

Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures

Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs

E : Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures — Part 4 : Actions in silos and tanks

D : Eurocode 1 : Grundlagen der tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 4 : Einwirkungen auf silos und Flüssigkeitsbehälter

Fascicule de documentation

publié par l'AFNOR en octobre 1997.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la prénorme européenne ENV 1991-4:1995.

Analyse

La présente partie de l'Eurocode 1 donne des actions exercées par les matières ensilées à introduire dans les calculs de stabilité des silos et réservoirs.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : génie civil, structure, conception, construction, règle de construction, calcul, stabilité, charge, silo, réservoir.

modifications

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55



Membres de la commission de normalisation

Président : M MATHEZ

Secrétariat : BNTEC

M	AFSALI	CETIM
M	BALOCHE	CSTB
M	BAR	SETRA
M	BAZIN	CSTB
M	BIETRY	CSTB
MM	CHAUVEL	EDF/SEPTEN
M	CLAVIER	BUREAU VERITAS
M	CONNER	AFNOR
M	DARDARE	CERIB
M	DELORME	DIRECTION EQUIPEMENT
M	DEVILLEBICHOT	SNBATI
M	DUBOIS	CETI
M	ETIENNE	DAEI
MME	FERNANDEZ	AFNOR
M	GIRAUD	CEBTP
M	GROSJEAN	UNM
M	HRABOVSKY	BNTEC
M	JACOB	LCPC
M	JACQUES	LCPC
M	JALIL	SOCOTEC
M	KOVARIK	MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DES TRANSPORTS ET DU TOURISME / STC PM VN
M	KRUPPA	CTICM
M	LACROIX	
M	LALUNG-BONNAIRE	CRAM DE NORMANDIE
M	LENS	AFNOR
M	LERAY	CGPC
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARVILLET	SNCF
M	MATHEZ	
M	MATHIEU	SETRA
M	MILLEREUX	IRABOIS
M	PECKER	AFPS
M	PERA	IGPC
M	RAMONDEC	SNCF
M	RAOUL	SETRA
M	ROTH	IUT
M	SCHMOL	SNBATI
M	STRADY	SAEP
M	TARRIN	AGENCE POUR LA PREVENTION DES DESORDRES ET L'AMELIORATION DE LA QUALITE DE LA CONSTRUCTION
M	THONIER	SPETPFOM
MME	VALLADEAU-RONCIN	FIB

AVANT-PROPOS NATIONAL À L'EUROCODE 1-PARTIE 4

Le présent document traite des actions à prendre en compte dans le calcul dans les silos et les réservoirs. Il est à noter que les méthodes d'évaluation des actions exercées par les matières ensilées sur les parois et le fond d'un silo sont liées au dimensionnement de ces ouvrages (en béton, en métal,...).

Étant donné que les parties des Eurocodes traitant du dimensionnement des silos en béton (ENV 1992-4: Eurocode 2 Partie 4) et des silos en acier (ENV 1993-4: Eurocode 3 Partie 4) ne sont pas disponibles, le groupe de coordination des Eurocodes a estimé qu'un document d'application nationale ne peut être rédigé actuellement.

Dans ces conditions, le présent document est publié à titre provisoire et pour information, en tant que fascicule de documentation.

Les observations concernant le présent fascicule de documentation sont à adresser au BNTEC, 6/14 rue La Pérouse, 75784 PARIS CEDEX 16.

Références aux normes françaises

La correspondance entre les normes mentionnées à l'article «Références normatives» et les normes françaises identiques est la suivante :

► Normes internationales

ISO 3898 : NF P 06-005

► Eurocodes

Pour les Eurocodes, les normes équivalentes au plan national incluent le document d'application nationale.

ENV 1991-1 : XP ENV 1991-1 (P 06-101)

ENV 1991-2-1 : XP ENV 1991-2-1 (P 06-102-1)

ENV 1991-2-2 : XP ENV 1991-2-2 (P 06-102-2)

ENV 1991-2-4 : XP ENV 1991-2-4 (P 06-102-4) *)

ENV 1991-2-5 : XP ENV 1991-2-5 (P 06-102-5) *)

ENV 1991-2-6 : XP ENV 1991-2-6 (P 06-102-6) *)

ENV 1991-2-7 : XP ENV 1991-2-7 (P 06-102-7) *)

ENV 1991-3 : XP ENV 1991-3 (P 06-103)

ENV 1991-5 : XP ENV 1991-5 (P 06-104) *)

*) Certaines de ces parties sont en préparation.

Les Eurocodes-ENV cités dans l'article «Références normatives» sont divisés en parties dont seulement certaines sont disponibles. Sont listées ci-après seulement les parties déjà disponibles ou qui seront disponibles d'ici la fin de l'année 1997 :

- ENV 1992 : XP ENV 1992-1-1 (P 18-711)
XP ENV 1992-1-2 (P 18-712)
XP ENV 1992-1-3 (P 18-713)
XP ENV 1992-1-4 (P 18-714)
XP ENV 1992-1-5 (P 18-715)
XP ENV 1992-1-6 (P 18-716)
Autres parties en préparation
- ENV 1993 : ENV 1993-1-1 (P 22-711)
XP ENV 1993-1-2 (P 22-712)
Autres parties en préparation
- ENV 1994 : ENV 1994-1-1 (P 22-391)
ENV 1994-1-2 (P 22-392)
Autres parties en préparation
- ENV 1995 : ENV 1995-1-1 (P 21-711)
XP ENV 1995-1-2 (P 21-712)
Autres parties en préparation
- ENV 1996 : XP ENV 1996-1-1 (P 10-611)
XP ENV 1996-1-2 (P 10-612)
Autres parties en préparation
- ENV 1997 : XP ENV 1997-1 (P 94-250)
Autres parties en préparation
- ENV 1998 : XP ENV 1998-1-1 (P 06-031-1)
XP ENV 1998-1-2 (P 06-031-2)
XP ENV 1998-1-3 (P 06-031-3)
XP ENV 1998-5 (P 06-035)
Autres parties en préparation
- ENV 1999 : *Actuellement au stade du vote formel*

ICS 91.040.01

Descripteurs : génie civil, structure, conception, construction, règle de construction, calcul, charge, silo, réservoir.

Version française

Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs

Eurocode 1 : Grundlagen der tragwerksplanung
und Einwirkungen auf Tragwerke —
Teil 4 : Einwirkungen auf silos
und Flüssigkeitsbehälter

Eurocode 1 : Basis of design
and actions on structures —
Part 4 : Actions in silos and tanks

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 1993-06-30 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

Les membres du CEN sont tenus d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

Sommaire

	Page
Avant-propos	3
Section 1 Généralités	5
1.1 Domaine d'application	5
1.1.1 Domaine d'application de l'ENV 1991 — Eurocode 1	5
1.1.2 Domaine d'application de l'ENV 1991-4, Actions sur les silos et les réservoirs	5
1.1.3 Autres parties de l'ENV 1991	6
1.2 Références normatives	6
1.3 Distinction entre Principes et Règles d'application	7
1.4 Définitions	7
1.4.1 surface équivalente	7
1.4.2 fond plat	7
1.4.3 mode d'écoulement	7
1.4.4 matière fluidifiée	7
1.4.5 matière à écoulement libre	7
1.4.6 écoulement en cheminée (ou écoulement central) (figure 1.1)	7
1.4.7 silo d'homogénéisation	8
1.4.8 trémie	8
1.4.9 écoulement interne (figure 1.1)	8
1.4.10 surpression due à la transition	8
1.4.11 faible cohésion	8
1.4.12 écoulement en masse (figure 1.1)	8
1.4.13 pression localisée	8
1.4.14 écoulement plan	8
1.4.15 silo	8
1.4.16 réservoir	9
1.4.17 transition	9
1.4.18 zone à parois verticales	9
1.5 Notation	9
Section 2 Classification des actions	12
Section 3 Situation de projet	13
Section 4 Représentation des actions	14
Section 5 Actions sur les silos dues aux matières granulaires	15
5.1 Généralités	15
5.2 Silos élancés	16
5.2.1 Actions au remplissage	16
5.2.2 Actions à la vidange	19
5.3 Silos plats	20
5.4 Silos d'homogénéisation et silos à grande vitesse de remplissage	22
Section 6 Actions exercées par des liquides sur les réservoirs	23
6.1 Généralités	23
6.2 Caractéristiques des liquides	23
Section 7 Caractéristiques des matières ensilées	24
7.1 Caractéristiques des matières granulaires	24
7.2 Approche simplifiée	24
7.3 Essais sur les matières granulaires	25
7.3.1 Poids volumique, γ	25
7.3.2 Coefficient de frottement sur la paroi, mm	25
7.3.3 Rapport de pression horizontale/verticale, $K_{s,m}$	25
7.4 Coefficient maximal d'amplification de la poussée	26
Annexe A (informative) Bases de calcul — Suppléments à l'ENV 1991-1 pour les silos et les réservoirs	27
Annexe B (informative) Méthodes d'essai relatives aux caractéristiques des matières granulaires	28
Annexe C (informative) Actions sismiques	34

Avant-propos

Objectifs des Eurocodes

- 1) Les «Eurocodes structuraux» constituent un ensemble de normes concernant la conception structurale et géotechnique des bâtiments et des ouvrages de génie civil.
- 2) Ils ne traitent de l'exécution et du contrôle que dans la mesure où il est nécessaire d'indiquer la qualité des produits de construction et le niveau de qualité de la mise en oeuvre, nécessaires pour assurer la compatibilité avec les règles de conception.
- 3) Tant qu'un ensemble harmonisé de spécifications techniques des produits et de méthodes d'analyse des performances n'est pas disponible, un certain nombre d'Eurocodes structuraux traiteront de certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Contexte du programme Eurocodes

- 4) La Commission des communautés européennes (CCE) a entrepris d'établir un ensemble de règles techniques harmonisées concernant la conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil, afin de proposer une alternative aux différentes règles en vigueur dans les États membres et, finalement, de les remplacer. Ces règles techniques sont habituellement connues sous le nom de «Eurocodes structuraux».
- 5) En 1990, après consultation des différents États membres, la CEE a chargé le CEN d'assurer le développement, la publication et la mise à jour des Eurocodes et le secrétariat de l'AELE a accepté de soutenir le CEN dans son travail.
- 6) Le Comité technique CEN/TC 250 est responsable de l'ensemble des Eurocodes structuraux.

Programme des Eurocodes

- 7) Les travaux concernant les Eurocodes structuraux suivants sont en cours, chacun étant en général constitué d'un certain nombre de parties.
- 8) Des sous-comités distincts, chargés des divers Eurocodes énumérés ci-dessus, ont été institués par le CEN/TC 250.
- 9) La présente partie de l'ENV 1991 a été publiée en tant que prénorme européenne ENV 1991-4.
- 10) La présente prénorme est destinée à une application expérimentale et au recueil d'observations ; son développement futur est destiné à couvrir de plus grandes excentricités et des silos avec tirants intérieurs.
- 11) Dans deux ans environ, les membres du CEN seront invités à formaliser leurs observations en vue des prendre en compte pour déterminer les actions futures à entreprendre.
- 12) Entre temps, il convient d'envoyer les réactions et les observations concernant cette prénorme européenne au secrétariat du CEN/TC 250/SC 1 à l'adresse suivante :

SNV/SIA (until end May 1995)	SIS (From June 1995)
Seinaustrasse 16	Box 3295
CH-8039 ZÜRICH	S-103 66 STOCKHOLM
Suisse	Suède

ou à votre organisme national de normalisation.

Documents d'application nationaux (D.A.N.)

13) En ce qui concerne les responsabilités des autorités des pays membres en matière de sécurité, de santé et autres sujets couverts par les prescriptions essentielles de la Directive sur les produits de construction (CPD), certains éléments de sécurité de cette ENV se sont vus attribuer des valeurs indicatives, présentées entre crochets. Les autorités de chaque pays membre sont censées réviser ces valeurs et peuvent substituer d'autres valeurs définitives à ces éléments de sécurité, pour une utilisation au niveau national.

14) Il est possible que certaines normes support, européennes ou internationales, ne soient pas disponibles au moment de la publication de cette prénorme. Cependant, il est prévu qu'un Document d'application national (D.A.N.), donnant des valeurs définitives de substitution aux éléments de sécurité, en référence de normes support compatibles et donnant des indications sur l'application de cette prénorme au plan national, soit publié par chaque pays membre ou par leur organisme de normalisation.

15) Il est prévu que cette prénorme soit utilisée conjointement avec le D.A.N. en vigueur dans le pays où se situent les travaux de construction ou de génie civil.

16) Le domaine d'application de l'ENV 1991 est défini au paragraphe 1.1.1 ; celui de la présente partie est défini au paragraphe 1.1.2. Les parties supplémentaires prévues sont indiquées au paragraphe 1.1.3.

17) La présente partie est complétée par un certain nombre d'annexes informatives.

Section 1 Généralités

1.1 Domaine d'application

1.1.1 Domaine d'application de l'ENV 1991 — Eurocode 1

- 1) P L'ENV 1991 fournit les principes généraux et les actions en matière de conception structurale des bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris les aspects géotechniques, et doit être utilisé conjointement avec les ENV 1992 à 1999.
- 2) Il peut également servir de base au calcul de structures non traitées par les ENV 1992 à 1999 et lorsque interviennent d'autres matériaux ou d'autres actions de calcul structural.
- 3) L'ENV 1991 traite également de la conception structurale au niveau de l'exécution et pour les structures temporaires, quelles que soient les circonstances dans lesquelles on exige d'une structure une performance appropriée.
- 4) L'ENV 1991 n'est pas directement destinée à l'évaluation structurale de constructions existantes, en vue de projeter des réparations et des modifications ou d'étudier des changements d'utilisation.
- 5) L'ENV 1991 ne couvre pas tous les aspects des projets de constructions particulières nécessitant des considérations inhabituelles en matière de fiabilité, telles que les structures d'usines nucléaires, pour lesquelles il convient d'utiliser des règles de calcul spécifiques.

1.1.2 Domaine d'application de l'ENV 1991-4, Actions sur les silos et les réservoirs

- 1) P La présente partie fournit les principes généraux et les actions en matière de conception structurale des réservoirs et des silos, y compris les aspects géotechniques, et doit être utilisée conjointement avec l'ENV 1991-1, Bases de calcul, d'autres parties de l'ENV 1991 et les ENV 1992 à 1999.
- 2) La présente partie peut également servir de base au calcul de structures non traitées par les ENV 1992 à 1999 et lorsque interviennent d'autres matériaux ou d'autres actions de calcul structural.
- 3) Les présentes règles de calcul des silos s'appliquent dans les limitations suivantes :
 - les formes des sections des silos sont limitées à celles indiquées sur la figure 1.2 ;
 - le remplissage fait intervenir des effets dynamiques négligeables ;
 - le diamètre maximal des grains de matière ensilée ne dépasse pas $0,3 d_c$;

NOTE : Lorsque les dimensions des grains sont grandes par rapport à l'épaisseur de la paroi du silo, l'action doit être appliquée sous forme de forces isolées.

 - la matière ensilée est à écoulement libre ;
 - l'excentricité e_i de la matière ensilée, du fait du remplissage, est inférieure à $0,25 d_c$ (figure 1.2) ;
 - l'excentricité e_o du centre de l'orifice de vidange est inférieure à $0,25 d_c$ et aucune partie de cet orifice ne se trouve distant de plus de $0,3 d_c$ du plan de symétrie des silos à écoulement plan ou de l'axe des autres silos ;
 - lorsqu'on utilise des dispositifs de vidange (par exemple des vis extractives ou des tubes de vidange), l'écoulement de la matière se fait sans à-coup dans les limites d'excentricité indiquées ci-dessus ;
 - la transition se fait sur un plan horizontal unique ;
 - les limites géométriques sont :
 - $h/d_c < 10$
 - $h < 100 \text{ m}$
 - $d_c < 50 \text{ m}$
 - le silo est projeté pour un ensemble défini de matières granulaires dont les caractéristiques sont précisées.
- 4) Les règles de calcul des réservoirs s'appliquent uniquement à ceux qui entreposent des liquides à la pression atmosphérique normale.
- 5) L'ENV 1991-4 doit être utilisé conjointement avec l'ENV 1991-1 et avec d'autres parties de l'ENV 1991.

1.1.3 Autres parties de l'ENV 1991

1) D'autres parties de l'ENV 1991, actuellement en cours d'élaboration ou programmées, sont indiquées au paragraphe 1.2.

1.2 Références normatives

Cette prénorme européenne comporte par référence datée ou non datée des dispositions d'autres normes. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette prénorme européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

ISO 3898	1987	Bases de calcul des structures — Notations — Symboles généraux.
ENV 1991-1		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 1 : Bases du calcul.
ENV 1991-2-1		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-1 : Actions sur les structures — Densités, poids propres et charges d'exploitation.
ENV 1991-2-2		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-2 : Actions sur les structures — Actions sur les structures exposées au feu.
ENV 1991-2-4		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-4 : Actions sur les structures — Actions du vent.
ENV 1991-2-5		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-5 : Actions sur les structures — Actions thermiques.
ENV 1991-2-6		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-6 : Charges et déformations imposées pendant l'exécution.
ENV 1991-2-7		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 2-7 : Actions sur les structures — Actions accidentelles.
ENV 1991-3		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 3 : Actions sur les structures — Charges sur les ponts dues au trafic.
ENV 1991-5		Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures — Partie 5 : Actions sur les structures — Actions induites par les grues, les ponts roulants et la machinerie.
ENV 1992		Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.
ENV 1993		Eurocode 3 : Calcul des structures en acier.
ENV 1994		Eurocode 4 : Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton.
ENV 1995		Eurocode 5 : Calcul des structures en bois.
ENV 1996		Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie.
ENV 1997		Eurocode 7 : Calcul géotechnique.
ENV 1998		Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes.
ENV 1999		Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

1.3 Distinction entre Principes et Règles d'application

- 1) Selon la nature des différents articles, la présente partie distingue d'une part les Principes et d'autre part les Règles d'application.
- 2) Les Principes comprennent :
 - des formulations d'ordre général et des définitions ne comportant pas d'alternative ;
 - des prescriptions et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée, sauf indication contraire.
- 3) Les Principes sont identifiés par le numéro du paragraphe suivi de la lettre P.
- 4) Les Règles d'application sont des règles généralement reconnues, qui font suite aux Principes et sont conformes à leurs prescriptions.
- 5) Il est possible d'utiliser des règles différentes des Règles d'application formulées dans le présent Eurocode, pourvu qu'il soit démontré qu'elles sont conformes aux Principes concernés et présentent, au moins, le même niveau de fiabilité.
- 6) Dans la présente partie, les Règles d'application sont identifiées par un numéro suivi d'une parenthèse, comme c'est le cas pour cet article.

1.4 Définitions

Pour les besoins de la présente prénorme européenne, une liste de définitions de base figure dans l'ENV 1991-1, Bases de calcul ; les définitions supplémentaires, indiquées ci-dessous, sont propres à cette partie :

1.4.1 surface équivalente

Surface plane délimitant le même volume de matière ensilée que la surface réelle (figure 1.2).

1.4.2 fond plat

Fond de silo horizontal ou présentant des parois inclinées, d'angle $\alpha \leq 20^\circ$.

1.4.3 mode d'écoulement

Forme de l'écoulement (à la vidange) lorsque son régime est bien établi (figure 1.1) ; le silo étant proche de son niveau maximal de remplissage.

1.4.4 matière fluidifiée

Matière ensilée dans laquelle est insufflé de l'air, ce qui modifie son comportement de façon significative.

1.4.5 matière à écoulement libre

Matière présentant une faible cohésion.

1.4.6 écoulement en cheminée (ou écoulement central) (figure 1.1)

Mode d'écoulement dans lequel se développe une voie d'écoulement de matière dans une zone confinée au-dessus de l'orifice de vidange, la matière adjacente à la paroi à proximité de cet orifice restant en place. La voie d'écoulement peut atteindre la zone à parois verticales ou s'étendre jusqu'à la surface libre de la matière ensilée.

1.4.7 silo d'homogénéisation

Silo contenant une matière fluidifiée pour permettre son homogénéisation.

1.4.8 trémie

Fond de silo présentant des parois inclinées d'angle $\alpha > 20^\circ$.

1.4.9 écoulement interne (figure 1.1)

Mode d'écoulement en cheminée dans lequel la voie d'écoulement atteint la surface libre de la matière ensilée.

1.4.10 surpression due à la transition

Surpression se produisant sous la transition lors de la vidange.

1.4.11 faible cohésion

Un échantillon de matière à faible cohésion, si celle-ci est inférieure à 4 kPa, l'échantillon étant préconsolidé à 100 kPa. (L'annexe B présente une méthode de détermination de la cohésion.)

1.4.12 écoulement en masse (figure 1.1)

Mode d'écoulement dans lequel toute la matière ensilée est mobilisée lors de la vidange.

1.4.13 pression localisée

Pression censée agir sur une zone spécifiée d'une partie quelconque de la paroi d'un silo.

1.4.14 écoulement plan

Profil d'écoulement dans un silo à section rectangulaire ou carrée et orifice de sortie allongé dont la grande dimension est parallèle à deux des parois du silo et de même longueur que celles-ci.

1.4.15 silo

Ouvrage utilisé pour entreposer des matières granulaires en vrac. (Il s'agit de cellules de silo isolées ou en batterie ou encore de magasin de stockage.)

1.4.15.1 *silo élancé*

Silo dont le rapport $h/d_c \geq 1,5$.

1.4.15.2 *silo plat*

Silo dont le rapport $h/d_c < 1,5$.

1.4.15.3 *silo circulaire à paroi mince*

Silo de section circulaire, sans raidisseurs circulaires, dont le rapport $d_c/t > 200$.

1.4.16 réservoir

Ouvrage utilisé pour contenir des liquides.

1.4.17 transition

Intersection entre la trémie et la zone à parois verticales.

1.4.18 zone à parois verticales

Partie d'un silo ou d'un réservoir dont les parois sont verticales.

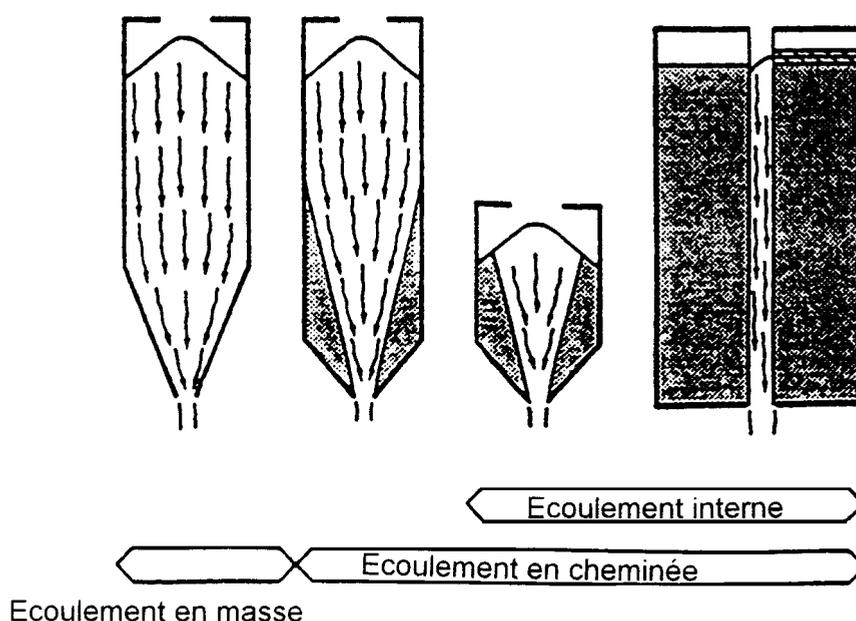


Figure 1.1 : Mode d'écoulement

1.5 Notation

1) Pour les besoins de la présente norme, les symboles suivants s'appliquent.

NOTE : La notation utilisée est fondée sur l'ISO 3898:1987.

2) L'ENV 1991-1, Bases de calcul, donne une liste de notations de base ; les notations supplémentaires indiquées ci-dessous sont propres à cette partie.

Majuscules latines

A	aire intérieure de la section droite de la cellule
C	coefficient d'amplification de la pression sur la paroi verticale
C_o	coefficient maximal d'amplification de la pression sur la paroi verticale
C_b	coefficient d'amplification de la pression sur le fond.
C_h	coefficient d'amplification de la pression horizontale
C_w	coefficient d'amplification de la contrainte de frottement sur la paroi verticale
C_z	coefficient de Janssen
F_p	force horizontale totale due à la pression localisée, sur un silo circulaire à paroi mince
K_s	valeur de calcul du rapport de pression horizontale/verticale
$K_{s,m}$	valeur moyenne du rapport de pression horizontale/verticale
P_w	charge verticale résultante par unité de longueur du périmètre dans la zone à parois verticales
U	périmètre intérieur de la section de la zone à parois verticales.

Minuscules latines

d_c	dimension caractéristique d'une section (figure 1.2)
e	la plus grande des deux valeurs e_i et e_o
e_i	excentricité due au remplissage (figure 1.2)
e_o	excentricité à partir du centre de l'orifice de sortie (figure 1.2)
h	distance entre l'orifice de vidange et la surface équivalente (figure 1.2)
h_1, h_2	paramètres utilisés pour la détermination de pressions verticales, dans les silos plats
l_h	longueur de paroi de la trémie (figure 5.3)
P	pression hydrostatique
P_h	pression horizontale due à la matière ensilée
P_{he}	pression horizontale lors de la vidange (figure 1.2)
$P_{he,s}$	pression horizontale lors de la vidange, calculée par la méthode simplifiée
P_{hf}	pression horizontale en fin de remplissage
$P_{hf,s}$	pression horizontale en fin de remplissage, calculée par la méthode simplifiée
P_{ho}	pression horizontale en fin de remplissage, à la base de la zone à parois verticales
$P_{n,ni}$	pression normale à la paroi de la trémie incliné, avec $i = 1, 2$ et 3
P_p	pression localisée
$P_{p,sq}$	pression localisée dans les silos plats
P_{ps}	pression localisée dans les silos circulaires à paroi mince
P_s	surpression à la transition
P_t	contrainte de frottement sur la trémie (figure 1.2)
P_v	pression verticale due à la matière ensilée (figure 1.2)
P_{ve}	pression verticale lors de la vidange
P_{vi}	termes intervenant dans le calcul de la pression verticale dans les silos plats avec $i = 1, 2, 3$
P_{vf}	pression verticale en fin de remplissage
$P_{vf,sq}$	pression verticale en fin de remplissage dans les silos plats
P_{vo}	pression verticale en fin de remplissage à la base de zones à parois verticales
P_w	contrainte de frottement sur la paroi verticale (figure 1.2)
P_{we}	contrainte de frottement sur la paroi verticale lors de la vidange
$P_{we,s}$	contrainte de frottement sur la paroi verticale lors de la vidange, calculée par la méthode simplifiée
P_{wvf}	contrainte de frottement de paroi en fin de remplissage
$P_{wvf,s}$	contrainte de frottement de paroi en fin de remplissage, calculée par la méthode simplifiée
s	dimensions de la zone affectée par la charge localisée ($s = 0,2 d_c$)
t	épaisseur de paroi (figure 1.2)
w	largeur d'un silo rectangulaire
x	paramètre utilisé pour le calcul des actions sur la trémie
z	profondeur en dessous de la surface équivalente, au niveau de remplissage maximum
z_o	paramètre utilisé pour le calcul des actions.

Minuscules grecques

- α angle moyen d'inclinaison de la paroi de la trémie mesuré à partir de l'horizontale (figure 1.2)
- β coefficient d'amplification de la pression localisée
- γ poids volumique de liquide ou de la matière ensilée
- γ_1 poids volumique de la matière ensilée fluidifiée
- θ coordonnée angulaire
- μ valeur de calcul du coefficient de frottement sur la paroi
- μ_m valeur moyenne du coefficient de frottement sur la paroi
- φ angle effectif de frottement interne
- φ_w angle de frottement sur la paroi de la trémie, pour la détermination du mode d'écoulement.

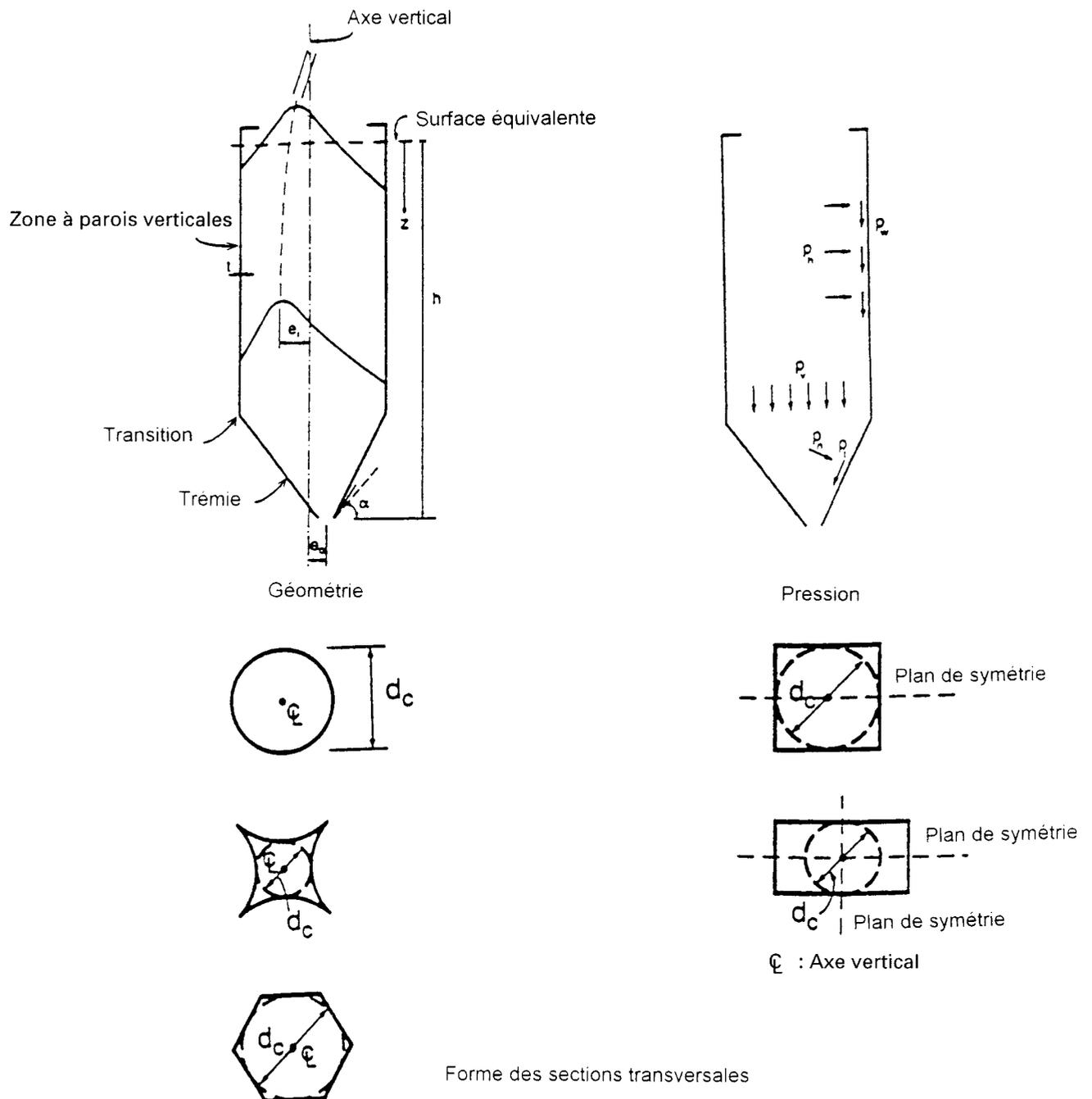


Figure 1.2 : Formes de silos et notation des dimensions et des actions

Section 2 Classification des actions

- 1) P Les actions dues à la matière ensilée sont classées actions variables (voir EN 1991-1).
- 2) P Les actions sur les réservoirs sont classées actions variables (voir ENV 1991-1).
- 3) P Les actions localisées au cours des opérations de remplissage et de vidange des silos sont classées actions libres.
- 4) P Les actions dues à des explosions de poussières doivent être classées actions accidentelles.

Section 3 Situation de projet

1) P Le format général des méthodes de calcul de l'ENV 1991-1, est applicable.

NOTE : Ceci ne signifie pas que les valeurs et articles spécifiés pour les bâtiments dans l'ENV 1991-1 s'appliquent aux silos et aux réservoirs.

2) P Il faut sélectionner les situations de projet et identifier les cas de charge critiques. Il faut déterminer, pour chaque cas de charge critique, les valeurs de calcul des effets des actions à combiner.

3) P Les règles de combinaison dépendent de la vérification considérée ; elles doivent être identifiées conformément à l'ENV 1991-1, Bases de calcul, et à l'annexe A du présent document.

4) La disposition des actions sur les silos et les réservoirs pour des cas de charge dans une situation de projet particulière, est indiquée ci-dessous.

5) P Les ouvrages préfabriqués doivent être conçus pour les actions découlant de la manutention du transport et de l'exécution.

6) Il faut considérer les actions liées au remplissage maximal possible.

7) Les modèles de calcul des actions au remplissage et à la vidange peuvent être utilisés dans les états limites ultime et de service.

8) Les actions et situations accidentelles suivantes doivent être considérées, le cas échéant :

- actions dues à des explosions ;
- actions dues au choc d'un véhicule ;
- actions sismiques ;
- situations d'incendie.

9) Les réservoirs et silos peuvent être utilisés pour contenir des liquides ou des matières granulaires pouvant provoquer des explosions. Dans le tableau 7.1 figurent certaines des matières susceptibles de provoquer des explosions de poussières.

10) Il convient de limiter ou d'éviter les dommages éventuels dus à des explosions de poussières en choisissant une ou plusieurs des dispositions suivantes :

- réalisation d'événements suffisants ;
- réalisation d'une structure capable de résister à la pression de l'explosion.

11) La pression d'explosion dans un silo, sans événement adéquat, peut atteindre 1 N/mm^2 .

12) Il convient de prévenir les explosions de poussières lors du projet, en sélectionnant au moins l'un des éléments suivants :

- édicter des règles de maintenance et de nettoyage adaptées ;
- éviter l'allumage en sélectionnant un équipement électronique sûr ;
- faire un usage prudent du matériel de soudage.

13) Dans le cas de matières sensibles à l'eau, afin d'empêcher toute pénétration d'eau, la fissuration à l'état limite de service doit être limitée.

14) Les effets de fatigue doivent être pris en compte, dans les silos ou les réservoirs subissant, en moyenne, plusieurs cycles par jour. Un cycle de charge équivaut à une opération de remplissage et de vidange. Les effets de fatigue doivent également être pris en compte, dans les silos soumis aux vibrations d'une machine.

15)P Il faut tenir compte des actions dues aux structures adjacentes.

Section 4 Représentation des actions

- 1) P Le parti structural du silo doit être tel que le silo soit peu sensible aux faibles variations des actions.
- 2) P Les actions dues aux matières granulaires doivent être calculées pour le remplissage et la vidange. L'amplitude et la répartition des charges de calcul dépendent de la structure du silo, des caractéristiques des matières ensilées et des modes d'écoulement survenant lors des opérations de vidange.
- 3) La variabilité inhérente à la nature des matières ensilées et les simplifications des modèles de chargement induisent des différences entre les actions réelles et les charges indiquées par les règles de calcul de la section 5. Par exemple, la répartition des pressions à la vidange varie au niveau des parois et en fonction du temps, aucune prévision précise de la pression moyenne ou de sa variance ne pouvant être effectuée à l'heure actuelle.
- 4) Les règles simplifiées de prévision des modes d'écoulement (figure 5.1) peuvent être utilisées pour le calcul des actions dans les silos.
- 5) Il est recommandé de ne pas utiliser les règles simplifiées de prévision des modes d'écoulement (figure 5.1) pour la conception des silos en ce qui concerne les caractéristiques de l'écoulement.

Section 5 Actions sur les silos dues aux matières granulaires

5.1 Généralités

- 1) Les actions dues aux matières granulaires dépendent des éléments suivants :
 - dispersion des propriétés des matières granulaires ;
 - variation des caractéristiques du frottement sur les parois ;
 - géométrie du silo ;
 - procédé de remplissage et de vidange.
- 2) Il convient de choisir le modèle d'écoulement (écoulement en masse ou en cheminée) conformément à la figure 5.1.
- 3) Pour déterminer le mode d'écoulement, l'angle de frottement sur la paroi peut être obtenu soit par l'essai (décrit en 5.5.2), soit en utilisant les valeurs approchées du coefficient de frottement sur la paroi (indiquées au tableau 7.1) données par la formule :

$$\varphi_w = \arctan \mu_m \quad \dots (5.1)$$

- 4) Les valeurs caractéristiques des actions au remplissage et à la vidange sont données pour les types de silos suivants :
 - silos élancés ;
 - silos plats ;
 - silos d'homogénéisation et silos à grande vitesse de remplissage.
- 5) Tout appui apporté à la paroi des silos par la rigidité de la matière granulaire, peut être négligé dans les calculs. Cela signifie que l'interaction entre l'action de la matière ensilée et la déformation de la paroi peut être négligée.

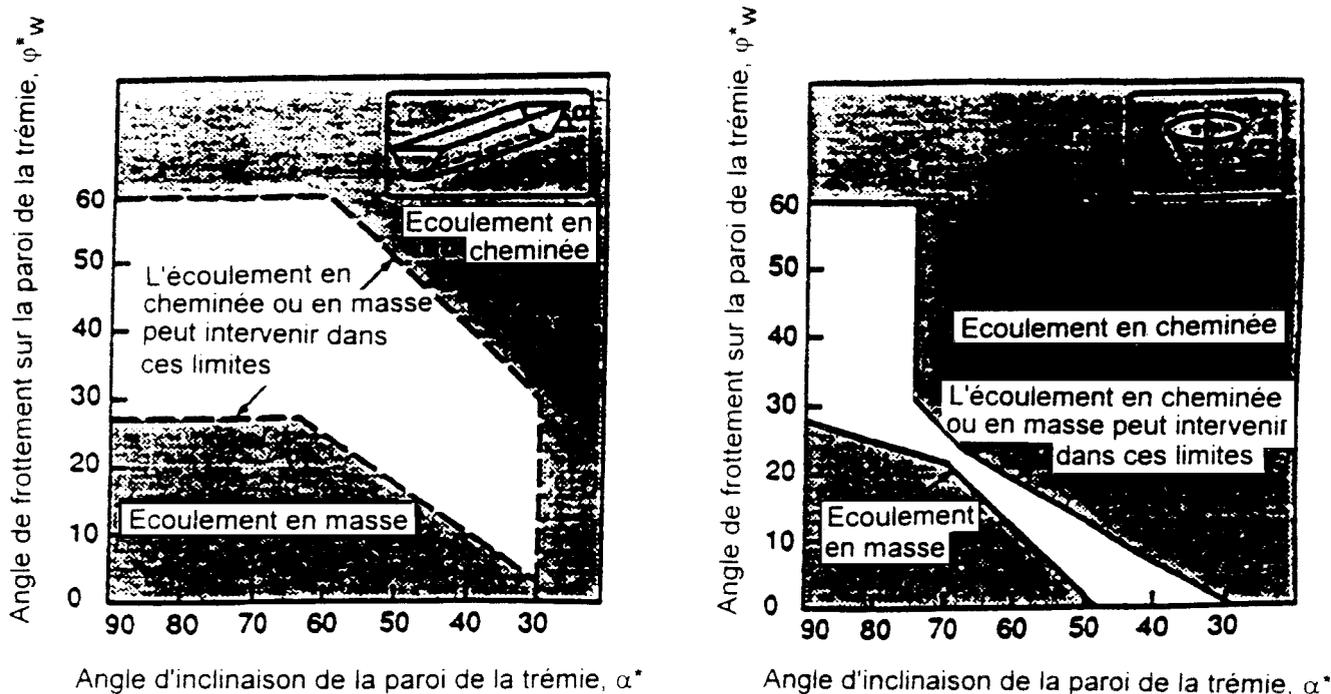


Figure 5.1 : Limite entre l'écoulement en masse et l'écoulement en cheminée pour trémies coniques et trémies allongées en forme de coin

5.2 Silos élancés

1) Les règles détaillées de calcul des actions au remplissage sont données au paragraphe 5.2.1 et celles pour les actions à la vidange au paragraphe 5.2.2. Les règles simplifiées au remplissage et à la vidange sont données au paragraphe 5.2.2.3.

2) P Les équations générales de calcul des actions sur les parois des silos sont données au paragraphe 5.2.1. Elles doivent être utilisées comme base de calcul pour les actions suivantes :

- actions au remplissage sur les zones à parois verticales (5.2.1) ;
- actions au remplissage sur les fonds plats (5.2.1) ;
- actions au remplissage sur les trémies (5.2.1) ;
- actions à la vidange sur les zones à parois verticales (5.2.2) ;
- actions à la vidange sur les fonds plats et les trémies (5.2.2).

5.2.1 Actions au remplissage

1) P À la fin du remplissage, les valeurs de la contrainte de frottement sur la paroi, P_{wf} , de pression horizontale, P_{hf} et de pression verticale, P_v , à toute profondeur, doivent être prises égales à :

$$P_{wf}(z) = \gamma \frac{A}{U} C_z(z) \quad \dots (5.2)$$

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} C_z(z) \quad \dots (5.3)$$

$$P_v(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z) \quad \dots (5.4)$$

où :

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \quad \dots (5.5)$$

$$z_0 = \frac{A}{K_s \mu U} \quad \dots (5.6)$$

où :

- γ est le poids volumique ;
- μ est le coefficient de frottement sur la paroi ;
- K_s est le rapport de pression horizontale/pression verticale ;
- z est la profondeur considérée ;
- U est le périmètre intérieur.

2) P La force verticale résultante dans la paroi $P_w(z)$, par unité de longueur de périmètre, agissant à toute profondeur z , est :

$$P_w(z) = \int_0^z P_{wf}(z) dz = \gamma \frac{A}{U} \left[z - z_0 C_z(z) \right] \quad \dots (5.7)$$

3) Les méthodes de détermination du poids volumique, des caractéristiques des matières granulaires, du coefficient de frottement sur la paroi et du rapport des pressions sont indiquées en section 7.

5.2.1.1 Zone à parois verticales

1) L'action au remplissage se compose d'une partie fixe et d'une partie libre, appelée action localisée.

2) P La partie fixe doit être calculée à partir des équations (5.2) et (5.3).

3) La pression localisée P_p doit être considérée comme agissant sur une partie quelconque de la paroi du silo ; elle est prise égale à :

$$P_p = 0,2 \beta P_{hf} \quad \dots (5.8)$$

avec :

$$\beta = 1 + 4 e_i/d_c \quad \dots (5.9)$$

où :

e_i et d_c sont définis figure 1.2.

4) Pour les silos en béton, les silos avec raidisseur et ceux présentant une section non circulaire, la pression localisée doit être considérée comme agissant sur deux surfaces carrées opposées, de côté s (figure 5.2), égal à :

$$s = 0,2 d_c \quad \dots (5.10)$$

5) Une manière simplifiée d'appliquer cette action localisée peut être utilisée pour de nombreux silos. La disposition de l'action la plus défavorable peut être obtenue en appliquant cette pression à mi-hauteur du silo et en utilisant le pourcentage d'augmentation de contrainte des parois à ce niveau, pour augmenter les contraintes sur toute la surface de la paroi.

6) Pour les silos circulaires à paroi mince, la pression localisée doit être considérée comme agissant sur une bande horizontale de hauteur s , allant d'une pression maximale sur un côté, P_p , à une de pression, P_p , du côté opposé (figure 5.2) suivant la loi :

$$P_{ps} = P_p \cos \theta \quad \dots (5.11)$$

où :

θ est indiqué figure 5.2.

7) La force horizontale F_p due à l'action localisée, sur des silos métalliques non raidis est donnée par :

$$F_p = \frac{\pi}{2} s d_c P_p \quad \dots (5.12)$$

8) Une manière simplifiée d'appliquer cette action localisée à des silos circulaires à parois minces peut être utilisée. L'action peut être considérée comme agissant à une profondeur z_0 en dessous de la surface équivalente, ou à mi-hauteur de la zone à parois verticales, la valeur donnant la position de l'action la plus élevée étant retenue.

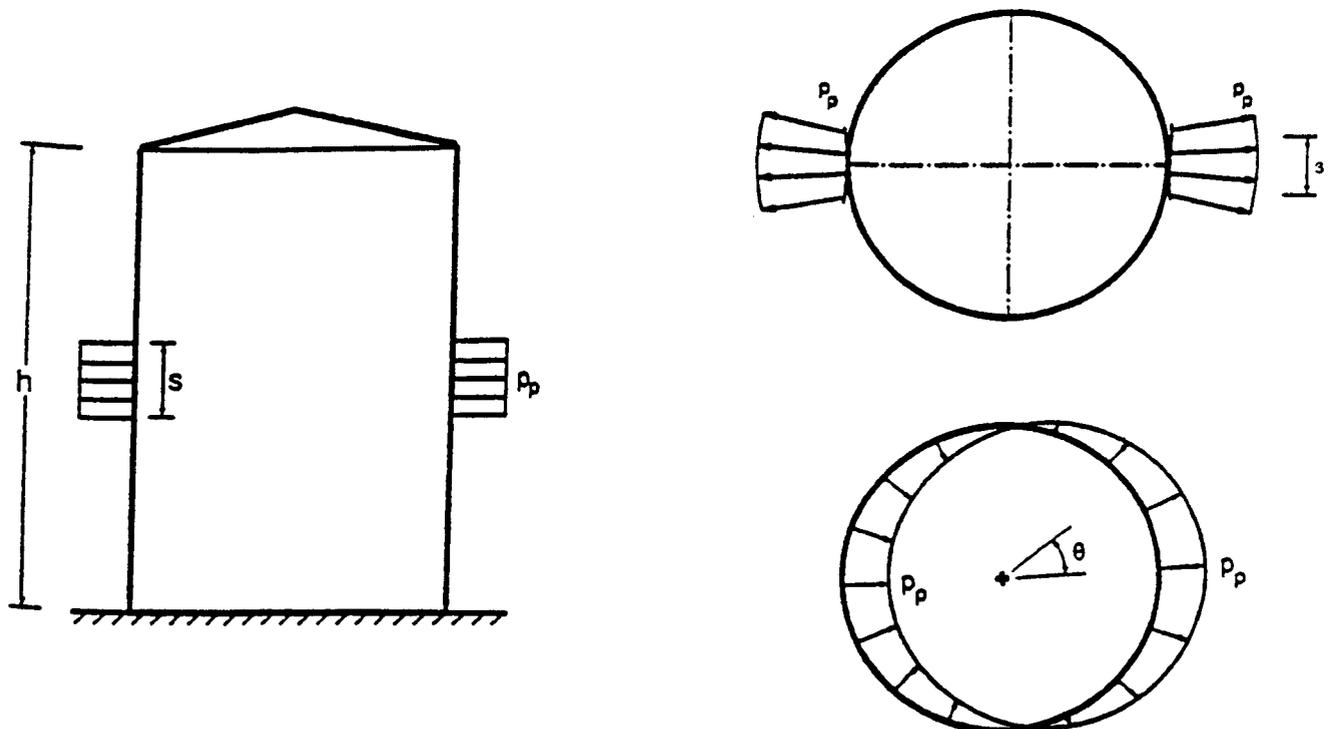


Figure 5.2 : Élévation et schéma en plan de l'action localisée

5.2.1.2 Fonds plats

1) Les charges verticales agissant sur des fonds de silo horizontaux ou peu inclinés (d'inclinaison $\alpha \leq 20^\circ$) doivent être calculées comme suit :

$$P_{vf} = C_b P_v \quad \dots (5.13)$$

où :

P_{vf} est calculé à l'aide de l'expression (5.4) ;

C_b est un coefficient d'amplification de la pression sur le fond tenant compte d'une répartition non uniforme de l'action calculé à l'aide de l'expression (5.14).

$$C_b = 1,2 \quad \dots (5.14)$$

5.2.1.3 Trémies

1) P Avec $\alpha > 20^\circ$ (voir figure 5.3), la pression sur la paroi de la trémie inclinée, P_n , est calculée comme suit :

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{x}{l_n} \quad \dots (5.15)$$

$$P_{n1} = P_{vo} (C_b \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \quad \dots (5.16)$$

$$P_{n2} = C_b P_{vo} \cos^2 \alpha \quad \dots (5.17)$$

$$P_{n3} = 3,0 \frac{A}{U} \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \sin^2 \alpha \quad \dots (5.18)$$

où :

x est une longueur comprise entre 0 et l_n (voir figure 5.3) ;

P_{n1} et P_{n2} sont les pressions correspondant à la pression verticale dans la matière ensilée directement au-dessus de la transition ;

P_{n3} est la pression correspondant au remplissage de la trémie ;

C_b est le coefficient d'amplification issu de l'expression (5.14) ;

P_{vo} est la pression verticale agissant à la transition, calculée à l'aide de l'expression (5.4).

2) P La valeur de la contrainte de frottement sur la paroi, P_t , est indiquée par :

$$P_t = P_n \mu \quad \dots (5.19)$$

où :

P_n est calculée à partir de l'expression (5.15).

3) Pour les calculs de silo, la composante verticale de la force de traction au sommet de la trémie peut être exigée (par exemple, pour les calculs de supports de silo ou de ceinture raidisseuse au niveau de la transition). La composante verticale doit être déterminée à partir de l'équilibre des forces prenant en compte notamment la pression verticale, , calculée au niveau de la transition, et le poids du contenu de la trémie (figure 5.3).

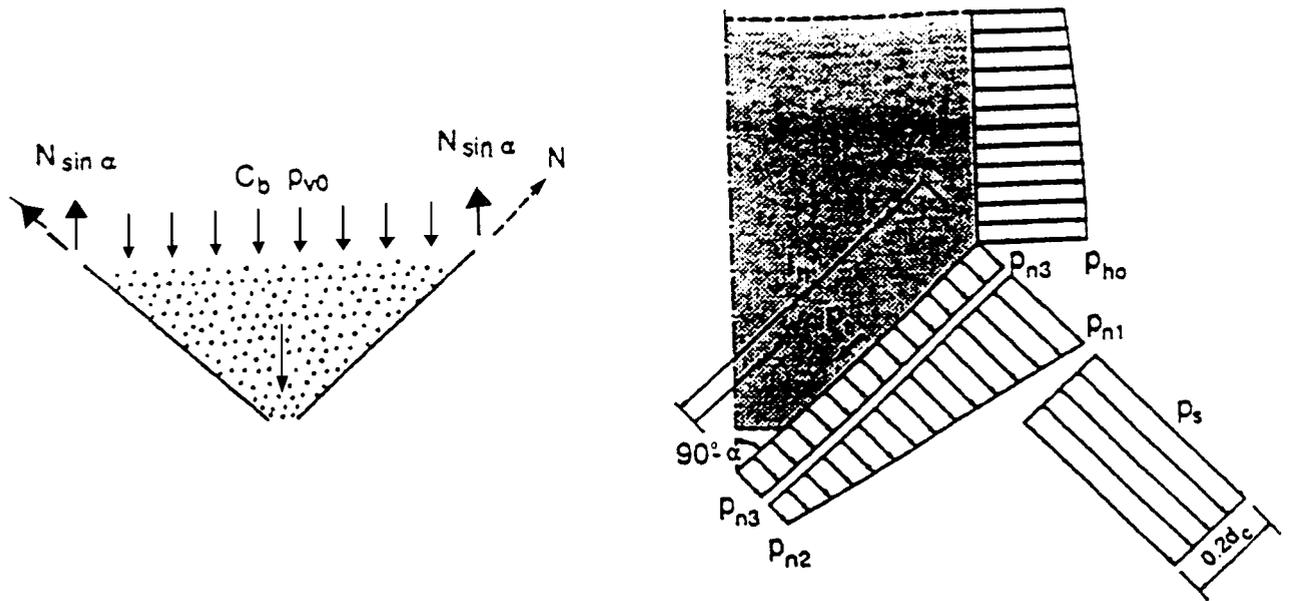


Figure 5.3 : Actions sur la trémie et force de traction au sommet de la trémie

5.2.2 Actions à la vidange

5.2.2.1 Zone à parois verticales

- 1) P Les actions à la vidange sont composées d'une partie fixe et d'une partie libre, appelée action localisée.
- 2) Les pressions fixes, P_{we} et P_{he} , sont obtenues comme suit :

$$P_{we} = C_w P_{wf} \quad \dots (5.20)$$

$$P_{he} = C_h P_{hf} \quad \dots (5.21)$$

où :

C_w et C_h sont des coefficients d'amplification selon les expressions (5.22) et (5.23).

Pour les silos déchargés par le haut (sans écoulement) :

$$C_w = C_h = 1,0 \quad \dots (5.22)$$

Dans les autres silos élancés, les coefficients d'amplification de la contrainte de frottement et de la pression horizontale sur la paroi sont :

$$C_w = 1,1 \text{ et } C_h = C_o \text{ (voir 7.1)} \quad \dots (5.23)$$

- 3) La grandeur de la pression de vidange localisée, P_p , est la suivante :

$$P_p = 0,2 \beta P_{he} \quad \dots (5.24)$$

où :

P_{he} est calculée à partir de l'expression (5.21) ;

β dépend de l'excentricité la plus importante, entre celles au remplissage et à la vidange ;

$$\beta = 1 + 4e/d_c \quad \dots (5.25)$$

- 4) Le calcul des actions localisées à la vidange, peut être effectué en utilisant les indications données pour les actions localisées au remplissage [5.2.1.1, 4) à 8)].

5.2.2.2 *Fond plat et trémie*

- 1) Pour les silos à écoulement en cheminée, les actions à la vidange sur les fonds et les trémies peuvent être calculées en se servant des indications relatives aux actions au remplissage (5.2.1.2 et 5.2.1.3).
- 2) Pour les silos à écoulement en masse, une pression normale supplémentaire fixe due à la transition (voir figure 5.3) est appliquée, sur une distance suivant la pente de $0,2 d_c$, le long de la paroi de la trémie et autour du périmètre.

$$P_s = 2 P_{ho} \quad \dots (5.26)$$

où :

P_{ho} est la pression de remplissage horizontal à la transition.

5.2.2.3 *Méthode simplifiée pour le remplissage et la vidange*

- 1) En ce qui concerne les silos où d_c est inférieur à 5 m, il est possible d'appliquer une méthode simplifiée pour les calculs au remplissage et à la vidange. Avec cette méthode, les actions localisées selon les paragraphes 5.2.1 et 5.2.2 peuvent être prises en compte en majorant les pressions horizontales.
- 2) Pour les silos en béton, les silos avec des raidisseurs et les silos à section non circulaires, les pressions horizontales majorées au remplissage et à la vidange sont les suivantes :

$$P_{hf,s} = P_{hf} (1 + 0,2 \beta) \quad \dots (5.27)$$

$$P_{he,s} = P_{he} (1 + 0,2 \beta) \quad \dots (5.28)$$

où :

P_{hf} est calculé à partir de l'expression (5.3) ;

P_{he} est calculé à partir de l'expression (5.21) ;

β est calculé à partir des expressions (5.9) ou (5.25).

- 3) Pour les silos circulaires à parois minces, les pressions horizontales majorées pour le remplissage, $P_{hf,s}$, et pour la vidange, $P_{he,s}$, et les contraintes de frottement verticales majorées pour le remplissage, $P_{wf,s}$, et pour la vidange, $P_{we,s}$, sont les suivantes :

$$P_{hf,s} = P_{hf} (1 + 0,1 \beta) \quad \dots (5.29)$$

$$P_{he,s} = P_{he} (1 + 0,1 \beta) \quad \dots (5.30)$$

$$P_{wf,s} = P_{wf} (1 + 0,2 \beta) \quad \dots (5.31)$$

$$P_{we,s} = P_{we} (1 + 0,2 \beta) \quad \dots (5.32)$$

où :

$P_{hf,s}$ est calculé à partir de l'expression (5.3) ;

P_{he} est calculé à partir de l'expression (5.21) ;

$P_{wf,s}$ est calculé à partir de l'expression (5.2) ;

P_{we} est calculé à partir de l'expression (5.20) ;

β est calculé à partir des expressions (5.9) ou (5.25).

5.3 Silos plats

- 1) Il convient de calculer les actions sur les parois dans les silos plats de la même façon que dans les silos élancés (voir 5.2), avec des modifications pour les coefficients d'amplification, la pression localisée, les pressions horizontales et les actions sur le fond.

- 2) Les modifications concernant les coefficients d'amplification des actions C_h et C_w ainsi que la pression localisée sont les suivantes :

— Pour les silos où :

$$\begin{aligned} h/d_c &\leq 1,0 \\ C_w = C_h &= 1,0 \text{ et } P_{p,sd} = 0 \end{aligned} \quad \dots (5.33)$$

— Pour les silos où :

$$1,0 < h/d_c < 1,5$$

$$C_w = 1,0 + 0,2 (h/d_c - 1,0) \quad \dots (5.34)$$

et

$$C_h = 1,0 + 2 (C_o - 1,0) (h/d_c - 1,0) \quad \dots (5.35)$$

et

$$P_{p,sq} = 2P_p (h/d_c - 1,0) \quad \dots (5.36)$$

sachant que :

P_p est déterminé à partir de (5.2.1.1) et (5.2.2.1).

3) Les modifications indiquées pour la pression latérale apparaissent figure 5.4. La pression latérale, P_h , au point de rencontre entre la surface supérieure de la matière ensilée et la paroi du silo, peut être limitée à zéro. En dessous de ce point, on peut supposer qu'il existe une variation de pression linéaire (figure 4.4), calculée avec $K_s = 1,0$, jusqu'au moment où cette pression linéaire rencontre la pression déterminée à partir des équations 5.3 ou 5.21, selon le cas.

4) Les pressions variables, $P_{vf,sq}$, lors des opérations de remplissage et de vidange agissant sur le fond plat, sont les suivantes :

$$P_{vf,sq} = C_b (P_{v1} + (P_{v2} - P_{v3}) (1,5 d_c - h) / (1,5 d_c - h_1)) \quad \dots (5.37)$$

où :

P_{v1} est obtenu à partir de l'expression (5.4), avec $z = h$;

P_{v2} est obtenu à partir de $P_{v2} = \gamma h_2$;

P_{v3} est obtenu à partir de l'expression (5.4), avec $z = h_1$ (voir figure 5.4) correspondant au point le plus bas de la paroi, non en contact avec la matière ensilée (figure 5.4) ;

C_b est calculé à partir de l'expression (5.14).

5) Les actions sur la trémie en cours de remplissage doivent être calculées à l'aide de l'équation (5.15).

6) Les actions sur la trémie en cours de vidange doivent être calculées à l'aide des indications du paragraphe 5.2.2.2, pour les fonds plats et les trémies.

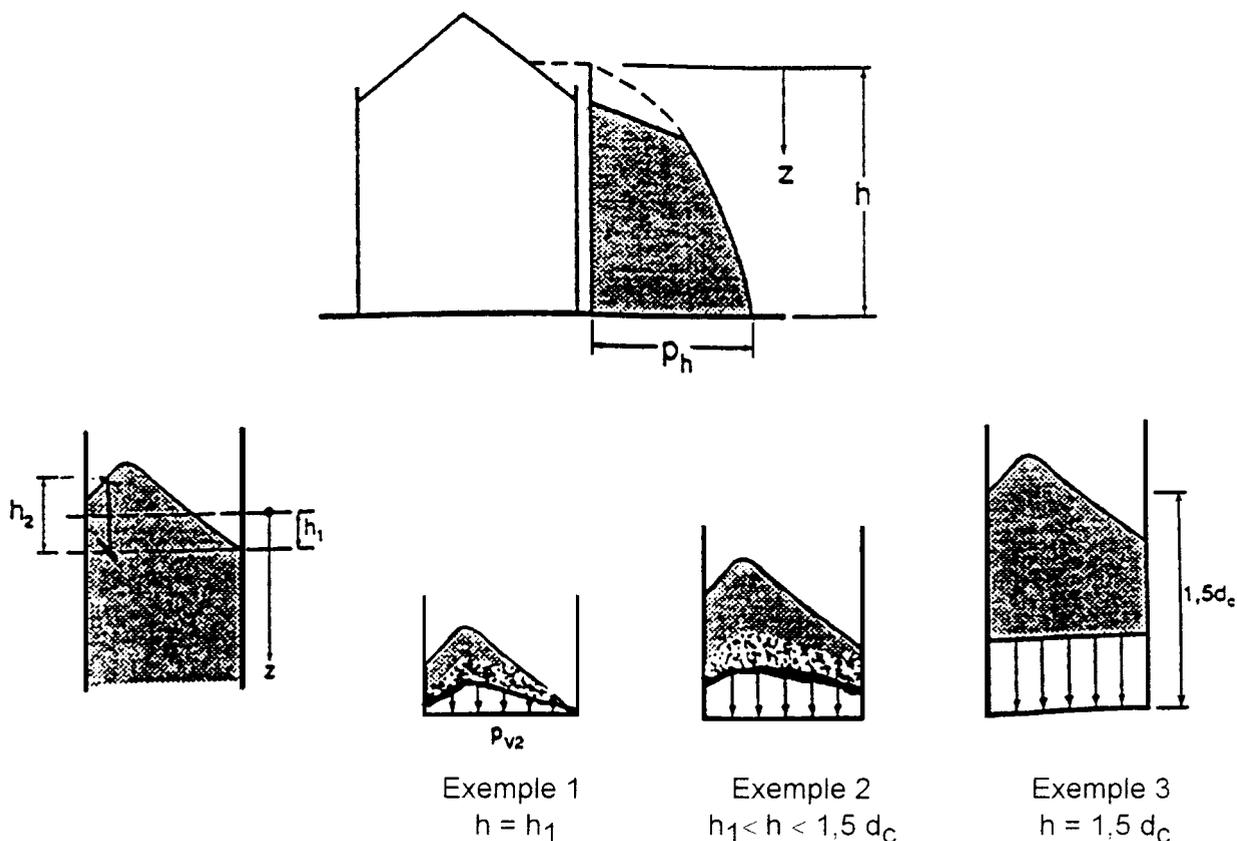


Figure 5.4 : Actions sur les parois et sur les fonds horizontaux dans les silos plats

5.4 Silos d'homogénéisation et silos à grande vitesse de remplissage

1) P Les silos d'homogénéisation et ceux à grande vitesse de remplissage doivent être conçus pour les situations suivantes :

- matière ensilée fluidifiée ;
- matière ensilée non fluidifiée.

2) P Dans les silos où sont ensilées des poudres et où la vitesse d'élévation de la surface de la matière ensilée dépasse 10 m/h, on suppose que cette matière est fluidifiée.

3) P La pression sur les parois du silo p , due à des matières fluidifiées, doit être calculée comme suit :

$$p = \gamma_1 z \quad \dots (5.38)$$

où :

γ_1 est le poids volumique fluidifié.

4) Le poids volumique des poudres fluidifiées, γ_1 , peut être considéré comme égal à :

$$\gamma_1 = 0,8 \gamma \quad \dots (5.39)$$

où :

γ est le poids volumique déterminé à la section 7.

5) P Lorsque la matière ensilée n'est pas fluidifiée, les actions de calcul doivent être déterminées, pour les silos élancés comme indiqué au paragraphe 5.2 et, pour les silos plats comme indiqué au paragraphe 5.3.

Section 6 Actions exercées par des liquides sur les réservoirs

6.1 Généralités

- 1) Il convient de calculer les actions dues aux liquides en tenant compte de :
 - un ensemble déterminé de liquides à entreposer dans le réservoir ;
 - la géométrie du réservoir ;
 - la profondeur maximale possible de liquide dans le réservoir.
- 2) La valeur caractéristique de la pression p est la suivante :

$$p(z) = \gamma z \quad \dots (6.1)$$

où :

- z est la profondeur ;
 γ est la masse volumique du liquide.

6.2 Caractéristiques des liquides

- 1) Les poids volumiques sont indiquées dans l'ENV 1992-2-1, poids volumiques, poids propres et charges d'exploitation des bâtiments.

Section 7 Caractéristiques des matières ensilées

7.1 Caractéristiques des matières granulaires

1) Les caractéristiques des matières granulaires doivent être déterminées par l'approche simplifiée présentée en 7.2 ou par les essais décrits en 7.3. Le coefficient maximal d'amplification C_o , est indiqué au tableau 7.1 ou peut être déterminé à partir de 7.4.

7.2 Approche simplifiée

1) Les caractéristiques des matières sont définies au tableau 7.1 ; les valeurs de γ correspondent à des limites supérieures, celles de μ_m et $K_{s,m}$ à des valeurs moyennes.

2) En raison de la variabilité des caractéristiques inhérentes aux matières granulaires et afin d'obtenir des valeurs qui représentent les caractéristiques extrêmes des matières, il convient de modifier les valeurs de μ_m et $K_{s,m}$ par les facteurs de conversion 0,9 et 1,15. Les combinaisons suivantes sont utilisées lors du calcul des actions maximales :

$$P_h \text{ max. pour } K_s = 1,15 K_{s,m} \text{ et } \mu = 0,9 \mu_m \quad \dots (7.1)$$

$$P_v \text{ max. pour } K_s = 0,9 K_{s,m} \text{ et } \mu = 0,9 \mu_m \quad \dots (7.2)$$

$$P_w \text{ max. pour } K_s = 1,15 K_{s,m} \text{ et } \mu = 1,15 \mu_m \quad \dots (7.3)$$

NOTE : Pour les structures en coque, les valeurs minimales des actions stabilisatrices peuvent être les plus défavorables.

Tableau 7.1 : Caractéristiques des matières granulaires

Matière granulaire	Poids volumique ³⁾ γ [kN/m ³]	Rapport des pressions ($K_{s,m}$)	Coefficient de frottement sur la paroi μ_m		Coefficient maximal d'amplification C_o
			Acier ⁴⁾	Béton	
orge ¹⁾	8,5	0,55	0,35	0,45	1,35
ciment	16,0	0,50	0,40	0,50	1,40
clinker	18,0	0,45	0,45	0,55	1,40
sable sec ²⁾	16,0	0,45	0,40	0,50	1,40
farine ¹⁾	7,0	0,40	0,30	0,40	1,45
endre volante ¹⁾	14,0	0,45	0,45	0,55	1,45
maïs ¹⁾	8,5	0,50	0,30	0,40	1,40
sucre ¹⁾	9,5	0,50	0,45	0,55	1,40
blé	9,0	0,55	0,30	0,40	1,30
charbon ^{1) 2)}	10,0	0,50	0,45	0,55	1,45

1) Des explosions de poussière peuvent survenir avec cette matière.

2) Il faut être prudent du fait de la variabilité des propriétés de cette matière.

3) Les poids volumiques sont indiqués pour calculer les charges ; il est recommandé de ne pas les utiliser dans les calculs de volumes. Les poids volumiques figurant dans la section 2 de l'ENV 1991-2-1 peuvent être utilisés pour les calculs de volume.

4) Non applicable à des parois ondulées.

7.3 Essais sur les matières granulaires

- 1) P Les essais doivent porter sur des échantillons représentatifs de matière granulaire. La valeur moyenne de chaque caractéristique doit être déterminée en tenant compte des variations des paramètres secondaires tels que la composition, la granulométrie, la teneur en eau, la température, l'âge, la charge électrique due aux manipulations et au mode de production.
- 2) P Les valeurs moyennes d'essai doivent être ajustées au moyen de facteurs de conversion, afin d'obtenir des valeurs extrêmes. Les facteurs de conversion doivent être sélectionnés de façon à prendre en compte la variabilité des caractéristiques des matières pendant la durée de vie du silo et les imprécisions d'échantillonnage.
- 3) P Les facteurs de conversion pour une caractéristique donnée des matières doivent être ajustés dans le cas où les effets de l'un des paramètres secondaires interviennent pour plus de 75 % de la marge introduite pour cette caractéristique par les facteurs de conversion.

7.3.1 Poids volumique, γ

- 1) Il convient de déterminer le poids volumique au niveau de contrainte correspondant à la pression verticale maximale à l'intérieur du silo. La pression verticale P_{vf} , à l'intérieur du silo, peut être évaluée par l'expression (5.4).
- 2) Une méthode de mesure du poids volumique est décrite à l'annexe B.
- 3) Le facteur de conversion ne doit pas être inférieur à 1,15.

7.3.2 Coefficient de frottement sur la paroi, μ_m

- 1) Il convient de mesurer deux valeurs de μ_m , l'une devant être utilisée pour déterminer les modes d'écoulement et l'autre pour calculer les actions sur les parois verticales.
- 2) Il convient d'effectuer les essais permettant de déterminer μ_m , concernant l'évaluation des modes d'écoulement, à un niveau de contrainte correspondant à celui qui est considéré pendant l'écoulement, dans la partie inférieure de la trémie.
- 3) Il convient d'effectuer les essais permettant de déterminer μ_m , concernant le calcul des actions, à un niveau de contrainte correspondant à la pression horizontale maximale, P_{hf} , dans la partie verticale du silo. P_{hf} peut être évalué par l'expression (5.3).
- 4) Les méthodes d'essai de mesure des deux valeurs de μ_m sont décrites à l'annexe B.
- 5) Les facteurs de conversion ne doivent pas être inférieurs à 1,15 pour la valeur supérieure, ni supérieure à 0,9 pour la valeur inférieure.

7.3.3 Rapport de pression horizontale/verticale, $K_{s,m}$

- 1) Le rapport de pression horizontale/verticale, $K_{s,m}$, doit être déterminé à un niveau de contrainte verticale correspondant à la pression verticale maximale à l'intérieur du silo. L'échantillon doit être maintenu latéralement. La pression verticale peut être évaluée à l'aide de l'équation (5.4).
- 2) Une méthode d'essai est présentée à l'annexe B.
- 3) Une autre méthode d'essai, basée sur la mesure de l'angle de frottement interne est également présentée.
- 4) Les facteurs de conversion ne doivent pas être inférieurs à 1,15 pour la valeur supérieure, ni supérieurs à 0,9 pour la valeur inférieure.

7.4 Coefficient maximal d'amplification de la poussée

1) P Le coefficient d'amplification, C, rend compte d'un certain nombre de phénomènes intervenant lors de la vidange du silo. La valeur du coefficient croît avec la résistance des matières.

2) Aucune méthode appropriée d'essai en laboratoire n'a encore été mise au point, concernant le paramètre C. Les coefficients d'amplification se fondent sur l'expérience ; ils s'appliquent aux silos munis de systèmes conventionnels de remplissage et de vidange, construits en respectant les tolérances techniques normalisées.

3) En ce qui concerne les matières non indiquées dans le tableau 7.1, le coefficient maximal d'amplification peut être obtenu ainsi :

$$\begin{aligned} &\text{pour } \varphi \leq 30^\circ \text{C} = 1,35 \text{ et} \\ &\text{pour } \varphi > 30^\circ \text{C} = 1,35 + 0,02 (\varphi - 30^\circ) \end{aligned} \quad \dots (7.4)$$

où :

φ est mesuré en degrés.

4) Une méthode d'essai permettant de déterminer φ est indiqué à l'annexe B.

5) Des coefficients d'amplification adaptés à certains silos et certaines matières ensilées peuvent être évalués à partir d'essais en vraie grandeur, effectués avec ces silos.

Annexe A

(informative)

Bases de calcul — Suppléments à l'ENV 1991-1 pour les silos et les réservoirs

NOTE : La présente annexe est destinée à être intégrée, ultérieurement, à l'ENV 1991-1, Bases de calcul.

A.1 Généralités

- 1) En principe, la forme adoptée pour les méthodes de calcul dans l'ENV 1991-1 est applicable. Cependant, les silos et les réservoirs diffèrent des autres structures dans la mesure où ils peuvent être pleins de matières granulaires ou de liquide, pendant la majeure partie de leur vie.
- 2) La présente annexe donne des indications supplémentaires applicables aux silos ou aux réservoirs, en ce qui concerne les coefficients partiels sur les actions (coefficients γ) et les combinaisons d'actions pour les silos et les réservoirs, ainsi que les facteurs Ψ correspondants.
- 3) Les actions thermiques comprennent les effets climatiques et ceux des matières chaudes. Les situations suivantes doivent être considérées :
 - matière chaude à l'intérieur d'un silo ou d'un réservoir partiellement plein. Il faut tenir compte des effets de l'air chauffé, au-dessus de la matière ensilée ;
 - résistance de la matière ensilée à la contraction de la paroi du silo au cours du refroidissement.
- 4) Il convient que la détermination de l'effet des tassements différentiels de batteries de cellules de silos ou de réservoirs s'appuie sur la combinaison de cellules vides et pleines la plus défavorable.

A.2 État limite ultime

A.2.1 Coefficients partiels

- 1) Les valeurs du tableau 9.2 de l'ENV 1991-1, Bases de calcul, peuvent être utilisées pour les calculs relatifs aux silos et aux réservoirs.
- 2) Si la profondeur de liquide maximale et le poids volumique du liquide entreposé le plus lourd sont bien définis, la valeur du coefficient partiel γ peut être réduite de 1,50 à 1,35.

A.2.2 Facteurs Ψ

- 1) Les facteurs de combinaison Ψ pour les actions sur les silos et les réservoirs, ainsi que les coefficients de combinaison correspondant à d'autres actions, sont indiqués au tableau A.1.

Tableau A.1 : Facteurs Ψ pour les actions sur les silos et les réservoirs

Action	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Actions sur les silos dues à des matières granulaires	1,0	0,9	0,8
Actions sur les réservoirs dues à des liquides	1,0	0,9	0,8
Autres charges d'exploitation, déformations imposées	0,7	0,5	0,3
Charge de neige	0,6 ¹⁾	0,2 ¹⁾	0
Action du vent	0,6 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0
Température	0,6 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0
<i>1) Valeurs applicables, hormis dans quelques zones géographiques où des modifications peuvent être exigées.</i>			

Annexe B

(informative)

Méthodes d'essai relatives aux caractéristiques des matières granulaires

B.1 Objet

La présente annexe décrit les méthodes d'essai permettant de déterminer les caractéristiques des matières ensilées introduites dans l'ENV 1991-4.

B.2 Domaine d'application

1) Les résultats d'essai peuvent être utilisés dans les calculs de silos particuliers pour lesquels la matière ensilée ne figure pas au tableau 7.1, ou en tant qu'alternative aux valeurs simplifiées du tableau 7.1. Les contraintes de référence dans les essais sont soit verticales soit horizontales ; elles doivent être représentatives des contraintes exercées par les matières ensilées en fin de remplissage, à la transition du silo.

2) Les méthodes d'essai peuvent également être utilisées afin de déterminer les valeurs générales des caractéristiques des matières. Des essais de détermination des valeurs générales doivent être effectués, le cas échéant, aux niveaux de contrainte de référence suivants :

- 100 kPa pour représenter la pression verticale d'un silo (B.8, B.9 et B.10) ;
- 50 kPa pour représenter la pression horizontale d'un silo (B.7.2).

B.4 Notation

Pour les besoins de la présente annexe, la notation suivante s'applique :

c cohésion ;

F_1 force de cisaillement (figure B.1) ;

$K_{s,mo}$ rapport de la pression horizontale à la pression verticale dans le cas de parois lisses ;

σ_r contrainte de référence ;

φ_c angle de frottement interne mesuré pour un échantillon consolidé ;

τ_{fi} contrainte de cisaillement maximale mesurée dans un échantillon soumis au cisaillement, $i = 1,2$.

B.5 Définitions

Pour les besoins de la présente annexe, les définitions suivantes s'appliquent :

B.5.1 paramètre secondaire

Paramètre susceptible d'influer sur les caractéristiques des matières ensilées. Les paramètres secondaires comprennent la composition des matières, la granulométrie, la teneur en eau, la température, l'âge, la charge électrique due aux manipulations et au mode de production. Pour déterminer les valeurs générales sous les contraintes de référence comme il est mentionné au paragraphe B.2, les variations par rapport à ces niveaux de contrainte doivent être considérées comme paramètre secondaire.

B.5.2 échantillonnage

Sélection d'échantillons représentatifs de matières ensilées ou de matériaux de paroi de silo.

B.5.3 contrainte de référence

Niveaux de contrainte auxquels sont effectuées les mesures des caractéristiques des matières ensilées. La contrainte de référence est sélectionnée afin de correspondre au niveau de contrainte dans le silo en fin de remplissage.

B.6 Échantillonnage et préparation des échantillons

- 1) Les essais doivent porter sur des échantillons représentatifs de la matière granulaire. La valeur moyenne de chaque caractéristique de matière doit être déterminée en tenant compte des variations des paramètres secondaires.
- 2) La méthode suivante de préparation des échantillons doit être utilisée pour les essais décrits en B.7.2, B.8, B.9.1 et B.10 :
 - l'échantillon doit être versé dans la boîte à essai, sans qu'il y ait de vibration ou autres forces de compactage, la contrainte de référence σ_r étant appliquée. Une plaque supérieure doit être tournée en avant et en arrière, à trois reprises, d'un angle de 10 degrés, afin de consolider l'échantillon (figure B.1).
- 3) Les valeurs d'essai moyennes doivent être ajustées au moyen de facteurs de conversion, afin d'obtenir des valeurs extrêmes. Les facteurs de conversion doivent être sélectionnés de façon à prendre en compte l'influence des paramètres secondaires, la variabilité des caractéristiques des matières pendant la durée de vie du silo et les imprécisions d'échantillonnage.
- 4) Les facteurs de conversion pour une caractéristique donnée des matières doivent être ajustés dans le cas où les effets de l'un des paramètres secondaires interviennent pour plus de 75 % de la marge introduite pour cette caractéristique par les facteurs de conversion.

B.7 Frottement sur la paroi

Deux paramètres doivent être utilisés :

- l'angle de frottement sur la paroi, φ_w , pour la détermination du mode d'écoulement ;
- le coefficient de frottement sur la paroi, μ_m , pour la détermination des pressions.

B.7.1 Angle de frottement sur la paroi, φ_w , pour la détermination du mode d'écoulement

B.7.1.1 *Principe de l'essai*

Un échantillon de matière granulaire est cisailé le long d'une surface représentant la paroi de la trémie, et la force de frottement à la surface cisailée mesurée. La pression de référence est maintenue basse, pour simuler les basses pressions se produisant lors de la vidange, à proximité de l'orifice de vidange du silo.

B.7.1.2 *Appareil et méthode d'essai*

L'essai peut être effectué à l'aide de l'appareil décrit en B.7.2, conformément à la méthode d'essai donnée dans «International Standard Shear Testing Technique», rapport de la Fédération européenne de l'industrie chimique (EFCE), Groupe de travail sur la mécanique des solides, The institution of chemical engineer, 1989 (ou révisions).

B.7.2 Coefficient de frottement sur la paroi, μ , pour la détermination des pressions

B.7.2.1 Principe de l'essai

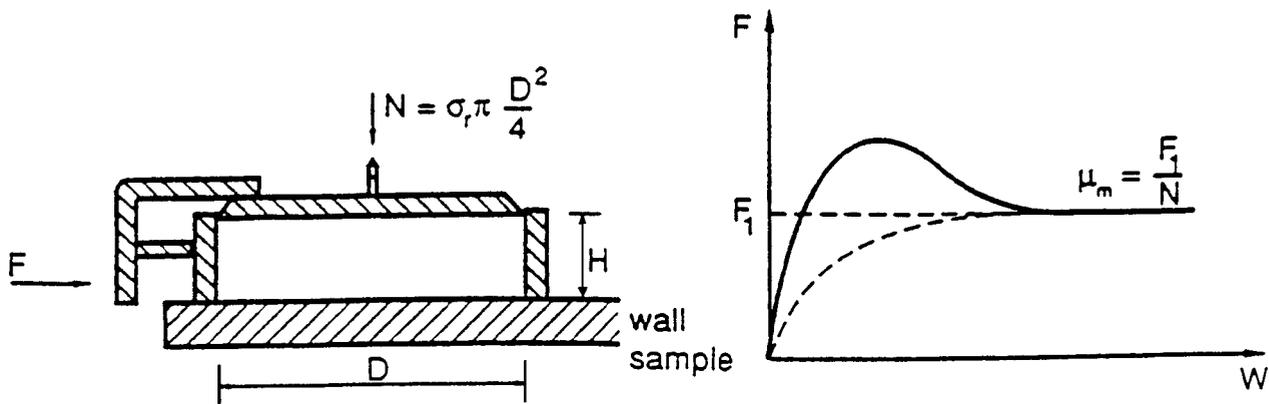
Un échantillon de matière granulaire est cisailé le long d'une surface représentant la paroi d'un silo (échantillon ondulé si les silos sont en tôle ondulée), la force de frottement sur la surface cisailée étant mesurée.

B.7.2.2 Appareil

L'appareil d'essai est représenté en figure B.1. Le diamètre D de la boîte doit être au moins égal à 40 fois la taille maximale des grains ; la hauteur comprimée de l'échantillon, H , doit être comprise entre $0,15 D$ et $0,20 D$. En cas d'échantillon de paroi présentant des irrégularités, telles que des ondulations, la taille de la boîte doit être choisie en conséquence.

B.7.2.3 Mode opératoire

- 1) La contrainte de référence doit être égale à la pression horizontale dans le silo.
- 2) La préparation de l'échantillon doit être effectuée selon les indications de B.6.
- 3) Le cisaillement de l'échantillon doit être effectué à la vitesse constante d'environ $0,04 \text{ mm/s}$.
- 4) C'est la force de frottement atteinte pour des grandes déformations, F_1 , qui doit entrer dans le calcul du coefficient de frottement (figure B.1).



B.8 Poids volumique consolidé, γ

B.8.1 Principe de l'essai

Le poids volumique, γ , est déterminé à partir d'un échantillon consolidé de matière granulaire.

B.8.2 Appareil

La boîte présentée en figure B.2 doit être utilisée pour mesurer le poids et le volume de l'échantillon de matière. Le diamètre de la boîte, D , doit être au moins égal à 40 fois la taille maximale des grains ; la hauteur comprimée de l'échantillon, H , doit être comprise entre $0,3 D$ et $0,4 D$.

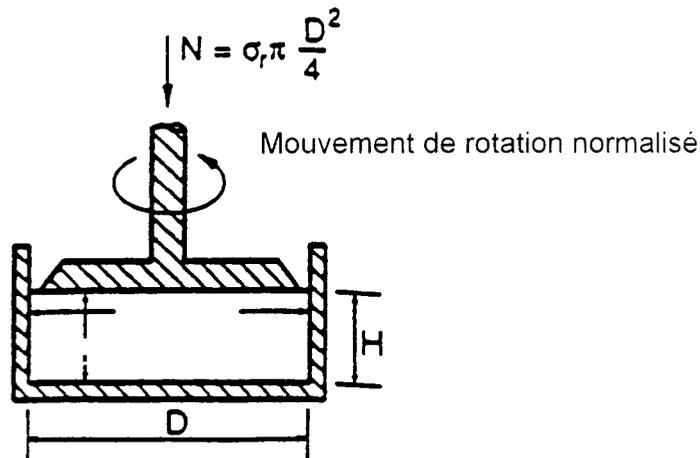


Figure B.2 : Dispositif pour la détermination de γ

B.8.3 Mode opératoire

- 1) La contrainte de référence doit être égale à la pression verticale dans le silo.
- 2) La préparation de l'échantillon doit être effectuée selon les indications de B.6. Le poids volumique est déterminé en divisant le poids d'un échantillon de matière granulaire consolidé par le volume.

B.9 Rapport de la pression horizontale à la pression verticale, K_{sm}

B.9.1 Mesure directe

B.9.1.1 Principe de l'essai

Une pression verticale est exercée sur un échantillon, dont la déformation horizontale est empêchée. Les contraintes horizontales et verticales en résultant sont mesurées et le coefficient $K_{s,m0}$ est déterminé.

NOTE : L'amplitude du coefficient $K_{s,m0}$ dépend de la direction des contraintes principales exercées sur l'échantillon. Les contraintes horizontales et verticales sont généralement les contraintes principales sur un échantillon alors qu'il peut en être autrement dans le silo.

B.9.1.2 Appareil

La géométrie de l'appareil d'essai est similaire à celle de l'appareil décrit en B.8, pour mesurer le poids volumique, γ (figure B.3). Pour mesurer la contrainte horizontale, il est nécessaire d'avoir une plaque de fond séparée.

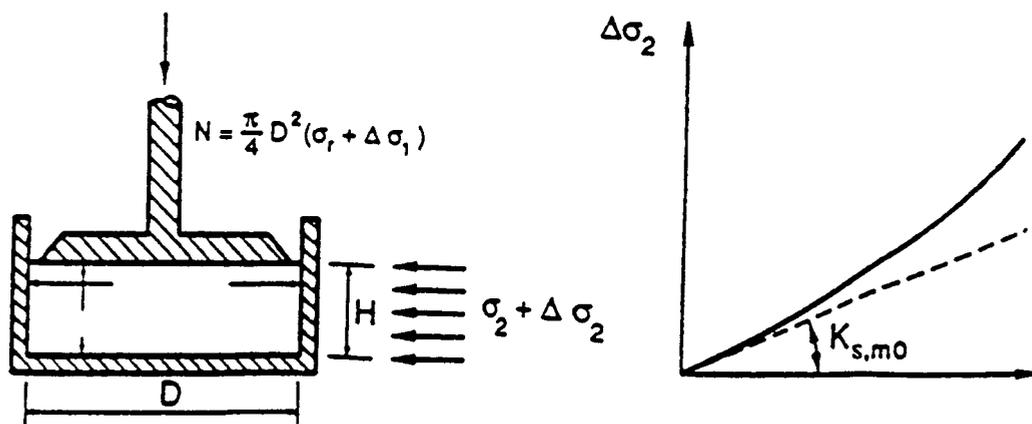


Figure B.3 : Méthode d'essai pour la détermination de $K_{s,m0}$

B.9.1.3 Mode opératoire

- 1) La contrainte de référence doit être égale à la pression verticale dans le silo.
- 2) La préparation de l'échantillon doit être effectuée selon les indications de B.6.
- 3) La relation entre les accroissements de charge verticale et horizontale entre paliers, à partir de laquelle est calculé $K_{s,m0}$, est déterminée selon les indications de la figure B.3.

$K_{s,m}$ doit être considéré comme égal à 1,1 $K_{s,m0}$

B.9.2 Mesure indirecte

Une valeur de $K_{s,m}$, adaptée aux conditions de remplissage et de stockage, est la suivante :

$$K_{s,m} = 1,1 (1 - \sin \varphi) \quad \dots (B.1)$$

où :

φ est l'angle de frottement interne mesuré, pouvant être déterminé à partir des méthodes décrites en B.10 ou de l'appareil d'essai triaxial.

B.10 Paramètres de résistance, c , φ_c et φ

B.10.1 Principe de l'essai

La résistance d'un échantillon de matière ensilée peut être déterminée à partir des essais à la boîte de cisaillement. Trois paramètres, c , φ_c et φ , sont utilisés pour déterminer la résistance de la matière ensilée en fin de remplissage du silo.

B.10.2 Appareil

L'appareil d'essai est composé d'une boîte de cisaillement cylindrique, comme indiqué figure B.4. Le diamètre de la boîte, D , doit être au moins égal à 40 fois la taille maximale des grains ; la hauteur, H , doit être comprise entre 0,3 D et 0,4 D .

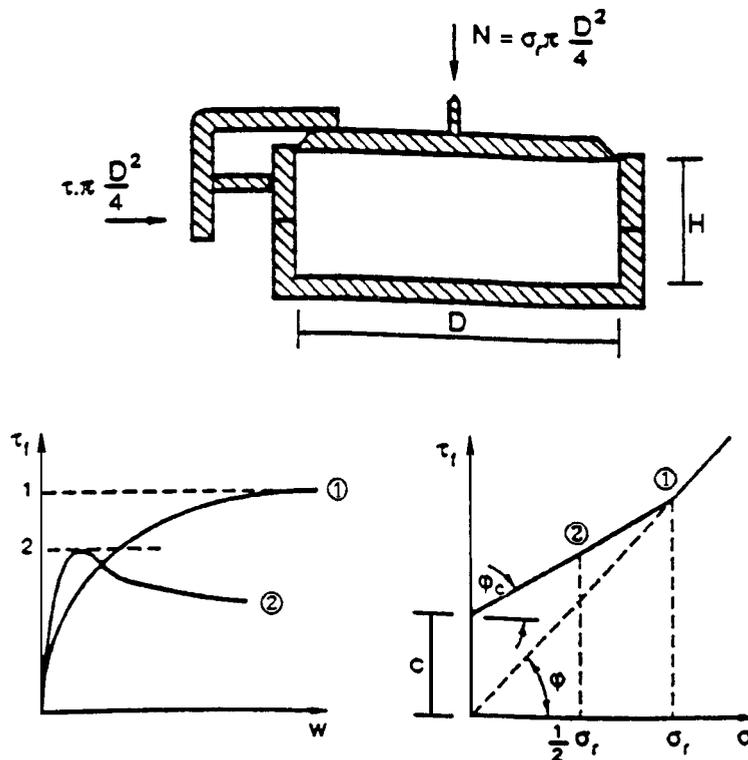


Figure B.4 : Méthode d'essai pour la détermination des angles de frottement interne, φ et φ_c et de la cohésion, c , au niveau de préconsolidation, σ_r

B.10.3 Mode opératoire

- 1) La contrainte de référence, σ_r , doit être égale à la pression verticale dans le silo. La préparation d'un échantillon doit être effectuée selon les indications de B.6.
- 2) C'est la contrainte maximale de cisaillement, τ_f , obtenue avant d'atteindre un déplacement horizontal $w = 0,05 D$ qui doit être utilisée pour calculer les paramètres de résistance de la matière.
- 3) Il faut effectuer au moins deux essais (tableau B.1 et figure B.4). Un échantillon doit être cisailé lorsqu'il est chargé à la contrainte de référence, l'autre étant cisailé à la moitié de la contrainte de référence, suite à un préchargement à la contrainte de référence. Les contraintes déterminées à partir des deux essais sont présentées tableau B.1.

Tableau B.1 : Essais recommandés

Essai	Préchargement	Charge d'essai	Résultat
N° 1	σ_r	σ_r	τ_{f1}
N° 2	σ_r	$0,5 \sigma_r$	τ_{f2}

Les paramètres de résistance de la matière ensilée, c , φ_c et φ , sont calculés comme suit :

$$\varphi = \arctan (\tau_{f1}/\sigma_r) \quad \dots \text{(B.2)}$$

$$\varphi_c = \arctan (\tau_{f1} - \tau_{f2})/ 0,5 \sigma_r \quad \dots \text{(B.3)}$$

$$c = \sigma_r (\tan \varphi - \tan \varphi_c) \quad \dots \text{(B.4)}$$

- 4) La résistance des matières sans cohésion ($c = 0$) est définie par un seul paramètre, l'angle de frottement interne, φ (ainsi égal à φ_c).

NOTE : Un essai triaxial normalisé peut être utilisé, de préférence à l'essai décrit ci-dessus.

Annexe C

(informative)

Actions sismiques

NOTE : La présente annexe sera retirée quand ce sujet sera repris dans l'ENV 1998.

C.1

1) La présente annexe donne des indications générales sur les calculs des silos pour les actions sismiques. Ces règles de calcul viennent en complément des règles générales des actions sismiques sur les structures, indiquées dans l'ENV 1998 ; il est possible qu'elles soient intégrées à l'ENV 1998, à une étape ultérieure.

2) La valeur d'accélération d'un tremblement de terre sur la structure d'un silo est calculée selon l'ENV 1998. Le silo et la matière granulaire peuvent être considérés comme une masse rigide unique.

C.2 Notation

a est l'accélération horizontale due à un tremblement de terre ;

P_{hs} est la pression horizontale due à des actions sismiques.

C.3 Situations de projet

1) Les situations de projet suivantes doivent être prises en compte :

- accélérations horizontales et charges verticales en résultant sur les supports et les fondations de silos (C.4.1) ;
- charges additionnelles sur les parois de silos (C.4.2) ;
- redistribution de la matière granulaire au sommet du silo. L'action sismique peut provoquer la formation de plans de glissement dans la matière ensilée, mettant en danger la structure du toit et les parois du silo, dans la partie supérieure (figure C.1).

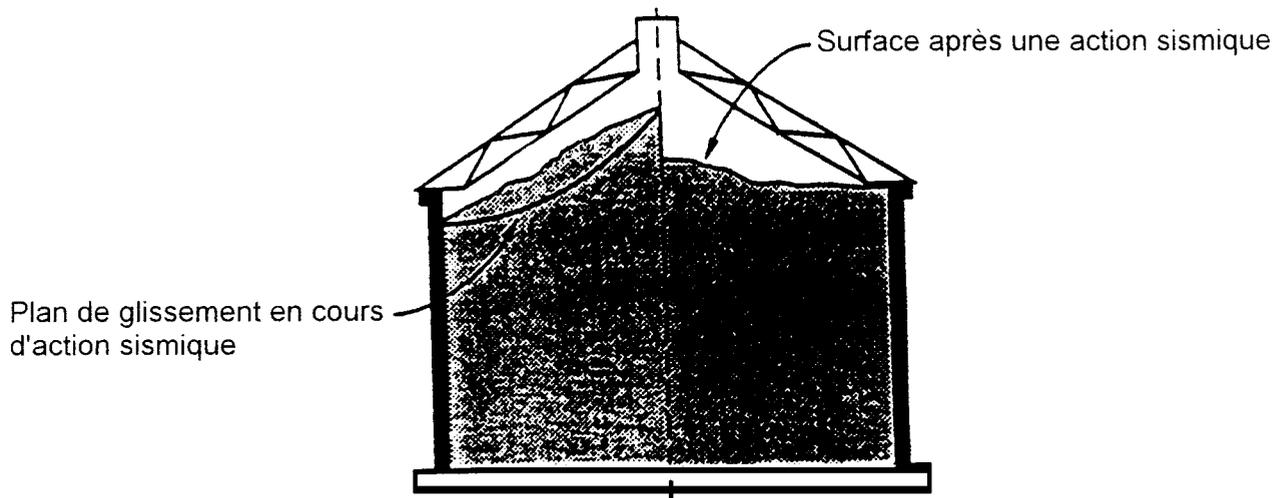


Figure C.1 : Redistribution de la matière granulaire au sommet du silo

C.4 Actions sismiques

Le paragraphe C.4.1 donne des indications pour le calcul des actions sismiques sur les supports et les fondations de silos, et le paragraphe C.4.2 des indications sur les parois de silos.

C.4.1 Supports et fondations de silos

Les actions sismiques dues au poids du silo et de la matière granulaire peuvent être considérées comme étant une force unique, s'exerçant au centre de gravité de l'ensemble formé par la structure et la matière granulaire (figure C.2).

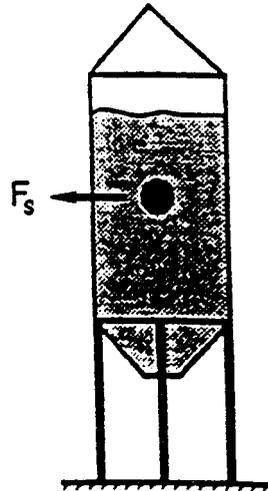


Figure C.2 : Action sismique sur les infrastructures

C.4.2 Parois de silos

Une force horizontale doit être appliquée sur les parois du silo. La charge équivaut à la masse de matière granulaire multipliée par la valeur d'accélération du tremblement de terre. La répartition horizontale de la pression due à des actions sismiques, sur les silos circulaires et rectangulaires, est indiquée sur la figure C.3. La pression horizontale est constante sur toute la hauteur du silo, mis à part à proximité du sommet du silo ou la résultante de la pression d'origine sismique et de la pression de remplissage ou de vidange ne doit pas être inférieure à zéro.

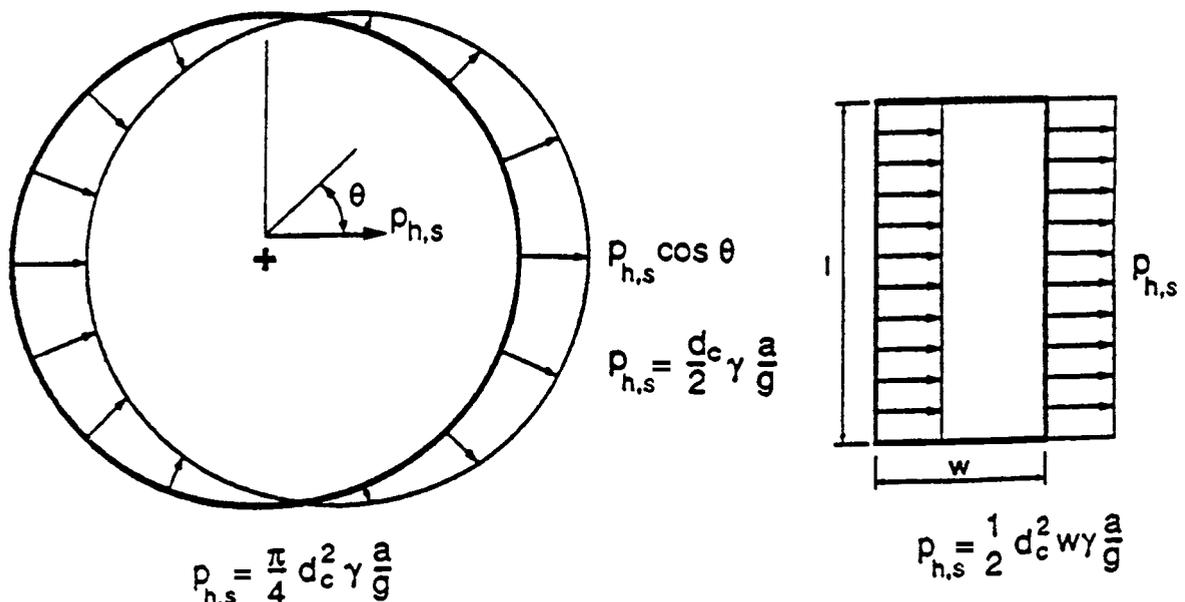


Figure C.3 : Vue en plan des pressions horizontales supplémentaires dues aux actions sismiques dans les zones à parois verticales des silos de section circulaire et rectangulaire

