

NORME
INTERNATIONALE

ISO
11697

Première édition
1995-06-15

**Bases du calcul des constructions —
Charges dues aux produits en vrac**

iTeh STANDARD PREVIEW
Bases for design of structures — Loads due to bulk materials
(standards.iteh.ai)

ISO 11697:1995

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/230aaf5b-fe41-4275-8c36-14a0839c4eab/iso-11697-1995>



Numéro de référence
ISO 11697:1995(F)

Sommaire

	Page
1 Domaine d'application	1
2 Symboles et unités	1
3 Pressions dans les silos	2
4 Propriétés des matériaux	9
5 Essai des produits en vrac	9
Annexe	
A Méthodes d'essai	12

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO 11697:1995](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/230aaf5b-fe41-4275-8c36-14a0839c4eab/iso-11697-1995)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/230aaf5b-fe41-4275-8c36-14a0839c4eab/iso-11697-1995>

© ISO 1995

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse

Imprimé en Suisse

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 11697 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 98, *Bases du calcul des constructions*, sous-comité SC 3, *Charges et sollicitations*.

[ISO 11697:1995](#)

L'annexe A de la présente Norme internationale est donnée uniquement à titre d'information.

Page blanche

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 11697:1995

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/230aaf5b-fe41-4275-8c36-14a0839c4eab/iso-11697-1995>

Bases du calcul des constructions — Charges dues aux produits en vrac

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale a trait aux conditions de pression présentes dans les trémies, soutes, réservoirs et silos construits au moyen des matériaux normalement utilisés en construction mécanique. Aux fins de la définition, le terme silo est utilisé dans le reste du texte de la présente Norme internationale pour représenter toutes les formes de stockage.

Les méthodes données à l'article 3 pour la détermination des charges sont prévues pour être utilisées avec le domaine pratique des structures de stockage, dans les limites ci-après:

- remplissage en continu impliquant des effets d'inertie réduits et des charges d'impact sans conséquence,
- dimension de particule maximale du produit en vrac ensilé inférieure à $0,1R$ (R = rayon hydraulique),
- écoulement du produit effectivement continu et centré avec des limites d'excentricité données en e), lors de l'utilisation de dispositifs de reprise (par exemple chargeurs, tubes d'écoulement interne, etc.),
- écoulement libre et faible cohésion [c'est-à-dire $d_a \leq 1,0R$ (voir annexe A)] du produit en vrac, dans les silos à vidange par le fond,
- excentricité e de l'orifice de sortie par rapport à l'axe du silo, inférieure à $0,25d$ pour les silos cylindriques et à $0,25a$ pour les silos rectangulaires,
- rapport de la hauteur au diamètre non supérieur à 10; la hauteur n'est pas supérieure à 100 m et le diamètre n'est pas supérieur à 50 m.

Les charges définies conformément à la présente Norme internationale tiennent compte

- d'un domaine défini de propriétés du produit en vrac;
- des variations des conditions de frottement en surface;
- de la géométrie de la structure;
- de la liaison d'autres structures et/ou matériels et de la charge de ceux-ci;
- des méthodes de remplissage, de stockage et de vidange.

Tous les paramètres ci-dessus doivent être convenus avec le client et être intégrés aux documents contractuels. La conception du silo doit être vérifiée si l'un quelconque des critères ci-dessus est modifié.

2 Symboles et unités

2.1 Symboles

- | | |
|-------|-----------------------------------------------------|
| a | Largeur du petit côté d'un silo rectangulaire |
| A | Surface de section horizontale |
| c | Cohésion |
| C | Coefficient de surpression, amplificateur de charge |
| C_z | Coefficient |
| d | Diamètre intérieur |
| d_a | Paramètre d'écoulement du matériau |
| d_b | Grosseur maximale du grain |

e	Excentricité de l'orifice de vidange
h	Hauteur totale du silo
l	Longueur du grand côté d'un silo rectangulaire
p_h	Pression horizontale due au produit stocké
p_{he}	Pression horizontale pendant la vidange
p_{hf}	Pression horizontale en paroi après chargement
p_{h0}	Pression horizontale en paroi dans la section parallèle après chargement
p_{ni}	Pression normale par rapport à la paroi de trémie inclinée ($i = 1, 2, 3$)
p_s	Surpression
p_t	Contrainte de traction dans la paroi de la trémie, due au frottement
p_v	Pression verticale due au produit stocké
p_w	Contrainte de traction dans la paroi verticale, due au frottement
P_w	Force verticale résultante dans la paroi du silo
R	Rayon hydraulique de la section horizontale ($= A/u$)
s	Longueur du côté de la zone carrée influencée par la charge de correction (patchboard)
t	Épaisseur de paroi
u	Périmètre en coupe transversale de la section horizontale
z	Profondeur verticale mesurée à partir de la surface horizontale effective
α	Angle d'inclinaison de la paroi de la trémie par rapport à l'horizontale
β	Facteur d'augmentation pour la charge de correction
γ	Poids volumique du produit stocké
γ_1	Poids volumique du produit stocké aéré
λ	Rapport de la pression horizontale à la pression verticale (rapport de contraintes)
μ	Coefficient de frottement entre le produit stocké et la paroi ($= \tan \phi_w$)
σ_r	Contrainte de référence

σ_v	Contrainte verticale dans un échantillon pour l'essai de cisaillement
σ_w	Précontrainte (verticale) dans un échantillon pour l'essai de cisaillement
σ_{w1}	Contrainte réelle (verticale) dans un échantillon pour l'essai de cisaillement
φ	Angle effectif de frottement interne
φ_c	Angle de frottement interne dans un échantillon pour essai
φ_w	Angle de frottement aux parois
τ_{fi}	Contrainte de cisaillement maximale mesurée dans un échantillon pour l'essai de cisaillement ($i = 0$ ou 1)

2.2 Unités de mesure

Les unités de mesure utilisées dans la présente Norme internationale sont les unités du Système international d'unités (SI).

3 Pressions dans les silos

Les pressions et les charges indiquées dans la présente Norme internationale sont des valeurs nominales substituant des fractiles respectifs pendant la durée de vie calculée de la structure ou la permanence de la conception.

3.1 Principes de la pression de silo

Les pressions de remplissage des produits en vrac dépendent essentiellement des propriétés du produit et de la géométrie du silo. Toutefois, les pressions de vidange sont également influencées par les modes d'écoulement qui se manifestent pendant la vidange. En conséquence, une évaluation du comportement de l'écoulement du produit doit être réalisée pour chaque conception de silo.

3.1.1 Types d'écoulement (voir figure 1)

Dans l'évaluation de l'écoulement de produits en vrac, il est nécessaire d'opérer une distinction entre trois types d'écoulement principaux:

- Écoulement massique** [voir figure 1 a)]: Profil d'écoulement dans lequel toutes les particules stockées sont mobilisées pendant la vidange du silo.

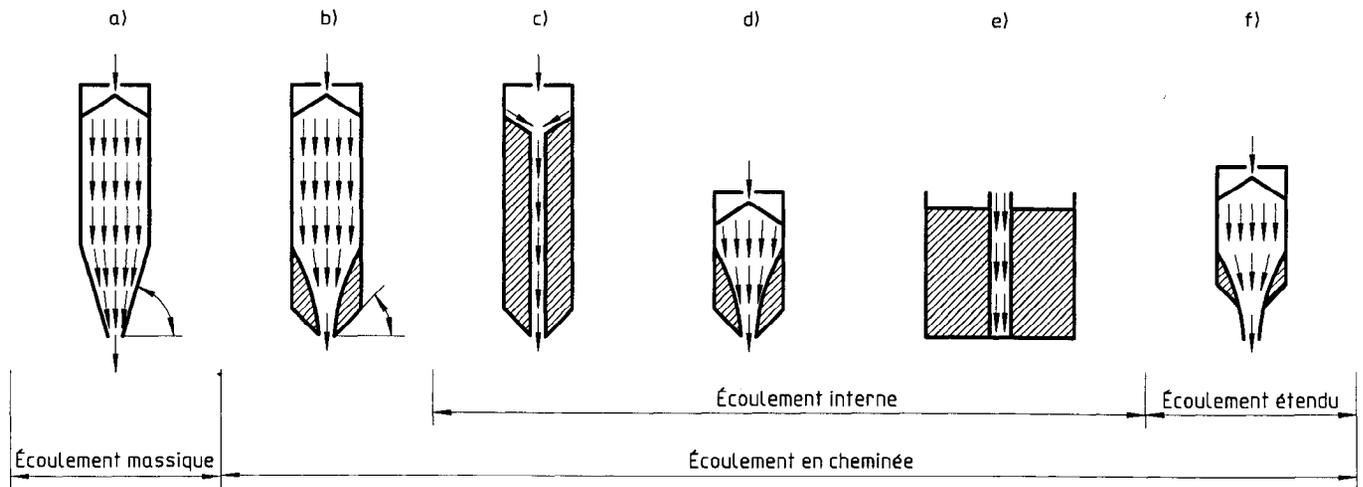


Figure 1 — Types d'écoulement

- b) **Écoulement en cheminée (ou écoulement en noyau)** [voir figure 1 b) à f)]: Profil d'écoulement dans lequel un canal de produits d'écoulement se développe dans une zone confinée au-dessus de l'orifice de sortie, le produit adjacent à la paroi à proximité de l'orifice de sortie restant stationnaire. Le canal d'écoulement peut couper la paroi de la section parallèle ou s'étendre jusqu'à la surface supérieure. Dans ce dernier cas, ce type est appelé écoulement interne [voir figure 1 c) à e)].
- c) **Écoulement étendu** [voir figure 1 f)]: Profil d'écoulement dans lequel un écoulement massique se développe dans une trémie à fond escarpé, pour se combiner à une zone stationnaire dans une trémie supérieure moins escarpée au bas de la section parallèle. La zone d'écoulement massique s'étend alors jusqu'en haut de la paroi de la section parallèle.

Des distributions de pression différentes sont associées à chacun des types d'écoulement ci-dessus.

Les conditions nécessaires pour l'écoulement massique dépendent de l'inclinaison de la paroi de la trémie et du coefficient de frottement entre le produit et la paroi. Elles peuvent être estimées en utilisant la figure 2 pour les trémies coniques et axisymétriques, et la figure 3 pour les configurations qui produisent un écoulement plan. Les régions de transition illustrées sur les figures 2 et 3 représentent des conditions dans lesquelles le type d'écoulement peut changer soudainement pour passer de l'écoulement massique à l'écoulement en cheminée, d'où la production d'un écoulement instable avec des fluctuations de pression. Si ces conditions ne peuvent pas être évitées, le silo doit être conçu à la fois pour un écoulement massique et un écoulement en cheminée.

Un silo ne peut être conçu pour un écoulement en entonnoir que si la figure 2 ou la figure 3 établit que ceci constitue le seul type d'écoulement possible.

Les silos à vidange par le haut peuvent être conçus comme s'ils fonctionnaient toujours en écoulement interne.

3.1.2 Analyse de la pression

Dans la présente Norme internationale, le calcul des pressions de silo est basé sur la théorie de Janssen, conformément aux hypothèses suivantes:

- équilibre vertical statique;
- pression verticale uniforme agissant sur toute section horizontale quelconque;
- dans des silos cylindriques, les pressions latérales sont distribuées symétriquement sur la circonférence de la paroi;
- le frottement aux parois dépend uniquement de la pression latérale;
- coefficient de frottement aux parois constant (c'est-à-dire frottement de Coulomb).

Toutes les hypothèses ci-dessus sont des idéalizations ou des simplifications.

En pratique, les pressions de silo sont, comme l'on sait, asymétriques en raison des effets de la ségrégation pendant le remplissage, des imperfections géométriques des parois et du remplissage ou de la vidange excentrique, même si, nominalement, ceux-ci sont concentriques. Les pressions qui règnent dans

les silos ne sont pas uniquement régies par des phénomènes statiques, mais impliquent des réponses dynamiques avec des caractéristiques probabilistes.

Le remplissage ou la vidange excentrique d'un silo peut entraîner des charges importantes asymétriques au niveau des parois, du plancher et des éléments d'appui.

Néanmoins, les pressions calculées en utilisant les méthodes proposées dans la présente Norme internationale sont en bonne conformité, pour l'ensemble, avec les mesures à condition de prendre en compte tous les aspects de la conception qui sont spécifiques à chaque silo en particulier, comme les variations inhérentes aux matériaux, etc.

Pendant le remplissage et le stockage, un état de contrainte élastique ou actif est créé à l'intérieur de la

masse stockée. Lorsque le silo se vide avec un écoulement en cheminée, cet état de contrainte est perturbé à des degrés divers sur la hauteur du silo. Dans la région où le canal d'écoulement coupe la paroi, une position qui varie à la fois dans le plan vertical et dans le plan horizontal, l'état de contrainte se transforme en un état passif avec augmentation correspondante du rapport de la pression latérale à la pression verticale. Pour répondre à cette situation, on a introduit un coefficient de surpression C multiplicatif dans le calcul de la pression. Ce coefficient est tiré de l'expérience et des mesures expérimentales en utilisant différents produits en vrac (voir article 5). Il tient également compte des augmentations de pression locales dues aux imperfections de la géométrie des parois, de l'absence d'homogénéité du produit en vrac, des propriétés de l'effet «slip-stick» et des petites excentricités de vidange.

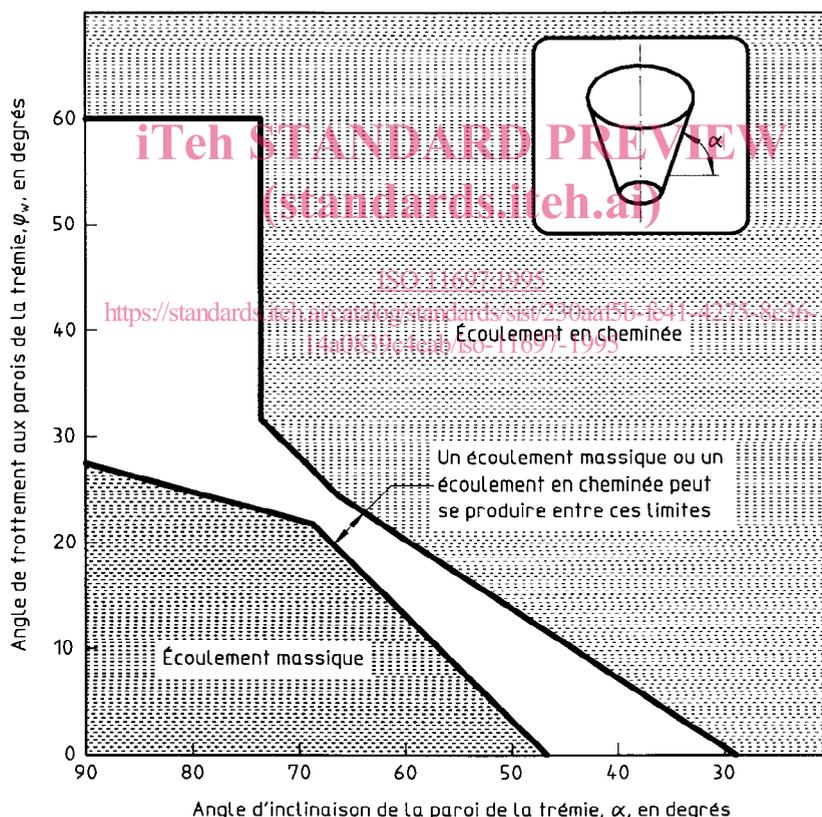


Figure 2 — Limite entre l'écoulement massique et l'écoulement interne pour les trémies circulaires

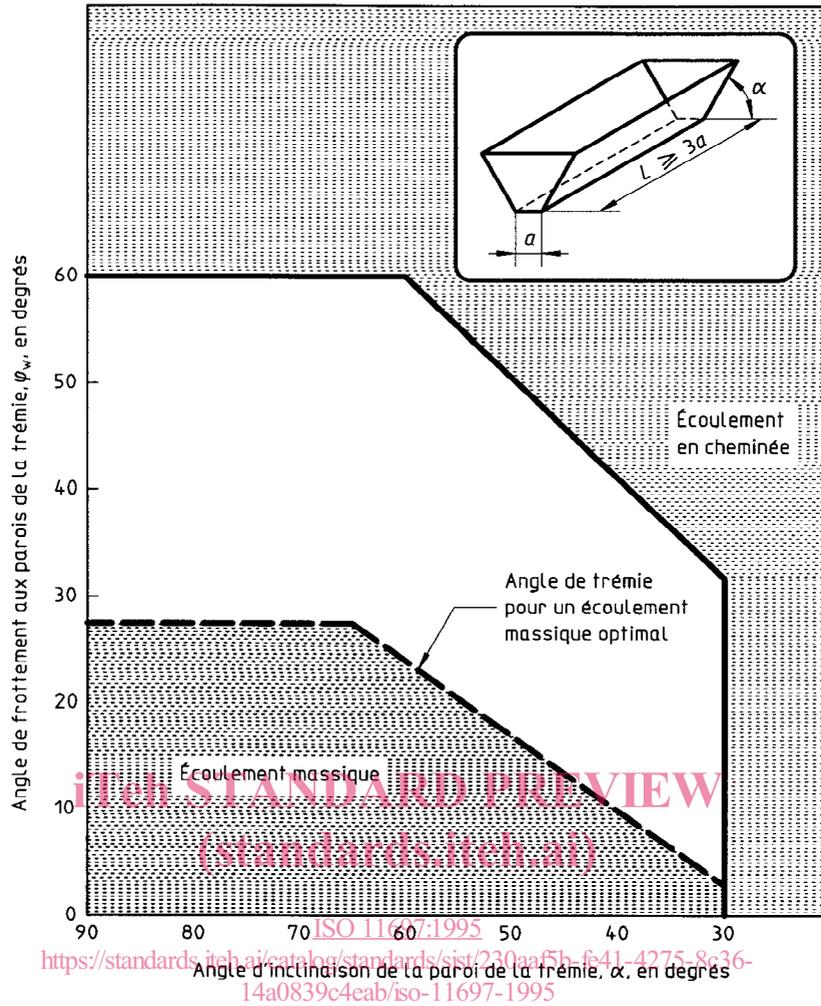


Figure 3 — Limite entre l'écoulement massique et l'écoulement interne pour les trémies planes

La conception du silo doit tenir compte des combinaisons de paramètres défavorables lors de la détermination des charges de calcul.

Pour le calcul des pressions latérales et verticales, la donnée pour la coordonnée verticale z est prise à partir de la surface horizontale fictive représentant la masse réelle du produit en vrac stocké et son poids volumique présumé. Le niveau de surface du solide en vrac stocké peut être modifié par les conditions d'aération, de remplissage pneumatique, la vibration des parois du silo ou la distribution mécanique du produit pendant le remplissage.

Dans la présente Norme internationale, on suppose que les pressions calculées sont continues. Dans des situations où les dimensions de particules sont importantes par comparaison avec l'épaisseur de paroi, le besoin de dispositions spéciales doit être examiné.

3.2 Équations de base

Les pressions à une profondeur z de la section cylindrique, selon la théorie de Janssen, sont les suivantes:

$$p_{wf}(z) = \gamma R \times C_z(z) \quad \dots (1)$$

$$p_{hf}(z) = \frac{\gamma R}{\mu} \times C_z(z) \quad \dots (2)$$

$$p_{vf}(z) = \frac{\gamma R}{\lambda \mu} \times C_z(z) \quad \dots (3)$$

Le coefficient C_z est donné par:

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad \dots (4)$$

La profondeur z_0 est donnée par:

$$z_0 = \frac{R}{\lambda \mu} \quad \dots (5)$$

Les contraintes de frottement, p_{wf} , qui agissent sur la paroi, peuvent être intégrées verticalement pour calculer la force verticale résultante dans la paroi, $P_w(z)$, par unité de surface agissant à la profondeur z , à l'aide de l'équation suivante:

$$P_w(z) = \int_0^z p_{wf}(z) dz = \gamma[z - z_0 C_z(z)] \quad \dots (6)$$

Les propriétés γ , μ et λ des produits en vrac sont données à l'article 4.

3.3 Pression sur la paroi

La pression de remplissage qui agit sur la paroi de la section cylindrique est calculée directement à partir des équations (1), (2), (4) et (5).

Dans les silos où la zone d'écoulement coupe la paroi (c'est-à-dire tous les types d'écoulement, à l'exception de l'écoulement interne), les pressions de vidange de calcul des silos doivent être obtenues en multipliant les charges de remplissage par un coefficient de surpression C . La valeur de C doit être liée au rapport h/d :

pour	$h/d \leq 1,0$	$C = 1,0$
pour	$1,0 < h/d < 1,5$	$C = 1,0 + 0,7(h/d - 1,0)$
pour	$h/d \geq 1,5$	$C = 1,35$

Ces valeurs s'appliquent uniquement aux matériaux qui entrent dans les classes définies au tableau 1. Pour d'autres matériaux, la valeur de C peut être calculée selon la formule A.3 de l'annexe A.

Dans les silos du type à écoulement interne [voir figures 1 c), d), et e)], les pressions de vidange de calcul doivent être supposées égales aux pressions de remplissage et de stockage.

3.3.1 Charge de correction locale

Des pressions asymétriques sont inévitables, y compris dans le cas du remplissage concentrique de silos axisymétriques; elles dépendent à la fois des caractéristiques du produit en vrac et des imperfections de la géométrie du silo dans une exécution conforme à la construction. Les inhomogénéités et les modifications probabilistes dans le produit en vrac peuvent également contribuer à des fluctuations dans la zone d'écoulement. C'est pour ces raisons qu'il conviendrait de concevoir les silos de manière qu'ils résistent aux charges asymétriques, une attention toute spéciale étant accordée aux moments de flexion induits.

Pour tenir compte de ces actions, une charge dite de correction supplémentaire, d'une amplitude de $0,2p_{he}$ sera supposée agir sur toute partie quelconque de la paroi du silo sur une zone carrée d'une longueur de côté $s = 0,8A/u$ (voir figure 4). Toute contribution éventuelle à la tenue de la paroi du silo fournie par le produit en vrac doit être exclue de ce calcul.

3.3.2 Vidange excentrique

La vidange par un ou plusieurs orifices de sortie excentriques donne une distribution de pression asymétrique sur la circonférence du silo, ce qui induit des moments de flexion dans la paroi. Elle peut également induire le flambage de la paroi d'un silo en acier. Les parois du silo doivent être conçues de manière à résister à ces charges.

L'examen de nombreuses distributions de pression publiées pour une vidange excentrique qui ont des origines à la fois théoriques et expérimentales, révèle des résultats peu cohérents. La simplification qui suit est donc proposée pour estimer les pressions maximales.

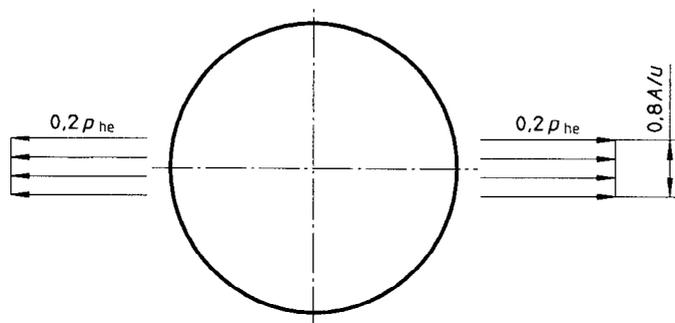


Figure 4 — Charge de correction locale

Pour des excentricités de vidange inférieures à $0,25d$ dans le cas de silos circulaires et à $0,25a$ dans le cas de silos rectangulaires, la charge de correction (voir 3.3.1) devrait être augmentée d'un facteur β donné par l'expression suivante:

$$\beta = 1,0 + 4,0e/d$$

Cette expression ne s'applique pas aux excentricités supérieures à $0,25d$.

Il convient de noter que si les excentricités sont importantes (c'est-à-dire si e se rapproche de $0,5d$), les pressions des parois latérales pendant la vidange, p_{he} , peuvent se rapprocher de zéro du côté de l'ouverture.

3.4 Charges de fond

Les valeurs des pressions verticales agissant sur les fonds de silo plats ou peu profonds, dans les conditions de chargement et de vidange (inclinaisons $\alpha \leq 20^\circ$), calculées en utilisant l'équation (3), doivent être multipliées par le facteur empirique 1,35. Ceci ne

prend pas en compte des charges d'impact pendant le remplissage ou la possibilité de charges dynamiques dues à un écoulement incontrôlable.

Pour les pressions verticales sur le plancher d'un silo avec des cellules larges et peu profondes, voir 3.7.

3.5 Charges dans les trémies

Les théories pour le calcul des pressions dans les trémies de silo sont disponibles dans la littérature, mais ce phénomène n'est toujours pas entièrement expliqué et la correspondance entre les différentes méthodes de calcul est médiocre. C'est pourquoi une méthode simple, semi-empirique pour le calcul des pressions de trémie est recommandée.

La pression normale, p_n , sur la paroi, dans les conditions de chargement et de vidange de trémies dont l'inclinaison $\alpha \geq 20^\circ$ doit être calculée comme la somme des charges dues au chargement de la trémie [équation (9)] et des charges résultant de la surcharge verticale directement au-dessus de la transition [équations (7) et (8)]. (Voir figure 5.)

iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

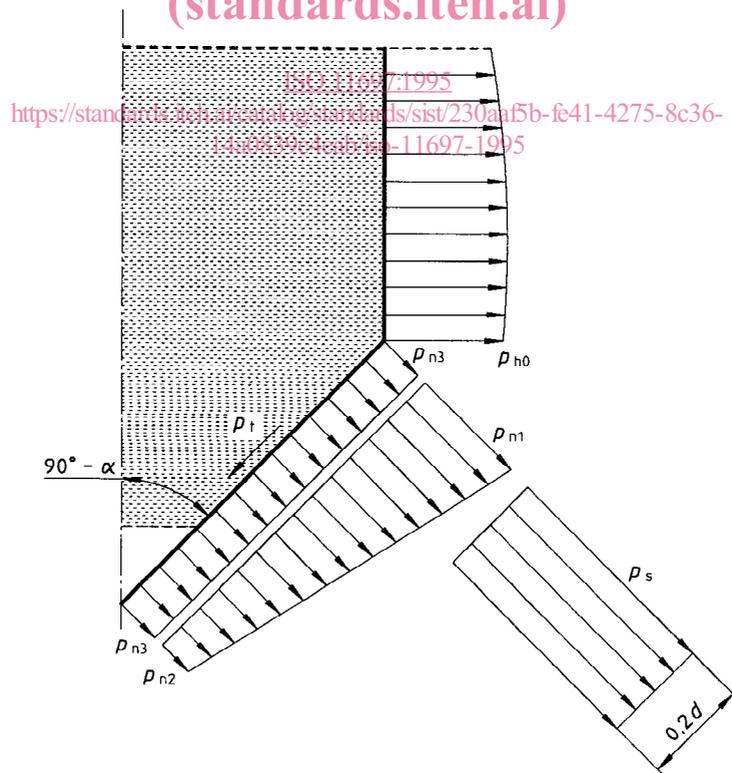


Figure 5 — Charges de trémie