

# VENTILATION DANS LES SILOS-TOURS CONVENTIONNELS À FOURRAGE

A. Bahloul<sup>a</sup>, R. Gravel<sup>a</sup>, B. Roberge<sup>a</sup> et N. Goyer<sup>a</sup>  
M. Chavez<sup>b</sup> et M. Reggio<sup>b</sup>

**a** Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du Travail

**b** Département de Génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal

---

Le fourrage ensilé dans des silos-tours conventionnels subit une fermentation qui le rend plus digestible et nourrissant pour le bétail. Or, ce processus génère des gaz toxiques à des concentrations susceptibles de causer des intoxications graves, entraînant parfois la mort. En raison de la déficience en oxygène et de la présence de ces gaz, il est difficile de déterminer le moment où l'entrée dans un silo peut être sécuritaire. La ventilation demeure le meilleur moyen d'assurer la salubrité dans ces espaces clos. Dans un premier temps, une validation des simulations numériques, en résolvant le système des équations différentielles de conservation des quantités de mouvement et de masse (CFD), a été faite en comparant les résultats théoriques avec ceux expérimentaux obtenus au laboratoire de l'IRSST dans un silo à échelle réduite à l'aide de gaz traceurs soit le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et l'oxygène O<sub>2</sub>. Les résultats théoriques ont montré un très bon accord avec ceux expérimentaux. Ensuite, les paramètres d'utilisation du système de ventilation ont été étudiés et ont permis d'établir un modèle mathématique simple permettant de calculer le temps de ventilation nécessaire pour atteindre une qualité d'air acceptable.

---

## Introduction

Les silos sont considérés dans le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST) [1] comme des espaces clos et ont été le site d'accidents graves et parfois mortels. Selon le programme canadien de surveillance des blessures en milieu agricole (PCBMA), 20 décès en moyenne par an se sont produits au Québec entre 1989 et 2000.

L'intoxication par des gaz toxiques est une des causes d'accidents dans les silos. Ces accidents ont été reliés à une atmosphère déficiente en oxygène (O<sub>2</sub>) qui est remplacé par le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou encore, à la présence de gaz toxiques dont le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Ces gaz sont produits au cours du processus de fermentation du fourrage [2-4].

Pour sécuriser l'espace intérieur des silos à fourrage, on doit faire appel à la ventilation mécanique.

La ventilation mécanique utilisée jusqu'à présent est celle par soufflage forcé de l'air par l'ouverture servant au remplissage du silo par le fourrage en utilisant un instrument aratoire [5-6]. Le fait que les gaz CO<sub>2</sub> et NO<sub>2</sub> soient plus lourds que l'air, de hautes concentra-

tions se situeraient à la surface de l'ensilage. Dans ce cas, un tube flexible devrait être introduit jusqu'à une hauteur de 6 m de la surface d'ensilage pour pouvoir évacuer ces gaz toxiques [7].

Les paramètres de ventilation par soufflage ont été étudiés par calcul et de façon expérimentale dans un silo à échelle réduite conçu au laboratoire de l'IRSST. Le temps minimal de ventilation avant l'entrée dans l'espace libre du silo a été déterminé en fonction des concentrations des gaz présents, de l'espace libre à ventiler et du débit de ventilation. Pour se faire, des simulations numériques ont été menées en utilisant l'outil commercial CFD Fluent. Ces calculs théoriques ont été validés par des tests expérimentaux effectués dans le silo à échelle réduite.

## Méthodologie

### *Méthode numérique*

Par le biais du code commercial 'Fluent'[8-9], la ventilation dans un silo est simulée numériquement dans une configuration tridimensionnelle en utilisant le dioxyde de carbone et l'oxygène comme traceurs. Ces

simulations consistent à résoudre les équations différentielles de conservation de masse et de quantité de mouvement. Le fluide est considéré incompressible et newtonien. La convection forcée est forte, elle prédomine alors les effets naturels. La température est considérée constante dans tout le domaine. Le système d'équations régissant le problème est écrit sous la forme classique de l'équation de transport pour la propriété  $\Phi$  :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}}_{\text{Transient}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\Phi U_i)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_i}\right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{Source}} \quad i=1, 2, 3$$

Dans cette expression,  $\rho$  représente la masse volumique du fluide,  $\Gamma_\Phi$  est le coefficient de diffusion,  $S_\Phi$  est un terme source et  $U_i$  est la composante de vitesse dans la direction  $i$ . Les équations gouvernant le problème sont :

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial\rho U_i}{\partial x_i} = 0$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial\rho U}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right) + g_i(\rho - \rho_0)$$

Conservation des espèces :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{U_i C}) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_i} - \rho \overline{\mu_i c'}\right)$$

où  $P$ ,  $\mu$ ,  $C$  et  $D$  représentent respectivement la pression, la viscosité dynamique, la concentration et la diffusion moléculaire.

Étant donné la force du soufflage pour évacuer les gaz concentrés à la surface d'ensilage, l'écoulement résultant est turbulent. Le modèle  $k-\varepsilon$  est choisi comme modèle de turbulence dans cette étude. La configuration étudiée, ainsi que le maillage utilisé sont présentés à la figure 1.

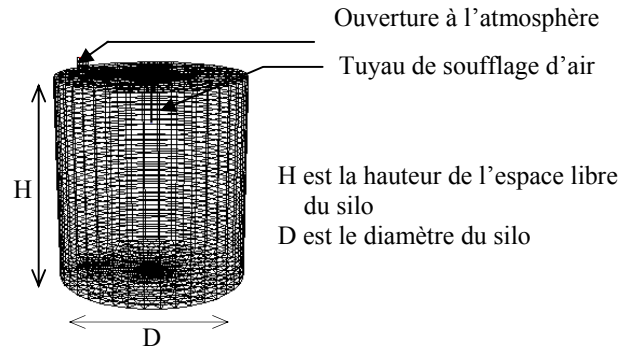


Figure 1 : Modèle numérique du mini silo

### Validation de la méthode numérique

Le modèle de silo à échelle réduite, représentant l'espace libre d'un silo réel rempli de fourrage, respecte les proportions de grandeur de l'un des modèles de silo à fourrage utilisés par les producteurs québécois. Un silo à fourrage est fréquemment rempli de fourrage à 90 % de sa capacité. Afin de correspondre à la réalité, le mini silo respecte la proportionnalité hauteur,  $H$ , et diamètre,  $D$ , ( $H$  et  $D$  représentent le 1/10 des longueurs réelles) de l'espace libre d'un silo réel. Le débit réduit de ventilation par soufflage est alors le  $10^{-3}$  de celui utilisé en milieu agricole. Le silo à échelle réduite est représenté à la figure 2.

Les gaz  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$  étaient utilisés comme gaz traceurs pour déterminer le temps de ventilation. En effet, à chaque test les concentrations initiales de ces gaz ont été ajustées en introduisant du  $\text{CO}_2$  et du  $\text{N}_2$  dans le silo. Le soufflage s'effectuait par l'entrée 3 au centre de la paroi supérieure du mini silo à l'aide d'un tube flexible introduit jusqu'à une hauteur de 6 cm de la base du silo expérimental. Durant la ventilation, les gaz étaient évacués par l'orifice 2. Les prélèvements des gaz ont été effectués à la base du silo à chaque 10 secondes et à un débit de 0,2 L/min. Après les mesures, les gaz prélevés étaient réintroduits dans le silo pour maintenir l'équilibre dans l'espace interne du silo. L'instrument à lecture directe de marque ADC modèle LFG20 a été utilisé pour mesurer le  $\text{CO}_2$  et l' $\text{O}_2$ . L'acquisition des données se faisait directement par ordinateur qui permettait la visualisation de l'évolution des gaz dans le silo au cours de la ventilation. Le test était arrêté quand les concentrations des gaz mesurés se stabilisaient aux concentrations de l'air extérieur.



Figure 2 : Installation expérimentale

1. Mini silo en béton
2. Ouverture du silo à l'atmosphère
3. Tuyau air de service pour le soufflage
4. Mesure de concentration CO <sub>2</sub> et O <sub>2</sub>
5. Bombonne CO <sub>2</sub>

En parallèle, des simulations numériques étaient effectuées puis comparées avec les résultats expérimentaux.

Des tests expérimentaux de ventilation ont été effectués pour les paramètres de contrôle suivants : Q, le débit de ventilation; H la hauteur de l'espace libre à ventiler; C<sub>iO<sub>2</sub></sub> la concentration initiale de l'oxygène et C<sub>iCO<sub>2</sub></sub>, la concentration initiale du dioxyde de carbone.

### Résultats

#### Comparaison des données expérimentales et numériques

La figure 3 montre la variation des concentrations des gaz CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> en fonction du temps durant la ventilation. Les simulations numériques sont représentées par des lignes et les données expérimentales par des points. Elle montre un très bon accord entre les calculs numériques et les mesures expérimentales. Le temps final de ventilation était déterminé dès que la concentration en O<sub>2</sub> atteignait 99 % de la concentration de l'air extérieur.

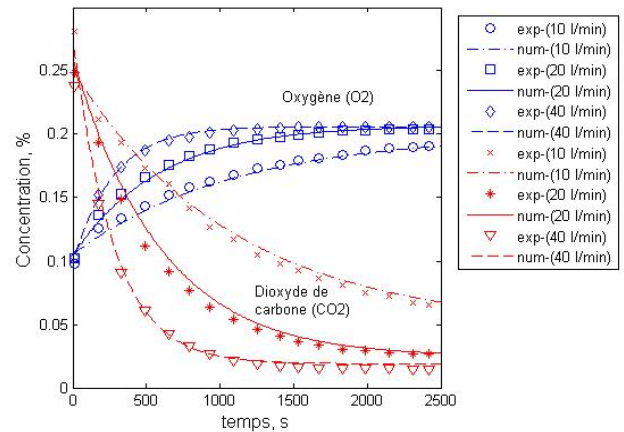


Figure 3 : Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux

#### Étude paramétrique

Une fois validées, les simulations numériques ont permis de mener un travail paramétrique. Son objectif était d'établir un modèle analytique permettant de calculer facilement le temps nécessaire de ventilation pour une entrée sécuritaire de l'agriculteur dans un silo. Ce temps dépend de 4 paramètres qui sont : la taille de l'espace libre à ventiler (H et D), du débit de ventilation (Q), des concentrations initiales de l'O<sub>2</sub> et du CO<sub>2</sub> (C<sub>iO<sub>2</sub></sub> et C<sub>iCO<sub>2</sub></sub>).

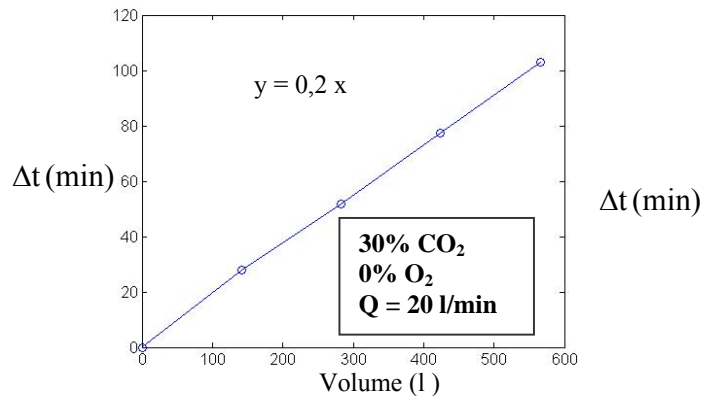


Figure 4 : Temps de ventilation en fonction du volume de l'espace libre du silo

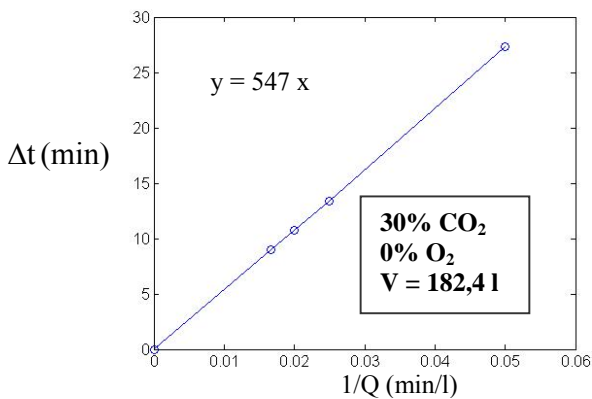


Figure 5 : Temps de ventilation en fonction du débit de ventilation

Pour déterminer un modèle analytique permettant de calculer de le temps de ventilation, ce dernier est déterminé en fonction de l'un des 4 paramètres en maintenant les autres paramètres constants.

Le temps de ventilation croit linéairement avec le volume,  $V = \pi H D^2/4$ , de l'espace dans le silo à ventiler (voir Figure 4). Il est inversement proportionnel au débit de ventilation comme le montre la figure 5.

La figure 6 montre une décroissance exponentielle du temps de ventilation avec la concentration initiale de l'oxygène.

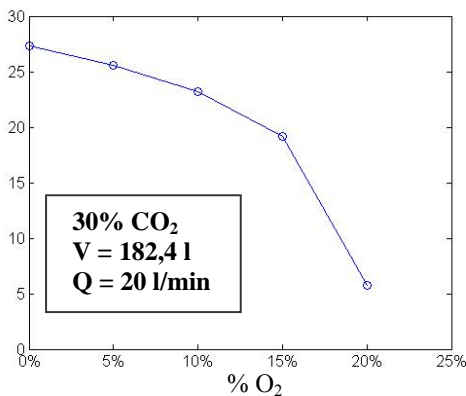


Figure 6 : Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale d'O<sub>2</sub>

La figure 7 présente la variation du temps,  $\Delta t_1^*$ , normalisée par rapport à  $V/Q$  en fonction de  $\ln(21\% - C_{iO_2})$ . La figure montre une dépendance linéaire du temps normalisée par rapport à la variable  $\ln(21\% - C_{iO_2})$ .

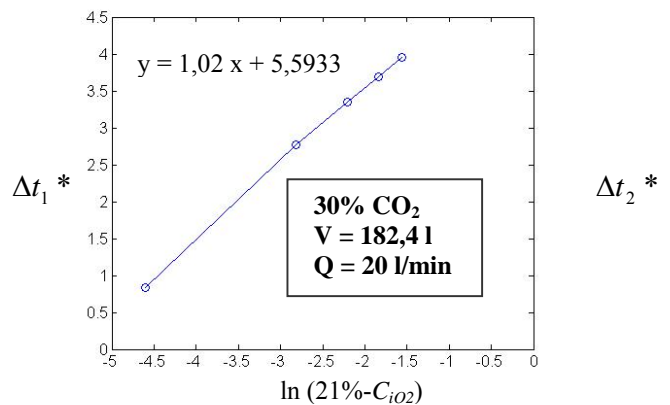


Figure 7 :  $\Delta t_1^* = \frac{\Delta t \times 4 \times Q}{\pi \times D^2 \times H}$  en fonction de la concentration initiale de l'O<sub>2</sub>

De ces figures, à  $C_{iCO_2} = 30\%$ , le temps de ventilation  $\nabla t_1$  est modélisé comme suit:

$$\Delta t_1 = \frac{\pi D^2 H}{4Q} [1,02 \ln(21\% - C_{iO_2}) + 5,5933]$$

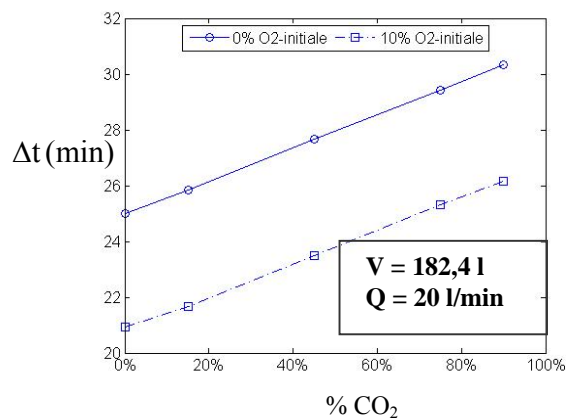


Figure 8 : Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale d'O<sub>2</sub>.

Pour déterminer le modèle final qui tient compte de la concentration initiale du dioxyde de carbone, le temps de ventilation est déterminé pour différentes concentration de CO<sub>2</sub> en maintenant V, Q et C<sub>iO<sub>2</sub></sub> constants. La figure 8 montre la variation de Δt en fonction des concentrations initiales de dioxyde de carbone pour deux valeurs initiales de C<sub>iO<sub>2</sub></sub> (0% et 10%). Les courbes montrent une croissance linéaire du temps de ventilation en fonction de C<sub>iO<sub>2</sub></sub>. En utilisant l'expression

de  $\Delta t_1$  le temps normalisé  $\Delta t_2^*$  ( $= \frac{\Delta t \times 4 \times Q}{\pi \times D^2 \times H} - \ln(21\% - C_{iO_2})$ ) est obtenu puis tracé à la figure 9 en fonction de  $C_{iO_2}$ . Les deux courbes sont ramenées en une seule courbe linéaire.

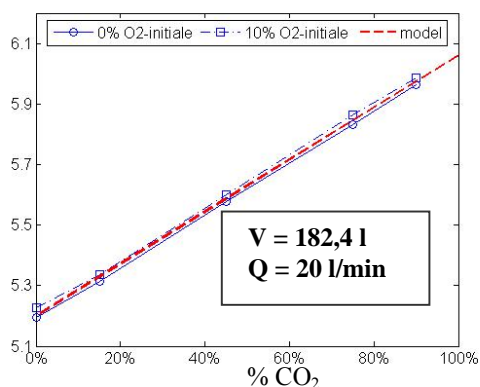


Figure 9 :  $\Delta t_2^* = \frac{\Delta t \times 4 \times Q}{\pi \times D^2 \times H} - \ln(21\% - C_{iO_2})$  en fonction de la concentration initiale d' $O_2$ .

De la figure 9, le modèle général est établi :

Modèle final :

$$\Delta t = \frac{\pi D^2 H}{4 Q} \left[ \ln(21\% - C_{iO_2}) + 0,86 C_{iCO_2} + 5,2 \right]$$

Pour un silo-tour réel, le modèle est valide en respectant les unités suivantes :

$\Delta t$  : temps de ventilation, [min].

$D$  : diamètre du silo-tour, [m].

$H$  : hauteur du silo-tour, [m]

$Q$  : débit de l'air de soufflage, [ $m^3/min$ ]

$C_{iO_2}$  : concentration  $O_2$  initiale, [%]

$C_{iCO_2}$  : concentration  $CO_2$  initiale, [%]

Pour valider le modèle, des tests expérimentaux de ventilation sont reconduits au laboratoire. Pour des paramètres variables, les temps de ventilation trouvés sont comparés à ceux calculés par le modèle et aux calculs numériques. Le tableau 1 montre un exemple de comparaison des résultats. Les résultats obtenus sont en très bon accord. En effet le modèle donne une

bonne estimation du temps de ventilation nécessaire pour rendre l'espace interne du silo sécuritaire.

Tableau 1 : Calculs des temps de ventilation

L/min	Expérimentaux	Numériques	Modèle
10	54 min	56 min	58 min
20	26 min	28 min	29 min
40	13 min	14 min	16 min

Pour  $H=0,645m, D=0,6m,$

$C_{iO_2}=10\%$  et  $C_{iCO_2}=25\%$

### Conclusions

En résumé, le silo à l'échelle réduite conçu au laboratoire de l'IRSST a permis de mener des tests de ventilation par soufflage. La technique des gaz traceurs, en utilisant l'oxygène et le dioxyde de carbone, a permis de déterminer le temps de ventilation nécessaire pour rendre l'espace interne du silo sécuritaire. Ces mesures ont validé les simulations numériques utilisant le code commercial Fluent. Ce dernier a permis de mener une étude de ventilation approfondie en tenant compte de différents paramètres de contrôle du problème. Cette étude a permis d'établir un modèle simple permettant de calculer le temps nécessaire de ventilation avant toute intervention de l'agriculteur dans l'espace interne du silo. Ce modèle a été validé expérimentalement au laboratoire et numériquement à l'aide du code de calcul Fluent. Il sera intéressant de le valider sur le terrain. Le modèle permet d'estimer avec précision le temps de ventilation avant l'entrée dans le silo. Rappelons que les silos sont des espaces clos et qu'ils doivent être ventilés en tout temps lorsque des travaux y sont faits.

## Références

- [1] Gouvernement du Québec. Règlement sur la santé et la sécurité du travail. Gazette officielle du Québec, Décret 885-2001, 2001.
- [2] A. G. Meiering M.G. Courtin, S. F. Spoelstra, G. Pahlow, H. Honig, R. E. Subden et E. Zimmer, 'Fermentation kinetics and toxic gas production of silage.' Tran. Am. Soc. Agric. Eng., 31(2), 613-621, 1988.
- [3] B. M. Paragon, 'Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires.' afssa, 1-118, 2004.
- [4] Jiang, S., Barber E.M., Meiring, A.G., and Jofriet, J.C. 1990. Toxic gas production and silo ventilation. Canadian Agricultural Engineering. 151
- [5] E. M Berber and M. J. Zulak, Effectiveness of silage blowers for clearing gases from tower silos, Dept. of Agricultural Engineering-University of Saskatchewan, 1984.
- [6] J. A. Groves and P. A. Ellwood, Gases in forage tower silos, Ann. Occup. Hyg., Vol 33, No 4, pp. 519-535, 1989.
- [7] NIOSH Face Program,  
<http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html>.
- [8] Fluent Inc. Fluent 6.2.16 User Manual, 2005.
- [9] Fluent Inc. Gambit 2.2.3. User Manual, 2005