

" Comparaison des mesures de pressions sur les parois de silos en vraie grandeur avec les valeurs calculées par les normes".

"A comparison of measured pressures in full scale silos with code recommendations".

A. KHELIL* , J.C. ROTH* et J. BROZZETTI**

*LEMTA UA 875 CNRS GRRS IUT LE MONTET
54600 VILLERS LES NANCY

** C.T.I.C.M. DOMAINE St-PAUL
78470 St REMY LES CHEVREUSE

Résumé:

Cette étude, effectuée en collaboration avec le CTICM s'inscrit dans le cadre de la "Mission silos" qui a pour objectif l'établissement d'une nouvelle norme. Le dimensionnement d'un silo nécessite une bonne connaissance des actions de la matière ensilée et des modalités de vidange. Nous présentons dans cette étude l'analyse des mesures de pression sur les parois de silos en vraie grandeur de Chartres. Ces mesures sont obtenues durant les différentes phases d'ensilage (remplissage et vidange centrées, excentrées). Les silos testés sont à fond plats, de section carrée ou circulaire avec des parois verticales lisses et ondulées. L'action de la matière ensilée sur les parois est mesurée au moyen de capteurs spéciaux, donnant deux composantes d'effort: la pression horizontale et le frottement. Les résultats de mesure sont comparés aux calculs théoriques établis par les normes DIN 87, et la nouvelle norme P22-630.

Abstract:

This work is developed with the CTICM for the "mission silos". The pressure measurements made with a wheat at Chartres experimental base are reported here. The base included four silos cell of different dimensions and with rough or smooth walls. Special transducers placed in the wall determine simultaneously the friction (tangential force) and the normal force exerted by the ensiled material on the wall. The experimental results are analysed and the mechanical parameters (wall friction and the pressure coefficient) are determined. Pressure distributions predicted by various design codes (DIN 87, P22-630) are compared with the experimental results.

I Introduction

Depuis la théorie de Janssen (1895) de nombreux chercheurs se sont intéressés au problème de la poussée dans les silos, diverses propositions de solutions ont été élaborées. Dans la littérature, on relève très peu d'expérimentation sur silos en vraie. Par contre les essais sur des modèles réduits de silos sont nombreux et constituent souvent un support de comparaison avec les théories de calcul et les normes. Les mesures rapportées dans cette article sont obtenues sur les silos en vraie grandeur de la base expérimentale de Chartres. Les efforts de pression sont obtenues au moyen de capteurs spéciaux [1] mesurant simultanément l'effort horizontal (normal à la paroi) et l'effort de frottement (tangentiel à la paroi). Ces mesures sont réalisées en remplissage, en vidange centrée et en vidange excentrée. Le coefficient de pression ainsi que le coefficient de

frottement sont déterminée à partir des mesures des capteurs de parois. Des capteurs sont également disposés au fond de chaque cellule pour mesurer la pression verticale sur la base. Les résultats de ces capteurs de fond sont comparés à ceux issus du calcul par la prise en compte du frottement et du poids de la matière ensilée.

Enfin nous comparons les variations de pressions mesurées en fonction de la profondeur avec les résultats donnés par la Norme DIN 87 et la nouvelle norme P22630.

II Description de la base expérimentale de Chartres

La base comporte 4 cellules de divers types, permettant d'examiner l'influence des différents paramètres sur les pressions exercées par la matière ensilée [1].

Les caractéristiques principales des cellules sont montrées dans le tableau 1

Tableau 1 : caractéristiques principales des cellules

Cellules	A	B	C	D
forme géométrique	carrée	rectangulaire	circulaire	circulaire
forme des parois	trapézoïdale	trapézoïdale	ondulée	lisse
Dimensions (m)	6,42x16	2,25x6,42x 16	8x12,5	6x7,5
Rayon hydraulique	1,605	0,833	2	1,5
Fonction de vidange	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée	centrée/ excentrée

III fonctionnement de la base expérimentale

En phase d'essais, soit en opération de remplissage, soit en opération de vidange, la matière ensilée sera transférée d'un silo à un autre:

- En phase de mesure lors du remplissage

La matière ensilée sera extraite d'une cellule pleine et acheminée après pesage dans la cellule d'essais.

- en phase de mesure lors de la vidange.

La matière ensilée dans la cellule d'essai sera vidangée, pesée et stockée dans une cellule receveuse.

l'action de la matière ensilée sur les parois est mesurée au moyen de capteurs spéciaux, donnant deux composantes d'effort de pression: la pression horizontale σ_x et le frottement τ . Le tableau 2 donne la position des ces capteurs sur les parois des cellules A, C et D

Tableau 2 : position des capteurs de paroi

[1A] : 5,8 m	[2A] : 8,2m	[3A] : 9,8 m	[4A] : 11,4 m	[5A] : 13,4m	
[1D]: 2,38 m	[2D] : 3,50 m	[3D] : 4,61 m	[4D] : 5,73 m	[5D] : 6,85m	
[1C]: 0,487	[2C]: 1,63 m	[3C] :2,7 m	[4C]: 3,9m	[5C]: 5,07 m	[6C]: 6,2 m
[7C]: 7,3m	[8C]: 8,4m	[9C]: 9,6m	[10C] :10,7m	[11C]:11,9m	

IV Expérimentation

Les mesures sont obtenues aux cours de plusieurs cycles de remplissage et de vidange. Toutes les manipulations sont exécutées à partir d'une centrale de commande regroupant les appareils de mesure et autorisant le contrôle à partir d'un tableau synoptique général. La scrutation des voies de mesure se fait simultanément avec le remplissage de la cellule et les résultats sont stockés dans des fichiers sur disquettes. La vidange se fait après une nuit ou plusieurs jours de stockage pour permettre à la matière de se tasser. La mesure se fait simultanément avec la vidange. La matière utilisée pour tous les essais est le blé de poids volumique 835 daN/m³ et d'angle de frottement 28°

Mode d'écoulement observé au cours de la vidange

Le mode d'écoulement de la matière durant la vidange joue un rôle essentiel sur la distribution des pressions sur les parois. La vidange de la cellule "D" s'effectue en cheminée; la matière s'écoule par une cheminée centrale. Dans la cellule "C" (un peu plus élancé que la cellule "D") la cheminée d'écoulement est moins bien marquée que dans la cellule "D". Quant à la cellule "A" la vidange se fait en semi-masse, c'est à dire : la partie supérieure fonctionne en écoulement en masse et la partie inférieure fonctionne en écoulement en cheminée.

V Analyse des résultats

V-1 Cellule "D"

V-1-1 remplissage

La figure (1) représente les courbes donnant les contraintes horizontales en fonction de la profondeur pour des variations de 10% de hauteur d'ensilage. Les différents points représentent les valeurs des contraintes mesurées par chaque capteur de paroi à la profondeur z correspondante. Nous constatons que les courbes expérimentales ont une allure générale assez régulière. L'évolution des mesures ponctuelles capteur par capteur en cours de remplissage est progressive avec un accroissement régulier des valeurs, donnant lieu à une série de traits parallèles.

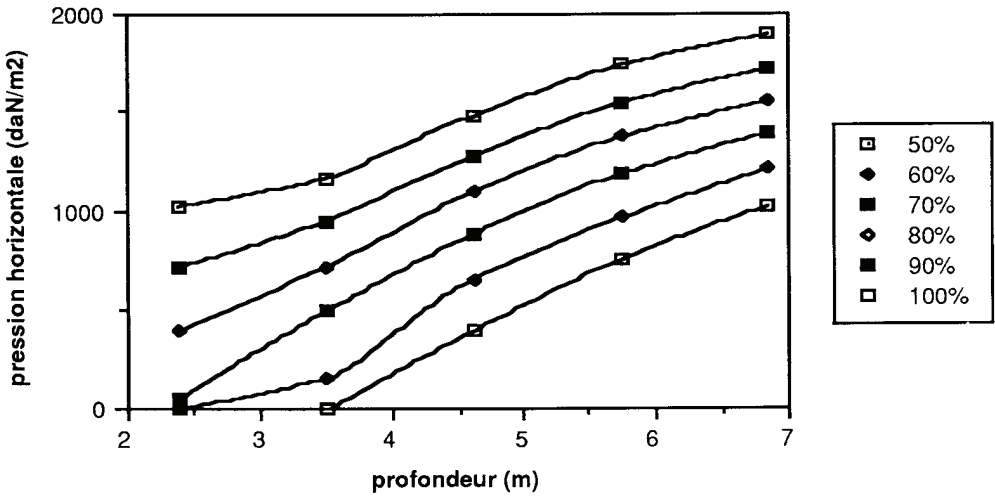


figure (1) variation de le contrainte horizontale en fonction de la profondeur

V-1-2 vidange

Les figures (2) (3) représente les variations de contraintes horizontales et de frottement au cours de la vidange pour les différents capteurs de paroi. On constate qu'au début de la vidange les contraintes n'augmentent que légèrement par rapport à celles obtenues à la fin du remplissage. Cette augmentation se fait sentir différemment sur la hauteur de la cellule. En effet le capteur [5D] situé dans la partie basse de la cellule, indique une très faible augmentation. Le différence relativement faible entre les contraintes mesurées au remplissage et celles mesurées à la vidange est due essentiellement à l'élançement faible de la cellule.

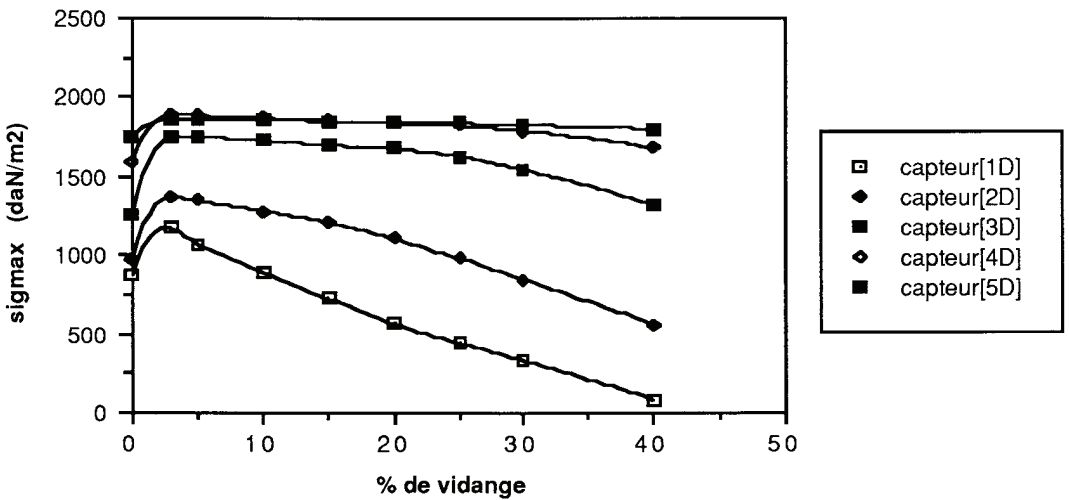


figure (2) : variation de la contrainte horizontale durant la vidange centrée

V-1-3 Coefficient de pression λ

Le coefficient de pression λ est l'un des paramètres essentiels intervenant dans les formules de calcul des pressions. Il est déterminé à partir des mesures des capteurs de parois. La contrainte verticale est également déduite des mesures de frottement et du poids de la matière ensilée.

$$\lambda = \sigma_x / \sigma_z$$

Les valeurs de λ en remplissage et vidange centrée sont consignées dans le tableau 3

Tableau 3 : valeurs de λ en remplissage et vidange centrée

Capteur	Remplissage	vidange
[1D]	0,42	0,652
[2D]	0,431	0,597
[3D]	0,395	0,608
[4D]	0,436	0,582
[5D]	0,386	0,482

La figure (4) montre qu'au remplissage λ est pratiquement constant et qu'à la vidange il varie en fonction de la profondeur. Cette variation se fait notamment sentir sur la partie supérieure et près du fond de la cellule.

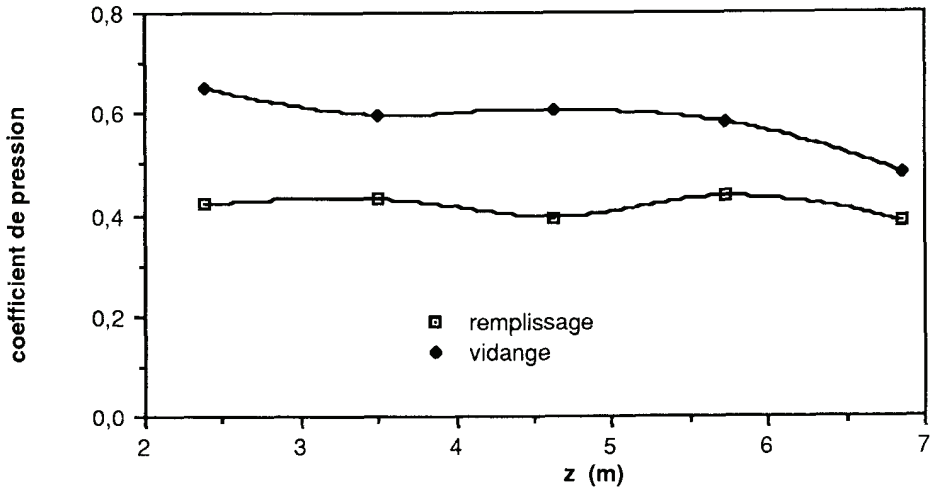


figure (4) : Coefficient de pression en fonction de la profondeur

V-1-4 Contrainte verticale sur le fond de la cellule

Les capteurs de fond de cellule mesurent directement la contrainte verticale, il est par conséquent possible de faire la comparaison avec la contrainte verticale sur le fond déduite des mesures de capteurs de parois et du poids de la matière ensilée. Le tableau (4)

fait apparaitre cette comparaison. La différence relative maximale ne dépasse pas 9%. L'ensemble des mesures de parois et de fond permet de retrouver le poids de la matière ensilée à 8% près. Ce résultat est très satisfaisant car le calcul de la contrainte verticale est liée à des incertitudes sur la répartition du frottement sur toute la paroi.

Tableau (4) Comparaison entre contrainte verticale mesurée sur le fond et celle calculée à partir des mesures de frottement sur la paroi.

Contrainte verticale (daN/m ²)	Remplissage	Vidange
Contrainte verticale mesurée	4 401	4 065
Contrainte verticale calculée	4 781	4 362
Différence en %	7,95	6,8

V-1-5 Coefficient de frottement en paroi

Le coefficient de frottement en paroi est le rapport de la contrainte tangentielle (frottement) et de la contrainte horizontale. Le tableau (5) montre les valeurs de l'angle de frottement en paroi obtenu en remplissage.

Tableau 5 : angle de frottement en paroi (remplissage)

capteur	hauteur d'ensilage en m	3,13	3,58	4,48	4,92	5,82	6,27	6,72	7,16	7,61	7,97
[3D]	sigmax (daN/m ²)	0	139	548	827	939	1069	1172	1274	1367	1479
	taux (daN/m ²)	0	37	158	251	288	325	353	390	418	465
	atn (taux/sigmax) (°)	0	14,9	16	16,8	17	16,91	16,76	17	17	17
[4D]	sigmax (daN/m ²)	465	613	232	1134	1237	1348	1442	1544	1637	1739
	taux (daN/m ²)	121	167	874	306	344	362	390	418	446	474
	atn (taux/sigmax) (°)	14,5	15,2	14,84	15,5	15,5	15	15	15	15	15
[5D]	sigmax (daN/m ²)	790	911	1134	1339	1441	1534	1627	1720	1804	1897
	taux (daN/m ²)	251	288	372	437	465	502	530	558	586	613
	atn(taux/sigmax) (°)	17,6	17,5	18	18	17,7	18	18	18	18	17,7

V-1-6 Comparaison entre résultats d'essais et de calcul

a) remplissage

Les courbes des figures (5) (6) donnent la répartition de la contrainte horizontale et de frottement en fonction de la profondeur suivant les normes DIN 87 et P22-630*. Sur ces courbes sont portées également les valeurs moyennes mesures obtenues à la profondeur z correspondant à la position de chaque capteurs. Les caractéristiques de la matière ensilée considérées sont celles recommandées par les normes elles mêmes.

La comparaison des mesures avec la courbe théorique donnée par P22-630 fait apparaitre une zone à la partie supérieure du silos dans laquelle les valeurs expérimentales

dépassent légèrement les valeurs théoriques. La norme DIN 87 donne des valeurs de contraintes horizontales trop élevées par rapport aux mesures. La courbe de frottement établie à partir de P22-630 couvre globalement les mesures de contrainte de frottement.
 * P22-630 : projet de norme Française.

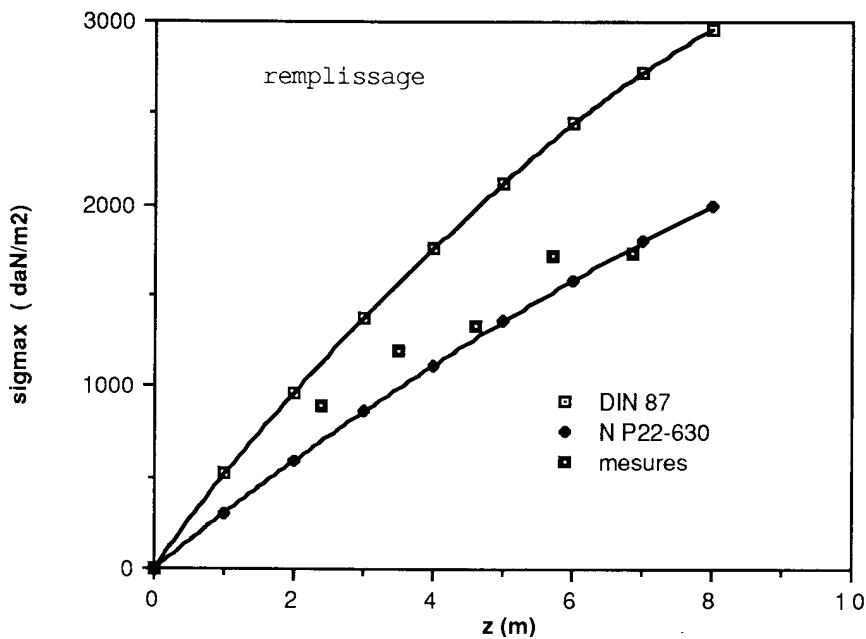


figure (5) : courbes contrainte horizontale-profondeur (remplissage)

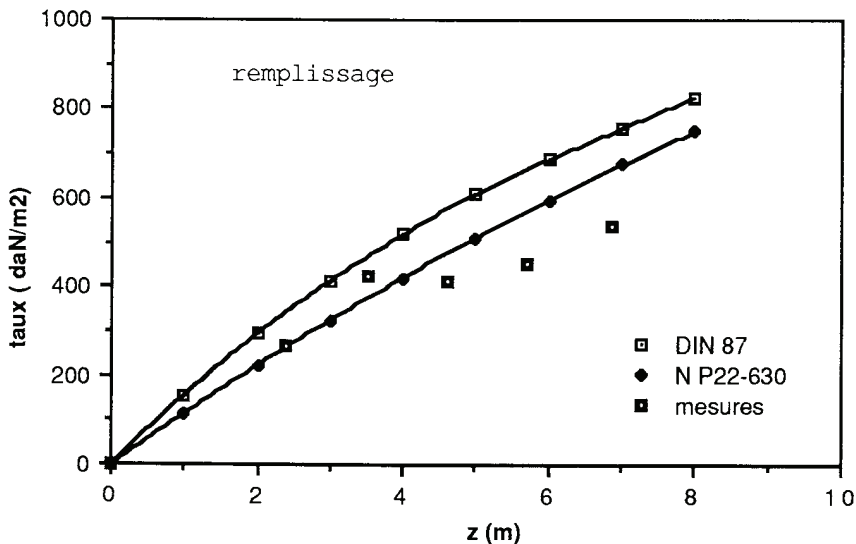


figure (6) : courbe frottement - profondeur (remplissage)

b) Vidange centrée

Sur les figures (7) et (8) sont représentées les courbes suivant les normes DIN 87 et P22-630 ainsi que les points expérimentaux. Signalons que le projet de norme P22-630 tient compte des modalités de vidange dans le calcul des pressions. Le critère de classification (selon P22-630) des différents type d'écoulement appliqué à la cellule "D" donne un écoulement en cheminée pour cette cellule (ce qui confirme les observations faites sur le site).

Pour la contrainte horizontale figure (7) la courbe donnée par P22-630 est très proche des points expérimentaux, par contre la courbe de la norme DIN 87 s'éloigne considérablement des mesures. On signale toutefois que ces résultats expérimentaux sur silos en vraie grandeurs ont été le support du projet de norme P22-630.

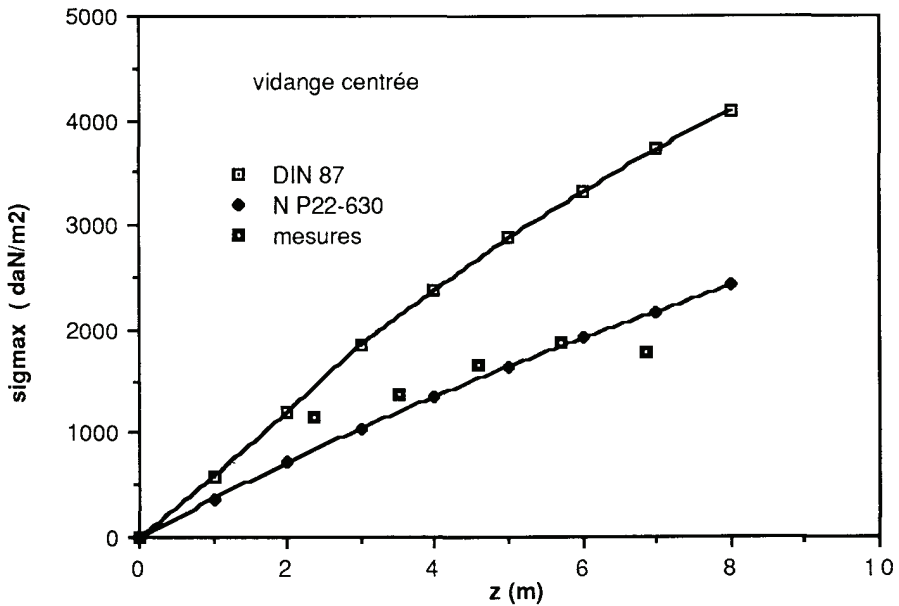


figure (7) : courbe contrainte horizontale- profondeur (vidange)

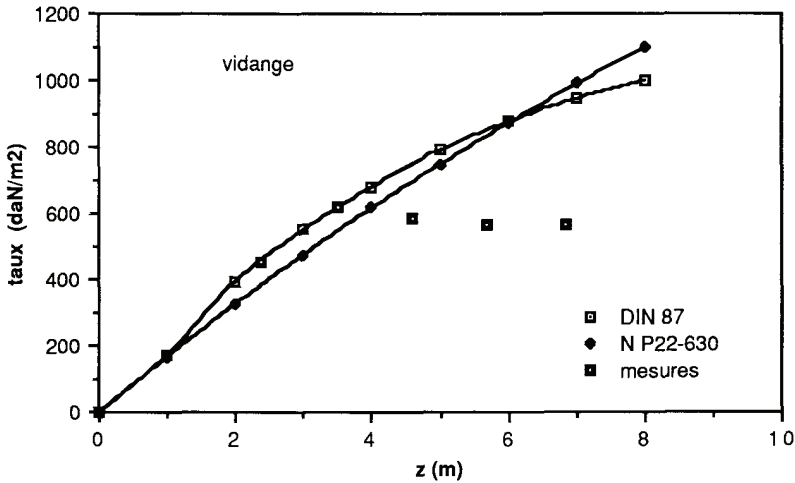
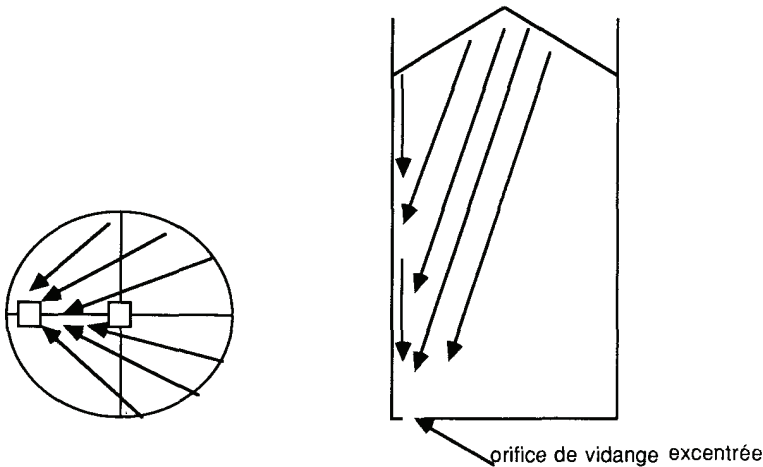


figure (8) : courbe frottement- profondeur (vidange)

c) Vidange excentrée

Le schéma d'un silo à vidange excentrée est représenté sur la figure (9) avec en (9a) une coupe horizontale et en (9b) une coupe verticale. L'écoulement dissymétrique obtenu dans ce cas (la direction des trajectoires des grains est indiquée par les flèches) entraine une distribution dissymétrique des contraintes. Ces contraintes créent une déformation irrégulière du silo. Cette situation extrêmement complexe au niveau du champs de vitesses et de contraintes n'a pas permis à ce jour d'établir une modélisation correcte du comportement des silos à vidange excentrée. Reimbert [3] , a imaginé un système permettant d'annuler totalement les efforts de dissymétrie de vidange, en rétablissant une vidange centrée au moyen d'un tube de centrage.



(a): orifice de vidange excentrée

(b): direction de l'écoulement

figure (9) : silo à vidange excentrée

Les résultats obtenus sur la cellule "D" en vidange excentrée sont montrés sur les figures (10) et (11).

Les pressions obtenues sont mesurées sur deux génératrices :

- génératrice (1) située du côté de l'orifice de vidange excentrée
- génératrice (3) située du côté opposée à l'orifice de vidange excentrée.

On constate que les contraintes sur la génératrice (1) diminuent sensiblement en fonction de la profondeur et que sur la génératrice opposée elles varient comme si la vidange se faisait par un orifice centré. Il y a donc dissymétrie de répartition des efforts sur les parois.

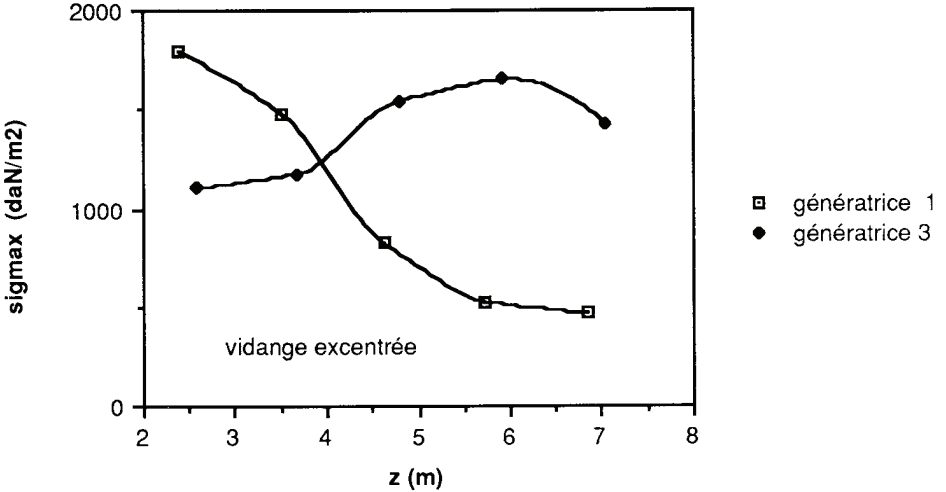


figure (10) : contrainte horizontale- profondeur

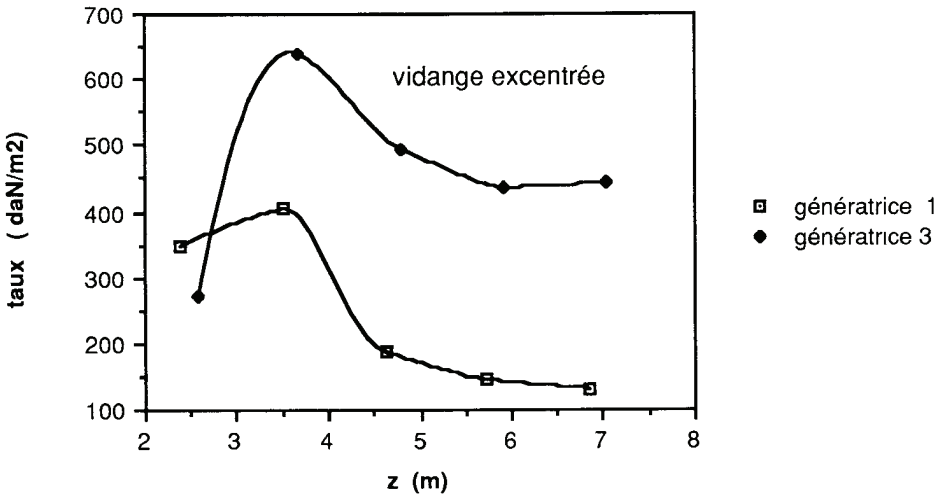


figure (11) : frottement- profondeur

V-2 Cellule "C"

la figure (12) représente les contraintes horizontales mesurées par les capteurs 2C,4C,6C durant la vidange. On constate une augmentation significative des contraintes au début de la vidange. L'amorce de l'écoulement fait passer l'état de contrainte statique de remplissage à l'état dynamique. Les contraintes horizontales et de frottement augmentent et la contrainte verticale diminue par rapport à l'état de remplissage.

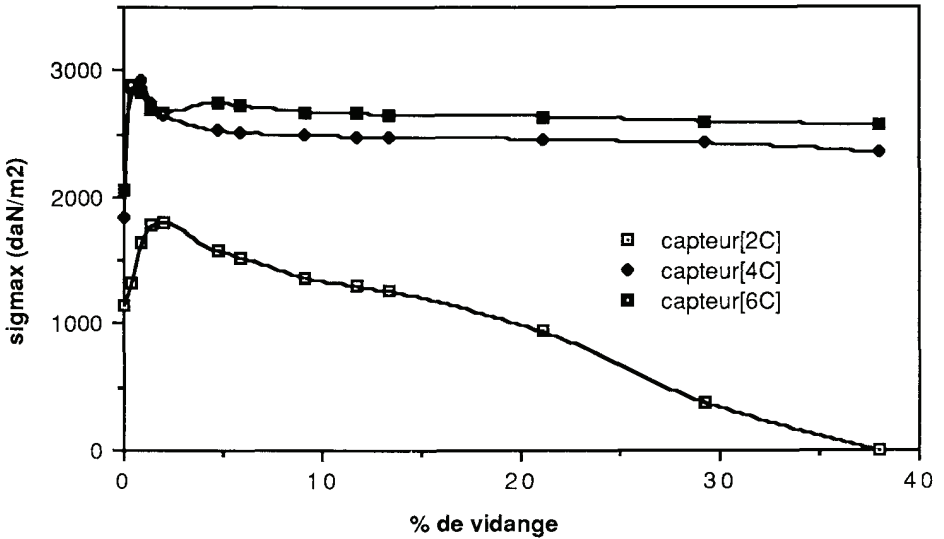


figure (12) : contrainte horizontale en fonction du % de vidange

La figure (13) représentant la variation de la contrainte horizontale en fonction de la profondeur montre une bonne concordance des résultats de mesures avec les résultats établis à partir de la norme P22-630.

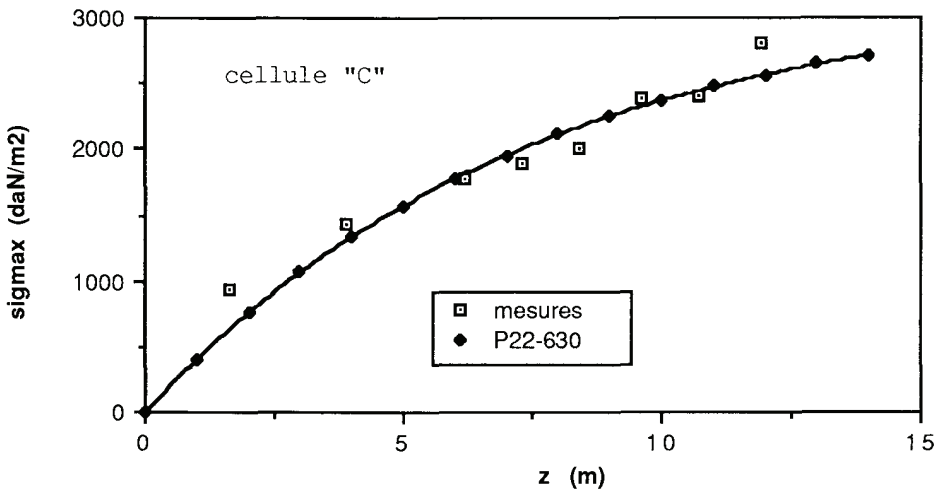


figure (13): contrainte horizontale-profondeur (remplissage)

VI Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus sur la base de Chartres ont permis pour la première fois de prendre en compte les modes d'écoulement en cours de vidange dans le calcul des pressions. Les résultats des théories s'appliquant pour le seul cas de vidange en masse ne concordent pas

avec les mesures obtenus sur la cellule à faible élancement dont la vidange s'effectue en cheminée. Le calcul de la contrainte verticale à partir du frottement conduit à la détermination du coefficient de pression λ relatif au remplissage et à la vidange. Les mesures des capteurs de fond confirment dans une marge de précision raisonnable les résultats issues des mesures des capteurs de paroi et de calcul.

Bibliographie

[1] BROZZETTI J. (1989), Description de la base expérimentale d'essais de cellules métallique de stockage. Présentation du programme d'essais. Revue CTICM N°2 1989, pp-7-17

[2] KHELIL A. (1989), Etude du champ de vitesse et de contrainte dans les silos métalliques. Thèse Doctorat INPL, Nancy 1989.

[3] REIMBERT M et A (1986), Silos theory & Praticce. Lavoisier publishing inc

[4] DIN 1055 TEIL6, 1987 Deutschenorm. Lasten Für Bauten Lasten in Silozellen-Beuth verlag Gmbh Berlin 30.

COMPARAISON DES MESURES DE PRESSION DANS LES SILOS A GRANDE ECHELLE AVEC UN CODE DE RECOMMANDATIONS

A. KHELIL et J.C. ROTH

LEMTA GRRS
IUT Génie Civil le Monet
54600 Villers-les-Nancy, France

RESUME

Ce travail est entrepris avec le CTICM pour la "mission silos". Les mesures de pression faites avec du blé au centre expérimental de Chartres sont données ici. Le centre comprenait quatre silos de différentes dimensions et leurs murs étaient soit rugueux soit lisses. Des capteurs placés dans les murs évaluaient simultanément la friction et la force normale exercée sur le mur par le produit ensilé. Les résultats expérimentaux sont analysés et les paramètres mécaniques (friction murale et coefficient de pression) sont mesurés. La distribution des pressions prévue par les nombreux codes de conception est comparée aux résultats expérimentaux.