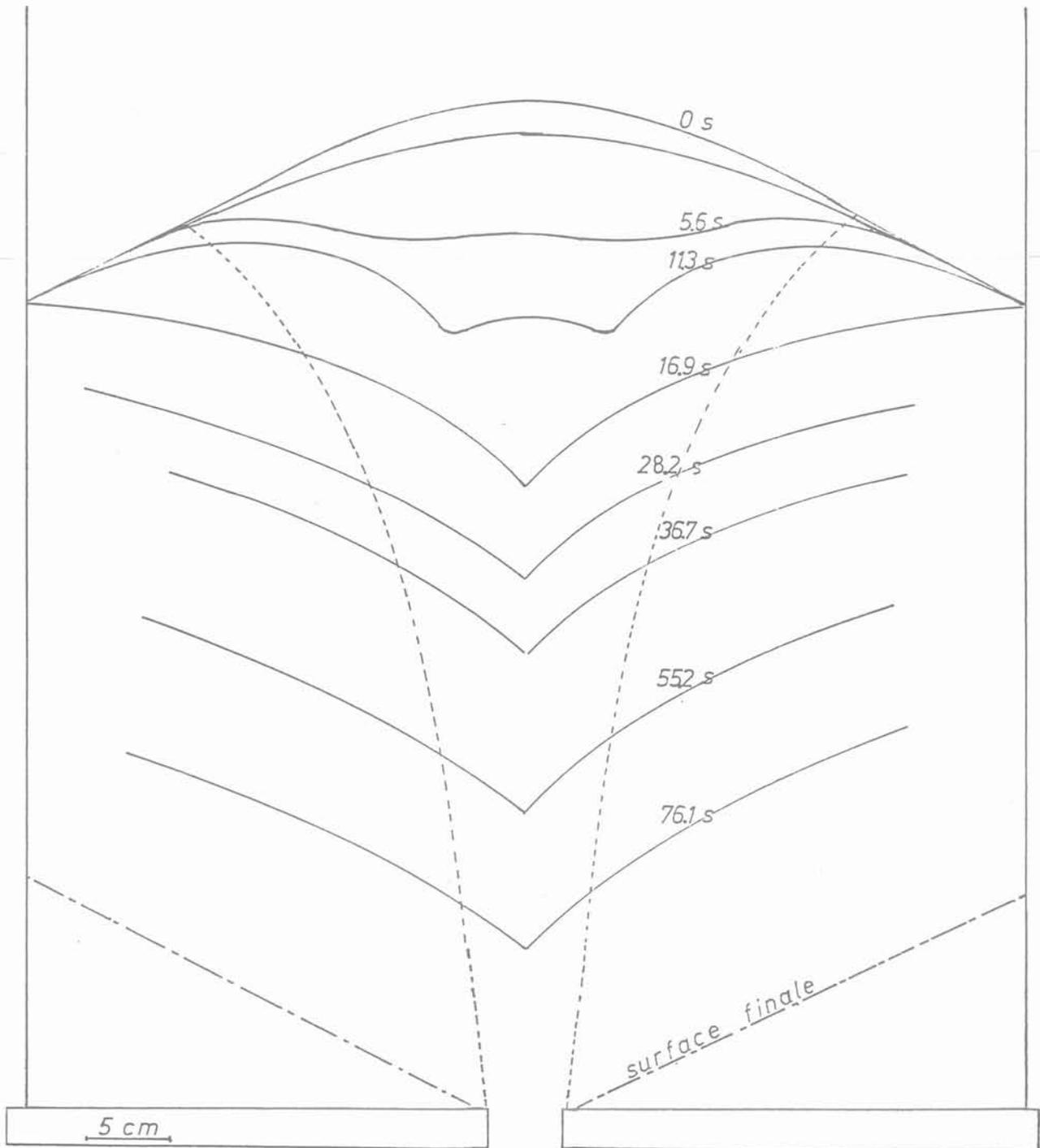


Fig. 5. — Evolution de la surface libre des grains en cours de vidange.
Fig. 5. — Evolution of the top surface of the grains during discharge.

6.3. Débit de vidange

La figure 6 montre que le débit de vidange garde une valeur constante pendant toute la durée de celle-ci. Ce résultat remarquable, en accord avec les résultats des pesées en continu faites sur la base, a été observé pour l'ensemble des essais sur modèle.

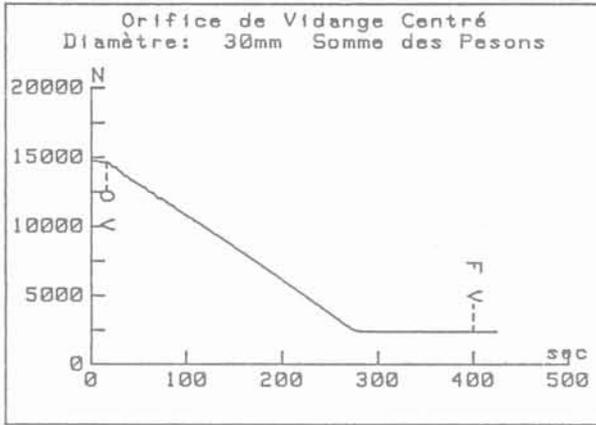


Fig. 6. — Variation dans le temps de la masse ensilée en cours de vidange.

Fig. 6. — Variation with time of the weight of grains in the silo during discharge.

Les expériences faites avec modélisation du carter de protection du système d'extraction ont montré que cette disposition entraînait des pertes de charges importantes au niveau de l'orifice de vidange. Par comparaison avec l'écoulement direct à travers l'orifice central non protégé, le débit s'est trouvé réduit dans un rapport de 10.

La taille du modèle réduit réalisé (diamètre du silo de l'ordre de 100 fois la longueur d'un grain de blé et de 200 fois son épaisseur) était telle que la dimension des grains restait faible devant celles des masses en mouvement survenant dans la matière ensilée qui pouvait être assimilée à un milieu continu. En revanche, la dimension des grains n'apparaissait plus négligeable par rapport à celle de l'orifice de vidange et l'effet de la taille des grains sur le débit de céréales extraites sur le modèle réduit a fait l'objet d'un examen spécifique.

Une relation liant débit diamètre de l'orifice de vidange et taille des grains a été établie en combinant résultats d'expérience et analyse dimensionnelle, selon la démarche suivante.

On suppose que le débit massique Q obtenu lors des essais sur modèle en centrifugeuse est une fonction :

- du diamètre \varnothing de l'orifice de vidange ;
- de l'accélération centrifuge γ à laquelle est effectuée l'essai ;
- d'une grandeur caractéristique définissant la taille des grains d .

Q ayant pour forme :

$$Q = \lambda \varnothing^a \gamma^b d^c \quad (1)$$

En l'absence de phénomène de viscosité significatif lors de ces opérations de vidange, les essais en centrifugeuse sont considérés se dérouler en similitude de vitesse. Par suite, les facteurs d'échelle γ^* et Q^* vérifient :

$$\gamma^* = 1^{*-1} \quad (2)$$

$$Q^* = 1^{*2} \quad (3)$$

L'homogénéité de la relation (1) implique alors que les exposants a , b et c satisfassent à l'égalité :

$$a = c - b = 2 \quad (4)$$

Des essais effectués en faisant varier le diamètre de l'orifice de vidange et la valeur de l'accélération centrifuge ont montré que le débit massique était une fonction \varnothing^3 et de $\gamma^{0,5}$.

Par suite, l'égalité (4) conduit à $c = -0,5$, soit pour l'expression du débit massique :

$$Q = \lambda \varnothing^3 \lambda^{0,5} d^{-0,5} \quad (5)$$

Cette relation valable pour le blé étudié et pour de faibles diamètres (quelques centimètres) qui sont ceux des essais sur modèles réduits, a fourni pour les essais en centrifugeuse un moyen de tenir compte du biais attaché à la non réduction de la taille des grains pour l'estimation du débit de vidange de l'ouvrage prototype (LEPERT et al., 1989).

6.4. Les sollicitations dans l'enveloppe métallique

Les déformations de l'enveloppe métallique en cours de vidange ont été obtenues à l'aide des jauges extensométriques. De ces mesures ont été déduites des variations de contraintes par rapport à l'état initial correspondant à la situation du silo rempli, immédiatement avant le début de la vidange.

Compte tenu de la faible hauteur du silo et de l'épaisseur de l'enveloppe, les déformations mesurées étaient souvent faibles (quelques dizaines de micro-déformations au total), parfois à la limite de résolution. Cette observation s'applique particulièrement aux mesures de déformations verticales. Du fait de l'impossibilité d'étalonner correctement ces dernières, il convient d'être prudent dans l'exploitation des valeurs absolues de ces mesures.

En dépit de ces conditions peu favorables, la bonne répétitivité des mesures et le respect des symétries observé (problème de révolution en vidange centrée), permettent de considérer comme significatifs les phénomènes relevés.

Les figures 7 et 8 présentent un exemple typique d'évolution des contraintes horizontale et verticale dans l'enveloppe vers la base du silo lors d'une vidange centrée. Ces mesures montrent qu'au début de la vidange, il se produit un léger accroissement de solli-

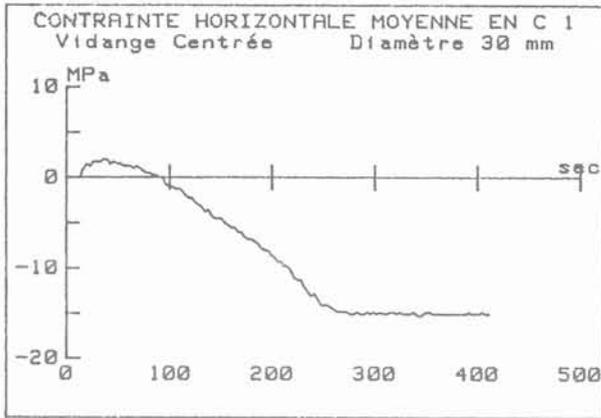


Fig. 7. — Evolution de la contrainte horizontale dans la paroi du modèle au niveau inférieur lors d'une vidange centrée.
 Fig. 7. — Evolution of the horizontal stress in the model envelope at the lower level during discharge.

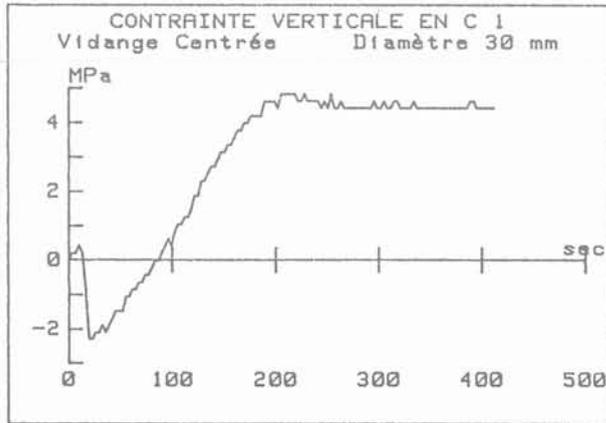


Fig. 8. — Evolution de la contrainte verticale dans la paroi du modèle au niveau inférieur lors d'une vidange centrée.
 Fig. 8. — Evolution of the vertical stress in the model envelope at the lower level during discharge.

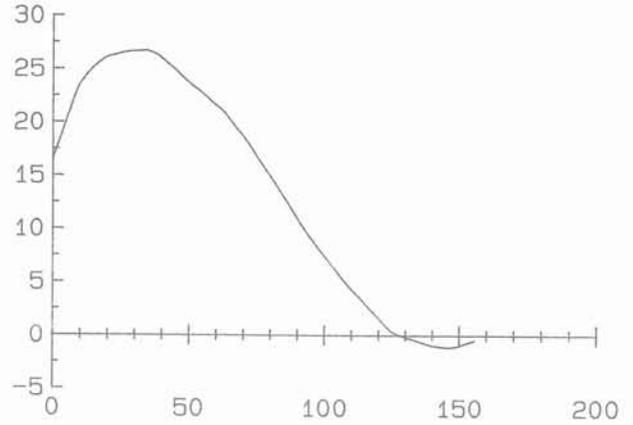


Fig. 9. — Evolution de la contrainte horizontale au tiers inférieur de la paroi du silo prototype lors d'une vidange gravitaire centrée.
 Fig. 9. — Evolution of the horizontal stress at the lower third in the envelope of the prototype silo during a centered discharge.

— « les arrêts de vidange n'ont pas eu de conséquence notable sur l'enveloppe des actions exercées pendant la vidange sur le site ». Aucun phénomène particulier n'a été observé sur le modèle lorsque la vidange fût interrompue puis reprise, sans arrêter la centrifugeuse ;

— « lors de la vidange gravitaire excentrée, la pression exercée par la matière sur la paroi proche de l'orifice a été réduite de 60 à 70 % par rapport à la pression sur le reste de la paroi... Cette perturbation de la pression reste très locale ». La figure 10 obtenue sur modèle montre qu'en vidange excentrée, il se produit au voisinage de l'orifice de vidange une décharge rapide significative de la pression, qu'accompagne une très nette augmentation de la contrainte de compression verticale dans l'enveloppe. Effectivement sur modèle aussi, cette perturbation était localisée à la zone la plus proche de l'orifice de vidange ;

citations dans l'enveloppe. Ce phénomène provenant d'une redistribution partielle des contraintes dans la matière ensilée est également discernable sur les mesures faites sur la cellule D de la base (fig. 9) et les ordres de grandeur sont comparables.

Les incertitudes relatives importantes sur les mesures de déformations verticales compte tenu de leur très faible amplitude soulignée plus haut et la défaillance des mesures de pression n'ont malheureusement pas permis d'évaluer de manière fiable sur le modèle les profils de variation avec la hauteur du coefficient de frottement mobilisé sur les parois, et du rapport des pressions σ_h/σ_v .

Sur d'autres questions, les constatations faites sur le modèle concordent remarquablement avec celles faites par KHELIL et al. (déjà cité) que nous reproduisons ici :

— « les vitesses de vidange (variées sur le site de 15 t/h à 200 t/h et sur le modèle dans un rapport de 1 à 15) n'ont pas eu d'influence significative sur le comportement de la matière » ;

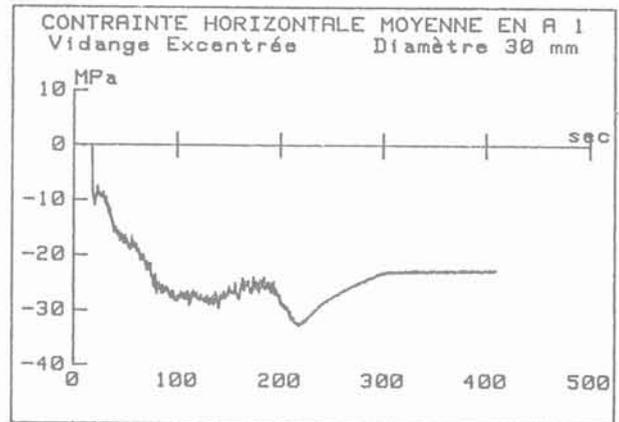


Fig. 10. — Evolution de la contrainte horizontale au pied de la génératrice du modèle le plus proche de l'orifice de vidange lors d'une vidange excentrée.
 Fig. 10. — Evolution of the horizontal stress at the bottom of the envelope close to the discharge aperture during an off-centered discharge.

— lors du déclenchement de la vidange aucun transitoire de pression (« switch ») n'est enregistré. Sur modèle l'existence de ce phénomène a été recherchée en auscultant quelques voies avec une fréquence d'échantillonnage élevée de 1 kHz, aucun phénomène de « switch » n'a été noté.

7. CONCLUSIONS

L'étude qui a été réalisée dans le cadre du projet sur le comportement des silos métalliques a permis d'établir que les essais sur modèle réduit en centrifugeuse constituaient une approche expérimentale bien maîtrisée et susceptible de fournir des résultats représentatifs de situations observées sur ouvrage grandeur réelle.

En cela, les travaux ouvrent de nouvelles perspectives pour l'étude de différentes configurations de silos céréaliers ou afin de mieux connaître les sollicitations qui se développent en phases d'exploitation.

Sous l'angle scientifique, les essais sur modèle réduit en centrifugeuse avec utilisation de prise de vues vidéo et des techniques de traitement d'images sont un moyen d'accès à la connaissance particulièrement intéressant pour l'analyse des modes d'écoulement et la détermination des trajectoires au sein de la matière ensilée, observations pratiquement impossibles à faire sur un ouvrage réel.

BIBLIOGRAPHIE

1. BROZZETTI J. (1989), *Recherches sur le comportement des silos métalliques sous l'action de la matière ensilée*. Présentation des objectifs et des moyens. Construction métallique n° 2, pp. 5-6.
2. CORTÉ J.-F. (1989a), *L'essor de la modélisation en géotechnique*. Revue Française de Géotechnique, n° 48, pp. 7-13.
3. CORTÉ J.-F. (1989b), *Rapport général. Session 11. XII^e Congrès International de Mécanique des Sols et Travaux de Fondations*. Rio de Janeiro. Tome IV. Balkema (à paraître).
4. CORTÉ J.-F., GARNIER J. (1986), *Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 146, pp. 5-28.
5. KHELIL A., SOKOL L., ROTH H. (1989), *Comparaison des résultats in situ avec différents modèles globaux d'évaluation des pressions sur les parois*. Construction métallique n° 2, pp. 51-64.
6. KRISTIANSEN N.O., MUNCH ANDERSEN J., NIELSEN J. (1988), *A centrifuge study of load and flow conditions in silos with cohesive media*. Proc. Centrifuge'88. Ed. J.-F. Corté, Balkema, pp. 593-600.
7. LEPERT P., CORTÉ J.-F. (1989), *Etude d'un silo métallique en centrifugeuse*. Construction métallique n° 2, pp. 97-104.
8. LEPERT P., RANAIVOSON D., GOURDON J.-L. (1989), *Centrifuge modelling of the flow of a granular medium*. Proc. International Conference on Micromechanics of Granular Media. Clermont-Ferrand, Balkema, pp. 477-484.
9. MUNCH ANDERSEN J., NIELSEN J. (1984), *Use of physical silo models*. International Seminar on Design of concrete Structures and Use of Model Analysis, Watford, England.
10. MUNCH ANDERSEN J., NIELSEN J. (1986), *Size effects in slender grain silos*. International Journal of Storing and Handling Bulk Materials, Vol. 6, n° 5.
11. NIELSEN J. (1977), *Model law for granular media and powders with a special view to silo models*. Archives of Mechanics, 29,4, pp. 547-560, Varsovie, 1977.