

## NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

### Fondations des silos-tours Bozozuk, M.

For the publisher's version, please access the DOI link below. / Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

#### **Publisher's version / Version de l'éditeur:**

<https://doi.org/10.4224/40001128>

*Digeste de la construction au Canada, 1976-11*

#### **NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :**

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=753c7abc-f8db-4907-811f-f8d3aac9c700>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=753c7abc-f8db-4907-811f-f8d3aac9c700>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

**Questions?** Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

**Vous avez des questions?** Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

# Digeste de la Construction au Canada

Division des recherches en construction, Conseil national de recherches Canada

**CBD 177F**

## Fondations des silos-tours

*Publié à l'origine en novembre 1976.*

*M. Bozozuk*

### **Veillez noter**

Cette publication fait partie d'une série qui a cessé de paraître et qui est archivée en tant que référence historique. Pour savoir si l'information contenue est toujours applicable aux pratiques de construction actuelles, les lecteurs doivent prendre conseil auprès d'experts techniques et juridiques.

Les silos-tours sont des constructions agricoles de forme ogivale qui servent à entreposer le foin pour l'alimentation des animaux. La construction des premiers silos-tours remonte à environ 40 ans. C'étaient, pour la plupart, de petites constructions en bois, et certaines autres furent construites en béton. Depuis, elles ont augmenté tant en nombre, en dimensions et en capacité et le matériau prédominant est maintenant le béton, bien que l'acier soit également utilisé. En 1974, il s'est construit plus de 3 000 silos-tours au Québec et en Ontario, ce qui représente un investissement de l'industrie agricole de plus de 30 millions de dollars pour ces seules provinces. Parmi les constructions récentes, certaines sont complètement automatisées, dépassent 100 pi (31 m) de hauteur, et ont une capacité de plus de 2 500 tonnes.

La conception et la construction des silos se sont améliorées avec les années ainsi que les fondations ont quelque peu été négligées. Les tours ont souvent été érigées sur des fondations réalisées par le fermier qui n'avait pas toujours les connaissances techniques nécessaires. Cette pratique était assez heureuse parce que les silos étaient petits et que les contraintes transmises au sol par la fondation étaient faibles. Cependant, à mesure que les silos augmentaient de capacité et exerçaient des contraintes presque égales à la capacité portante du sol, certains s'enfonçaient, penchaient ou même s'abattaient complètement. Le présent Digeste offre un aperçu du problème et souligne l'importance d'une étude du sol afin d'en déterminer la capacité portante admissible et la compressibilité du sol pour la conception d'une fondation adéquate.

### **Définition du problème**

Plusieurs silos-tours élevés sur un terrain argileux reposent sur des fondations de béton en anneau. Pour des raisons d'économie, le plancher du silo est rarement bétonné. Dans un silo plein, une partie des charges est transmise aux fondations par les parois circulaires du silo et le reste est supporté directement par le sol dans l'anneau de la fondation. L'argile sous-jacente est comprimée verticalement sous le poids de la structure remplie, de façon que les charges appliquées sont distribuées uniformément au sol sur toute la surface limitée par la fondation

circulaire. Cette pression uniforme se répartit dans le sol sous la forme d'un bulbe de pression dont les dimensions et la configuration, déterminées d'après la théorie d'élasticité, dépendent du diamètre de la surface de contact, telle que le démontre la figure 1. Dans cette figure, deux semelles de dimensions différentes supportent une charge uniforme égale, mais le bulbe de pression sous la grosse fondation est beaucoup plus large et profond que celui de la petite. Dans les deux cas, la pression verticale maximale se produit immédiatement sous la semelle pour tomber à 10 pour cent de cette valeur à une profondeur égale à deux fois le diamètre de la fondation. Si les contraintes sont inférieures à la résistance au cisaillement du sol, l'ouvrage sera stable.

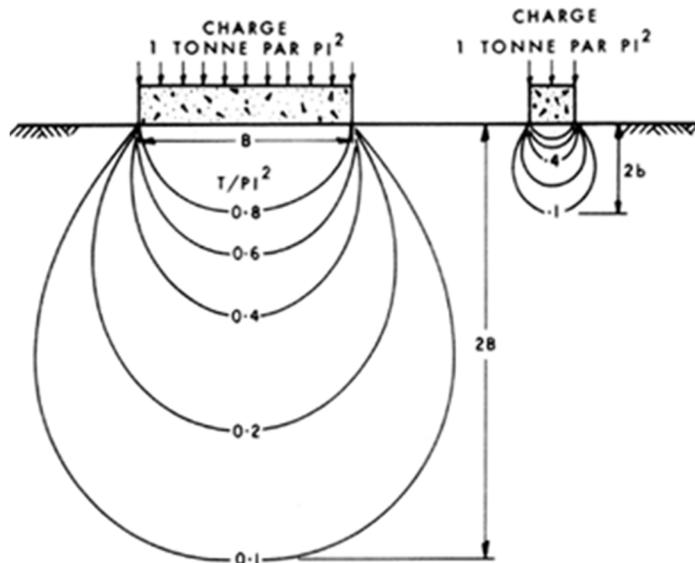


Figure 1. Bulbes de pression sous deux fondations rondes de dimensions différentes.

Le changement non uniforme des produits ensilés au cours du remplissage a créé plusieurs problèmes. Lorsque la charge due au poids de l'ensilage est décentrée, le bulbe de pression est déformé, comme le montre la figure 2(a). La poussée d'un vent fort sur un silo élevé peut produire le même effet. La surcontrainte sur une partie du sol peut même faire incliner le silo et, si le problème n'est pas résolu, peut même entraîner son renversement.

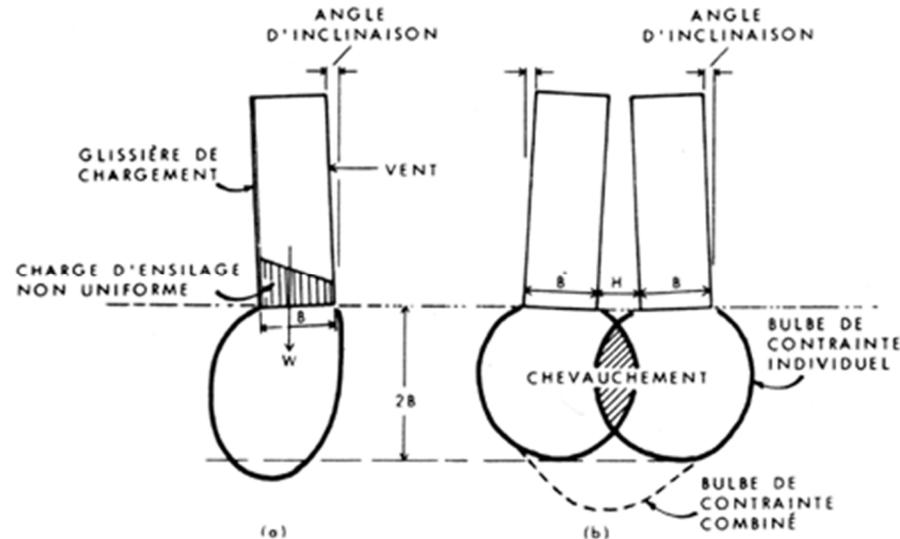


Figure 2. Bulbe de pression non uniforme et bulbes de pression se chevauchant.

Lorsque plusieurs silos sont construits trop près l'un de l'autre, les bulbes de pression se chevauchent (voir figure 2(b)). Les contraintes étant cumulatives, l'effet de groupe produit un bulbe beaucoup plus large et plus profond que les bulbes isolés. Le sol de la zone de chevauchement est soumis à des contraintes plus élevées, et le tassement des fondations est plus grand et les silos s'inclinent l'un vers l'autre (figure 3).



*Figure 3. Silos inclinés l'un vers l'autre à cause d'un tassement non uniforme dans la zone de chevauchement des bulbes de pression.*

La plupart des défaillances de fondations se produisent lorsqu'un silo élevé sur un terrain argileux est rapidement rempli pour la première fois (figure 4). A mesure que le silo se remplit, les charges sont appliquées au squelette de sol ainsi qu'à l'eau interstitielle. Les pressions engendrées dans l'eau interstitielle tendent à réduire le frottement entre les particules du sol, ce qui réduit la résistance au cisaillement de ce dernier. Si une fois le silo chargé, la résistance au cisaillement demeure plus élevée que les efforts de cisaillement exercés, l'ouvrage sera stable. Avec le temps, les excès de pression interstitielle disparaissent, les sols se consolident, leur résistance augmente, et l'ouvrage est stabilisé pour les remplissages subséquents.

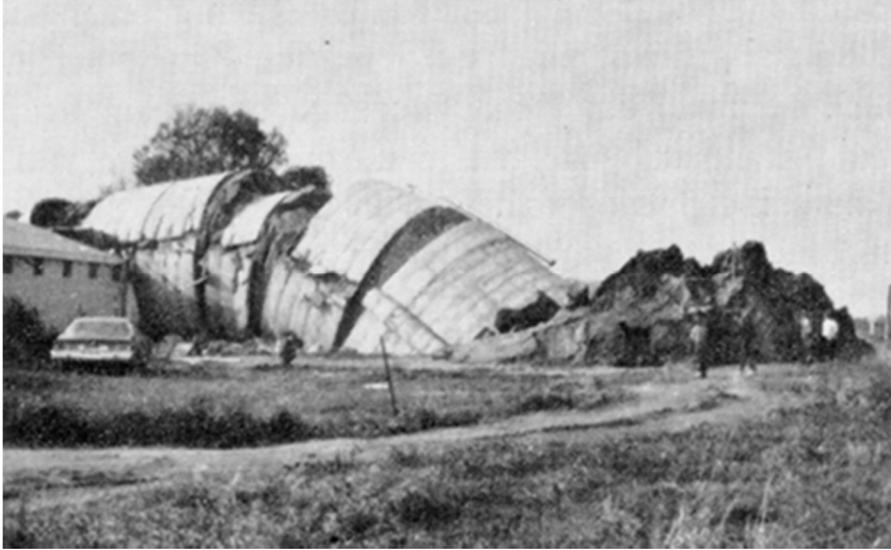


Figure 4. Rupture d'un silo d'une capacité de 2500 tonnes endommageant les granges voisines.

Dans les silos sans plancher, les liquides d'écoulement de l'ensilage s'infiltrant habituellement dans le sol sous-jacent. Les pressions interstitielles augmentent encore plus et la résistance au cisaillement du sol s'en trouve diminuée. Les semelles de fondations peuvent aussi être sapées par les liquides qui s'écoulent dans le sol sous l'effet de la pression hydraulique. Ces deux conditions, ensemble ou séparément, peuvent causer une rupture.

### Capacité portante de l'argile

Lorsqu'un silo se renverse, le plan de rupture du sol de fondation décrit un arc circulaire (figure 5). La direction de la contrainte de cisaillement le long de l'arc de glissement passe de 0 à 90° par rapport à la verticale. Dans de rares cas, la résistance au cisaillement du sol est isotrope (constante dans toutes les directions), mais elle est habituellement anisotrope (varie avec la direction de la contrainte de cisaillement appliquée). Des études sur les argiles marines ont démontré que la résistance au cisaillement pouvait, suivant la direction, diminuer de 35 pour cent par rapport à celle enregistrée à la verticale. Il faut par conséquent prévoir un coefficient de sécurité pour tenir compte de l'aspect anisotrope de la résistance, des contraintes non uniformes dues à l'application de charges excentrées et des moments de renversement dus aux vents forts et pour éviter les tassements verticaux excessifs. Ce coefficient de sécurité est appliqué à la résistance au cisaillement du sol dans l'équation suivante:

$$q_a = \frac{C}{F} N_c + P$$

où  $q_a$  = la capacité portante admissible

$C$  = résistance moyenne au cisaillement du sol à une profondeur sous les fondations égale au 2/3 du diamètre extérieur de la fondation

$N_c$  = coefficient de forme = 6.6 pour une fondation circulaire

$P = \gamma D$  = pression de surcharge au niveau de la semelle où  $D$  = profondeur de fondation et  $\gamma$  = densité du sol

$F$  = coefficient de sécurité contre la rupture (normalement 3).

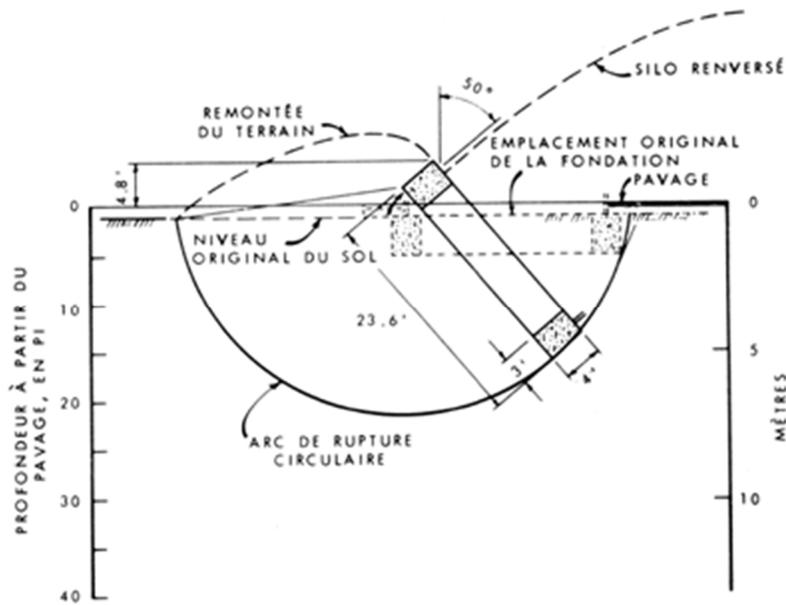


Figure 5. Aspect d'une fondation de silo après la rupture.

### Nécessité de l'étude du sol

La capacité portante et le tassement vertical d'un sol dépendent directement de ses propriétés géotechniques et seule une étude de ce sol peut renseigner sur son profil, sur l'emplacement de la nappe phréatique, sur ses indices de liquidité, sa résistance au cisaillement et sa compressibilité. Les Digests **29F** et **43F** fournissent des renseignements plus détaillés sur les études et les essais de sol.

Pour déterminer la capacité portante d'un sol, les données de résistance au cisaillement doivent être relevées sous les fondations à une profondeur égale au 2/3 du diamètre de la fondation. Les essais doivent être assez nombreux pour permettre de déterminer la résistance au cisaillement des couches différentes rencontrées jusqu'à cette profondeur.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la résistance au cisaillement d'un sol: sur place en utilisant un scissomètre ou un pénétromètre enfoncé verticalement dans le sol pour mesurer la résistance des couches de sol à différentes profondeurs ou essais en laboratoire de compression simple ou triaxiale effectués sur des échantillons intacts de sol.

Pour déterminer le tassement vertical de l'ouvrage, il faut effectuer des essais de consolidation à une profondeur égale à deux fois le diamètre de la fondation. Ces essais doivent être effectués sur des échantillons intacts de sol prélevés sur chacune des principales couches de sol.

On n'insistera jamais trop sur l'importance de l'étude du sol pour la conception des fondations de silos construits sur un terrain argileux. Ces études sont d'ordinaire effectuées par des ingénieurs conseils spécialisés dans l'étude des sols.

### Mesures particulières pour la conception des fondations de silos

Le propriétaire devrait toujours s'assurer que la fondation du silo projetée est adéquate (CBD 80F, **81F**). Les précautions suivantes doivent être prises si on veut obtenir un ouvrage stable:

#### *Semelles armées*

Les fondations en forme d'anneau sont soumises à des contraintes de flexion dues aux charges verticales des murs, aux poussées du sol, ainsi qu'aux charges de circonférence qui existent dans les murs à la base du silo. Vu la faible résistance à la traction du béton, les fondations doivent être renforcées à l'aide d'armatures d'acier pour résister aux moments de flexion et aux contraintes de traction. Si la fondation en anneau venait à se cisailier à cause d'une armature

insuffisante, son caractère monolithe serait détruit et, par conséquent, sa capacité à soutenir la structure diminuerait.

#### *Fondation en béton*

L'emploi d'un béton de bonne qualité et sa mise en oeuvre dans une excavation aux parois et aux fonds nets est de première importance. Un coffrage peut s'avérer nécessaire lorsque le sol est granulaire ou qu'il contient des blocs de pierre. La mise en oeuvre du béton de fondation doit être aussi soignée que la construction des murs du silo. Il est absolument inacceptable de négliger de contrôler la qualité du béton ou l'exécution.

#### *Centrage du silo sur les fondations*

La paroi porteuse du silo doit être centrée le plus possible sur les fondations pour que les charges appliquées au sol soient uniformes permettant d'utiliser sa capacité portante à son maximum.

Dans un sol faible, les fondations doivent être plus larges si on veut que les charges appliquées restent inférieures à la capacité portante admissible du sol. Pour assurer le maximum de stabilité contre le renversement, on réalise fréquemment une fondation dont le diamètre déborde de la paroi du silo. Le plancher à l'intérieur est habituellement omis pour des raisons d'ordre économique. Le diamètre intérieur de cette fondation est légèrement inférieur à celui de la paroi du silo. Autrement, les charges très lourdes des parois, appliquées à la rive intérieure de la fondation, auraient tendance à déformer cette dernière et la morceler à moins qu'une armature efficace ait été prévue. Les contraintes transmises au sol par les fondations ne seraient plus uniformes et des surcontraintes locales pourraient se produire dans le sol sous-jacent. Cependant, une armature appropriée et le prolongement de la semelle vers le centre du silo, permettent une redistribution plus uniforme des pressions de contact et réduisent les risques de déformations des fondations. Le poids supplémentaire de l'ensilage sur le prolongement de la semelle est minime parce que la charge d'ensilage est presque entièrement transmise par frottement à la paroi du silo.

#### *Groupe de silos*

Lorsque plusieurs silos sont élevés sur de l'argile compressible et que la charge exercée atteint la capacité portante admissible, l'espace horizontal minimal entre les silos ne devrait pas être inférieur au diamètre de fondation si on veut éviter les effets de groupe. Un espacement plus faible est toutefois possible à condition de prévoir des fondations sur pieux ou sur radier armé de manière à pouvoir s'opposer au moment de flexion.

#### *Liquides d'écoulement de l'ensilage*

D'importantes quantités de liquide se forment lorsque le fourrage est emmagasiné alors qu'il est mouillé, c'.-à-d. lorsque sa teneur en humidité est trop grande. Dans les silos-tours sans plancher, les liquides peuvent s'infiltrer dans le sol des fondations sous une pression hydrostatique élevée et saper ces dernières. Ces liquides peuvent faire augmenter les pressions interstitielles dans un sol argileux saturé et en réduire la résistance au cisaillement. De plus, des réactions chimiques peuvent réduire encore plus la résistance du sol.

Un plancher imperméable devrait être prévu pour éviter que les liquides d'écoulement n'atteignent le soi sous-jacent, et des drains doivent être installés pour les acheminer plus loin et réduire les pressions hydrostatiques à l'intérieur du silo. Ces drains doivent conserver leur efficacité pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

### **Conclusion**

L'industrie agricole devrait être avertie des plusieurs aspects de la conception et de la construction des silos-tours dans un sol argileux. L'entrepreneur peut avoir l'expérience voulue pour ériger des ouvrages de grandeurs moyennes, mais la construction de silos-tours de très grandes dimensions exige au préalable une étude des sols effectuée sous la direction d'un spécialiste, Il est impossible de construire une fondation sûre et économique sans connaître les

propriétés du sol de fondation et sans en tenir compte lors de la conception. De plus, le contrôle de la qualité et les inspections fréquentes sur le chantier au cours de la construction sont indispensables.

Il reste encore à établir des critères de comportement pour les silos-tours. Par exemple, jusqu'à quel point un silo-tour peut-il s'enfoncer verticalement ou s'incliner sans que cela affecte son utilisation? Existe-t-il un rapport optimal entre la hauteur et le diamètre du silo? Ces questions et bien d'autres peuvent être résolues par l'étude du comportement des silos existants et des données obtenues à partir d'instruments scientifiques installés dans les nouvelles structures élevées sur divers sols au Canada.