

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-818



Modélisation par simulation numérique de la ventilation des silos-tours en tenant compte de la chute

*Ali Bahloul
Fernando Villalpando
Mauricio Chavez
Marcelo Reggio
Nicole Goyer*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2014
ISBN : 978-2-89631-724-0 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2014



Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-818

Modélisation par simulation numérique de la ventilation des silos-tours en tenant compte de la chute

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Ali Bahloul

Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST

Fernando Villalpando, Mauricio Chavez, Marcelo Reggio

Département de génie mécanique, École polytechnique de Montréal

Nicole Goyer

Consultante en hygiène du travail



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Les silos à fourrage sont des espaces clos où surviennent des accidents graves et mortels. Certains de ces accidents sont liés à une atmosphère déficiente en oxygène (O_2) en raison de la présence de gaz carbonique (CO_2), ou encore à celle de gaz toxiques, dont le dioxyde d'azote (NO_2). Ces gaz sont produits lors du processus de fermentation des fourrages.

À la demande de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et de l'Union des producteurs agricoles (UPA), une étude sur la documentation des gaz toxiques lors de la fermentation du fourrage et sur la ventilation mécanique par soufflage des silos verticaux utilisés pour l'ensilage a été réalisée. Les résultats de cette étude sont publiés dans le rapport R-672 - [*La prévention des intoxications dans les silos à fourrage*](#), disponible sur le site internet de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).

Cette première étude portant entre autres sur la ventilation des silos avait été effectuée au moyen de la simulation numérique fluide (*Computational fluid dynamics*, CFD). Cette méthode numérique avait été validée à partir des comparaisons avec des données expérimentales obtenues dans un silo à échelle réduite conçu par l'IRSST. Étant donné que la fermentation du fourrage se fait habituellement de façon anaérobie, toutes les portes communicantes entre le silo et la chute étaient considérées fermées lors de ces simulations. En conséquence, le modèle mathématique général et le modèle simplifié qui ont été obtenus pour estimer le temps de soufflage ont uniquement tenu compte de l'espace libre dans le silo, la ventilation dans la chute n'ayant pas été considérée.

La présente étude est donc un complément à l'étude précédente avec l'inclusion de la chute dans le domaine de calcul. Un nouveau modèle mathématique général est donc proposé, tenant compte du volume total de l'espace à ventiler, soit le volume du silo et le volume de la chute. Il est maintenant démontré que le temps estimé avec chute change légèrement par rapport au temps estimé sans chute. Il est donc suggéré d'utiliser la nouvelle équation puisqu'elle représente mieux la réalité.

Afin de déterminer si l'équation simplifiée déjà proposée pouvait quand même servir, elle a été comparée avec le nouveau modèle mathématique général. Cette comparaison a établi que le modèle simplifié est toujours valide. Une simulation numérique, CFD, a été pratiquée pour les cas extrêmes, c'est-à-dire quand le volume de la chute est significatif par rapport au volume libre dans le silo, les résultats ont démontré que, lorsque le rapport des volumes chute / silo est supérieur à 0,4 (cas extrême), le temps nécessaire pour sécuriser la chute est supérieur à celui du silo de l'ordre de 10 %. Ceci n'a pas d'impact sur l'équation simplifiée puisqu'elle est toujours plus conservatrice que le temps estimé par le modèle général et les calculs numériques. Le modèle simplifié reste toujours valable même pour les configurations extrêmes.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE	5
3. MÉTHODOLOGIE.....	6
3.1 Méthode numérique.....	6
3.2 Étapes de l'étude	6
3.3 Étude du maillage	7
3.4 Modèle de turbulence	8
3.5 Étude paramétrique.....	8
4. RÉSULTATS.....	9
4.1 Analyse de maillage.....	9
4.2 Dimensions du silo.....	9
4.3 Étude paramétrique pour le silo et la chute	10
4.3.1 Temps de ventilation en fonction du volume total à ventiler.....	11
4.3.2 Temps de ventilation en fonction du débit de soufflage.....	12
4.3.3 Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale d'oxygène	14
4.3.4 Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale de dioxyde de carbone .	16
5. DISCUSSION.....	19
5.1 Comparaison des équations avec et sans chute	19
5.2 Modèle simplifié pour le calcul du temps de ventilation	22
5.3 Ventilation dans le silo et la chute avec seulement une première porte ouverte.....	24
6. CONCLUSION	28

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 29

ANNEXE 1: CATALOGUE DE SILOS CONVENTIONNELS COMMERCIAUX 30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Concentrations des gaz au-dessus de l'ensilage du silo	2
Figure 2 : Point d'entrée et chute vers la salle d'alimentation.....	2
Figure 3 : Ventilation mécanique par soufflage (NIOSH (2008))	4
Figure 4 : Représentations du modèle.....	7
Figure 5 : Effets du maillage sur le temps de dilution	9
Figure 6 : Effets des dimensions du silo sur le temps de dilution.....	10
Figure 7 : Temps de ventilation en fonction du volume total	11
Figure 8 : Variation du temps de ventilation en fonction du volume total	12
Figure 9 : Temps de ventilation en fonction du débit de soufflage	13
Figure 10 : Variation du temps de ventilation en fonction du débit de soufflage.....	14
Figure 11 : Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale d'O ₂	15
Figure 12 : Variation du temps de ventilation en fonction de la concentration d'O ₂	16
Figure 13 : Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale de CO ₂	17
Figure 14 : Variation du temps de ventilation en fonction de la concentration de CO ₂	18
Figure 15 : Comparaison des temps de ventilation selon les équations tenant compte ou non de la chute.....	21
Figure 16 : Temps de ventilation obtenus à partir du modèle simplifié	24
Figure 17 : Schéma de silo avec une porte ouverte	25
Figure 18 : Temps de ventilation avec une seule porte ouverte pour trois grandeurs de silos	26
Figure 19 : Comparaison des temps de ventilation avec une porte ouverte pour trois grandeurs de silos obtenus par simulation CFD, par l'équation générale et par le modèle simplifié	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dimension des silos et volumes à ventiler	24
---	----

1. INTRODUCTION

Les silos à fourrage sont considérés dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (S-2.1, r.19.01) comme des espaces clos et ont été le site d'accidents graves et parfois mortels. L'intoxication est une des causes d'accidents dans les silos. Ces accidents sont reliés à une atmosphère déficiente en oxygène (O_2) remplacé par le dioxyde de carbone (CO_2) généré, ou à la présence de gaz toxiques, dont le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). Ces gaz sont produits au cours du processus de fermentation du fourrage (Meiering *et al.* 1998; Paragon, 2004; Jiang *et al.* 1990). Selon le programme Surveillance des blessures dans le secteur agricole au Canada (SBAC, 2011), 50 accidents mortels liés à l'exposition à des substances toxiques se sont produits en milieu agricole au Canada, entre 1990 et 2008, dont 10 accidents dus à l'inhalation des gaz de silo.

Pour assurer une qualité d'air acceptable à l'intérieur des silos à fourrage, il faut notamment faire appel à la ventilation mécanique. La ventilation mécanique utilisée jusqu'à présent est effectuée par soufflage forcé de l'air par l'ouverture servant au remplissage du silo (Barber et Zulak, 1984; Groves et Ellwood, 1989; NIOSH, 2008).

À la demande de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et de l'Union des producteurs agricoles (UPA), une étude sur la documentation des concentrations de gaz toxiques lors de la fermentation du fourrage et sur la ventilation mécanique par soufflage des silos verticaux utilisés pour l'ensilage a déjà été réalisée. Les résultats de cette étude sont publiés dans le rapport R-672 - [La prévention des intoxications dans les silos à fourrage](#), disponible sur le site internet de l'IRSSST (Bahloul *et al.* 2010)¹. Cependant, ces résultats ont permis d'estimer le temps de soufflage avec l'aide d'un modèle mathématique général et d'un modèle simplifié en ne tenant compte que de l'espace libre dans le silo, sans considérer la ventilation dans la chute adjacente au silo.

Mesure des gaz de fermentation

Les mesures de gaz ont été prises dans trois silos d'une ferme laitière. Les résultats étaient en accord avec ceux rapportés dans les études publiées concernant la fermentation du fourrage, dans ce type de silos verticaux. En effet, les concentrations des gaz dans l'espace libre au-dessus du fourrage ont atteint 2,7 % en CO_2 (valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) = 0,5 %), 29 ppm en NO_2 (VEMP = 3 ppm) et près de 70 ppm en NO (VEMP = 25 ppm), avec un écart des températures mesurées de plus de 3°C. Ces données ont mis en évidence la présence de fermentation pour certains ensilages. De plus, des gaz ont été décelés dans la chute communicante avec le silo car dans cette ferme, il y avait reprise du fourrage dès les premiers jours d'ensilage et pour ce faire, la porte de communication devait être ouverte. Ces résultats ont donc confirmé l'importance de ventiler avant et pendant l'exécution des travaux dans un espace classifié « *espace clos* » au sens du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST).

Les résultats ont également démontré que les gaz émis étaient partiellement évacués dans la salle d'alimentation adjacente au silo via cette chute. Le graphique présenté à la Figure 1, tiré de Bahloul *et al.* (2010), montre effectivement une baisse des concentrations des gaz de

¹ <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSSST/R-672.pdf>.

fermentation dans le silo à chaque reprise de fourrage, à chaque 12 heures; à cette baisse de concentration dans le silo correspondait une augmentation des concentrations dans la chute, au-dessus du convoyeur et dans la salle d'alimentation. La chute est également un espace clos et doit donc aussi être ventilée avant que le producteur n'y entre (Figure 2).

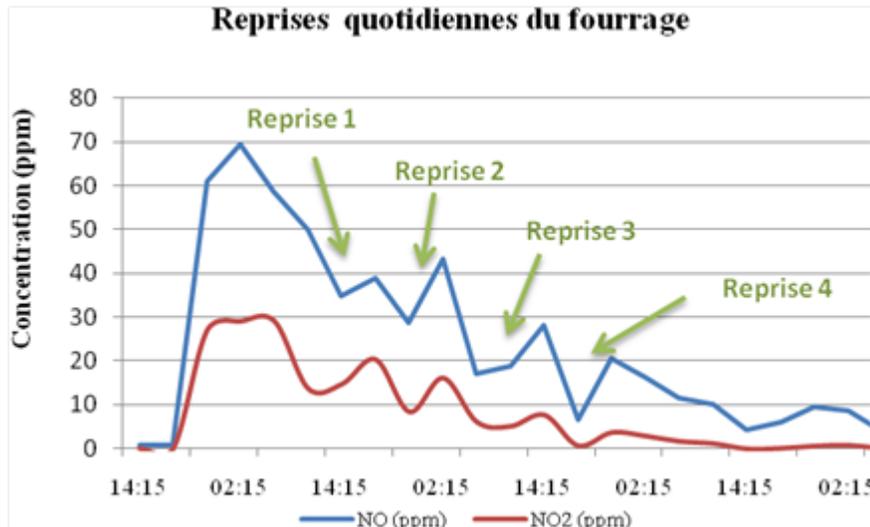


Figure 1 : Concentrations des gaz au-dessus de l'ensilage du silo, mesurées à intervalle de 12 heures.



Figure 2 : Silo à fourrage avec point d'entrée et chute vers la salle d'alimentation.

Étude de ventilation

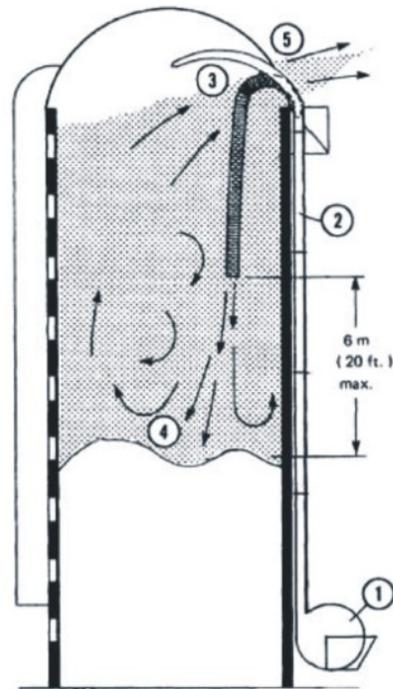
En parallèle avec les mesures effectuées sur le terrain, une étude de ventilation a été réalisée à l'aide de la simulation numérique classique basée sur la mécanique des fluides (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) (Balhoul *et al.* 2010). Le modèle analytique utilisé a été validé par des

mesures prises en laboratoire, dans un silo à échelle réduite dont la représentativité a été démontrée au préalable (Bahloul *et al.* 2008). Les tests réalisés en variant le débit, la hauteur de l'espace libre et les concentrations initiales d'oxygène et de dioxyde de carbone ont alors permis de vérifier le bien-fondé des prédictions obtenues par simulation. Une très bonne concordance a aussi été obtenue entre les calculs numériques et les mesures expérimentales, relativement à l'évolution des concentrations d'oxygène et de dioxyde de carbone.

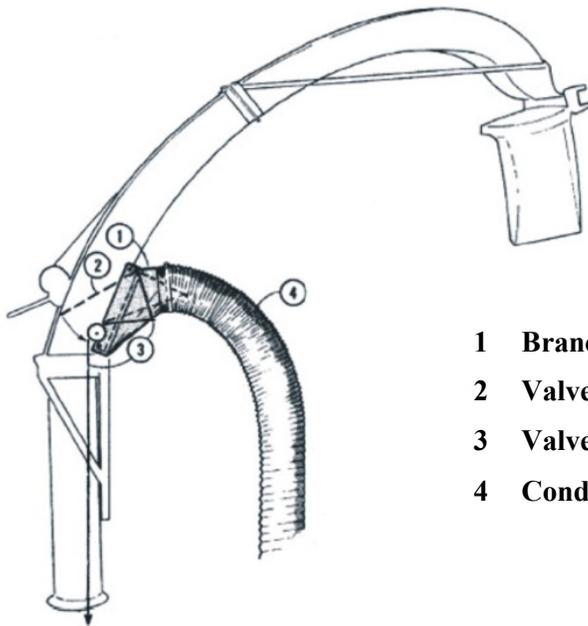
Par la suite, sur la base d'une étude paramétrique effectuée par voie numérique uniquement, un modèle mathématique général, duquel a découlé un modèle simplifié, a été développé pour déterminer le temps de soufflage d'air nécessaire pour atteindre un environnement sécuritaire dans le silo en fonction du débit de soufflage et du volume du silo. Les paramètres considérés dans ces modèles étaient le diamètre et la hauteur du silo (donc le volume), le débit de soufflage et les concentrations initiales d'oxygène et de dioxyde de carbone.

Jusqu'à présent, la ventilation mécanique employée est celle par soufflage forcé utilisant l'ouverture qui sert au remplissage du fourrage. Les concentrations de CO₂ et de NO₂ les plus élevées se situent à la surface de l'ensilage, dû au fait que ces gaz sont plus lourds que l'air. Pour cette raison, un tube flexible est introduit jusqu'à une hauteur de 6 m de la surface d'ensilage pour pouvoir évacuer les gaz toxiques (Figure 3).

Dans cette étude antérieure, étant donné que la fermentation du fourrage se fait habituellement de façon anaérobique dans le silo donc sans échange d'air avec la chute, le modèle mathématique général et le modèle simplifié, qui ont été obtenus pour estimer le temps de soufflage, ont uniquement tenu compte de l'espace libre dans le silo, la ventilation dans la chute n'ayant pas été considérée (Bahloul *et al.* 2010, 2012). Une étude complémentaire tenant compte du volume de la chute à ventiler était donc nécessaire.



a) Ventilation du silo à tour conventionnelle à fourrage.



- 1 Branchement pour la ventilation
- 2 Valve d'ouverture de la ventilation
- 3 Valve de dérivation de la ventilation
- 4 Conduit flexible de ventilation

b) Attachement proposé de ventilation ("gooseneck" par Lancaster Level-Flo, Inc., Lancaster, Pennsylvania 17602, USA).

Figure 3 : Ventilation mécanique par soufflage (NIOSH, 2008).

2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Le modèle analytique obtenu de l'étude précédente (Bahloul *et al.* 2010) permet le calcul du temps nécessaire de ventilation pour assurer une qualité d'air acceptable dans le silo lors de la première entrée dans le silo, lorsque celui-ci est complètement fermé, donc avant l'ouverture d'une porte. La présente étude vise à adapter ce modèle analytique pour calculer le temps nécessaire de ventilation du silo et de la chute afin d'obtenir une qualité d'air acceptable, pour les situations où les portes de la chute vers le silo sont ouvertes.

3. MÉTHODOLOGIE

Puisque le modèle mathématique obtenu par simulation numérique lors de l'étude précédente (Bahloul *et al.* 2010) s'est avéré juste lorsque validé par les mesures expérimentales, il a été convenu que le temps d'évacuation des gaz toxiques, avec prise en compte de la chute et de ses ouvertures, pourra également être obtenu avec précision au moyen de simulations numériques. Les modèles numériques (schéma numérique, modèle de turbulence, modèle de parois, etc.), validés lors de l'étude précédente, ont, par conséquent, été adaptés à la présente étude. Il n'a donc pas été jugé nécessaire de refaire une validation de ces modèles.

3.1 Méthode numérique

Les simulations ont été faites à l'aide de l'outil CFD commercial FLUENT² qui permet la résolution des équations de Navier-Stokes gouvernant le mouvement des fluides. En plus des écoulements, le logiciel Fluent peut tenir compte des phénomènes de dispersion de contaminants dans un milieu ambiant. Les calculs ont pu être réalisés pour des écoulements turbulents, en utilisant l'un des modèles de turbulence proposés. Le plus répandu est le modèle k- ϵ , de l'équation de l'énergie cinétique de turbulence et de la dissipation de la turbulence. Le schéma de discrétisation était de type volumes finis. Les régimes d'écoulement considérés avaient des vitesses faibles (subsoniques); la méthode de résolution du type correction en pression était ainsi employée. Les quantités calculées étaient les composantes de la vitesse, les fractions de chaque espèce chimique et la pression.

3.2 Étapes de l'étude

La première étape consistait à définir et à créer les modèles d'étude (géométrie de l'espace à ventiler, Figures 4a et 4b) et à les mailler suivant nos besoins (Figure 4c), à l'aide du logiciel GAMBIT permettant de préparer les domaines physiques. Il fallait également démontrer que les résultats étaient indépendants du maillage utilisé.

Les simulations numériques à l'aide du logiciel FLUENT ont permis, dans une deuxième étape, de mener une étude paramétrique du temps de ventilation en fonction du volume de l'espace libre du silo, de la chute et de ses ouvertures, du débit de ventilation et des concentrations initiales d'oxygène (O₂) et de gaz carbonique (CO₂). Dans le cas présent, les simulations ont été faites pour un silo de taille réelle alors que dans l'étude précédente, elles avaient été produites avec les dimensions du mini silo expérimental. Ainsi, dans la présente étude, les dimensions étaient 10 fois plus grandes et le débit de soufflage 1000 fois plus grand que ceux du mini-silo. Il était donc nécessaire de vérifier la similitude des résultats quelle que soit la grandeur du silo.

² FLUENT Inc. (2005) Fluent 6.2.16 User Manual. En ligne:
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics>

[Dernière consultation : janvier 2014]

Enfin, le modèle d'estimation du temps total de ventilation développé dans le cadre de la première étude a été complété pour tenir compte des ouvertures dans la chute du silo. L'évaluation d'un cas extrême, c'est-à-dire lorsque le silo est presque complètement rempli avec seulement la première porte supérieure ouverte, a également été réalisée. Le modèle final permet le calcul du temps de ventilation nécessaire pour assurer une bonne qualité de l'air dans le silo et dans sa chute. Les étapes pour l'obtention de ce modèle mathématique général sont présentées de façon abrégée dans la section des résultats (chapitre 4) alors que la méthodologie détaillée est décrite dans le rapport de Bahloul *et al.* (2010).

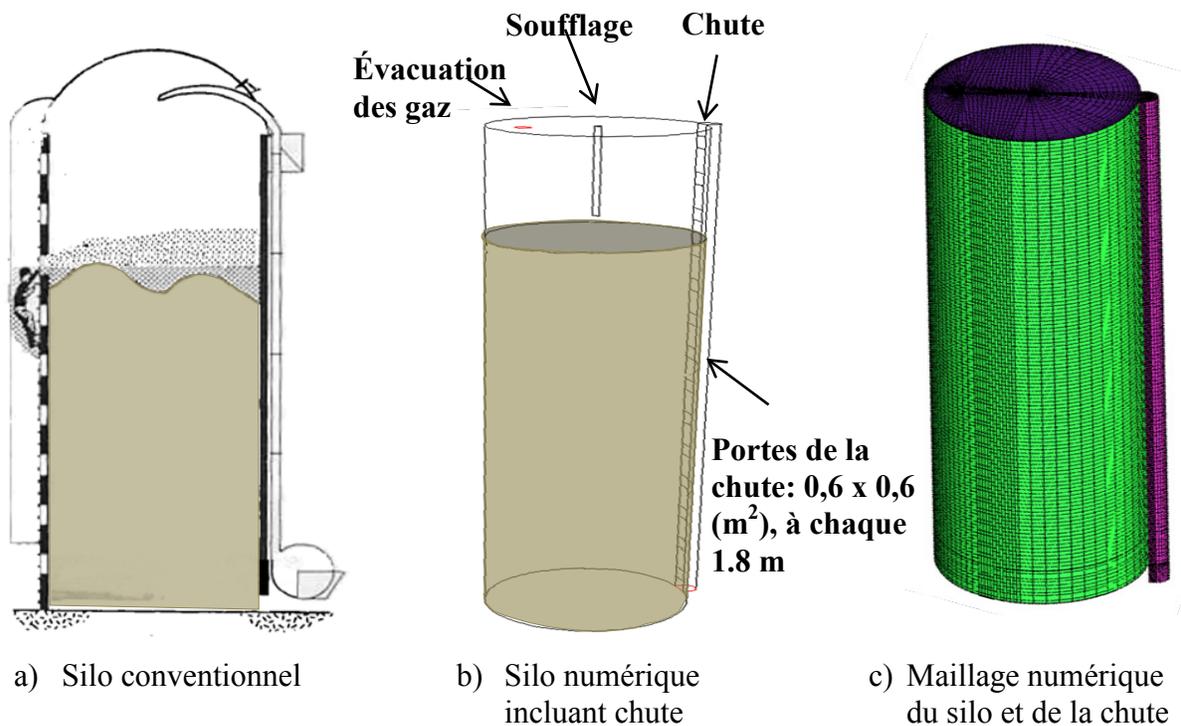


Figure 4 : Représentations du modèle.

3.3 Étude du maillage

Le prototype expérimental correspondait à 1/10 d'un silo à tour conventionnel rempli à 90% de sa capacité et le débit de ventilation avait été réduit en conséquence à 1/1000 de celui utilisé en milieu agricole. Le modèle numérique avait des caractéristiques identiques à celles du silo expérimental. Par conséquent, et puisque la présente étude s'est concentrée sur l'espace libre à ventiler, les dimensions du modèle numérique pour l'étude de maillage correspondaient à 0,6 m de diamètre et 0,64 m de hauteur, avec un débit de ventilation par soufflage fixé à 20 m³/min. Trois grandeurs de maillage ont été testées : 104 208 (grossier), 233 121 (moyen) et 340 632 (fin) éléments.

3.4 Modèle de turbulence

Étant donné la force du soufflage pour évacuer les gaz concentrés à la surface d'ensilage, l'écoulement résultant est turbulent. Le modèle $k-\varepsilon$ standard a été choisi comme modèle de turbulence dans cette étude, tel que suggéré par Bahloul *et al.* (2010). La modélisation des voisinages des parois a été réalisée par le biais de la loi de paroi standard incorporée dans FLUENT. Le débit de ventilation a été imposé comme un flux massique d'air et la sortie d'évacuation des gaz comme sortie à pression atmosphérique constante. Toutes les simulations ont été réalisées à température constante (condition isotherme).

3.5 Étude paramétrique

L'étude paramétrique de la présente étude a été effectuée sur un grand silo conventionnel ayant une hauteur de 24,4 m et un diamètre de 7,3 m (Annexe 1). L'étude paramétrique a inclus l'analyse de quatre variables soient : l'espace libre (volume à ventiler, V), le débit de soufflage (Q), la concentration initiale de CO_2 (ci_{CO_2}) et la concentration initiale de O_2 (ci_{O_2}). À chaque étape, le temps de ventilation, Δt , a été déterminé; il se définit comme le temps nécessaire pour atteindre une concentration d' O_2 de 20,5% à l'intérieur du silo (cette concentration en oxygène correspond à 98% de celle de l'environnement externe du silo, 21%). Le temps de ventilation a été obtenu numériquement, en fonction de l'un des quatre paramètres énumérés ci-dessus, tout en maintenant les autres paramètres constants. Chaque étape a alors permis d'établir un modèle analytique de Δt en fonction du paramètre étudié.

4. RÉSULTATS

4.1 Analyse de maillage

L'évolution dans le temps des concentrations d'oxygène et de dioxyde de carbone, avec un soufflage de $20 \text{ m}^3/\text{min}$ d'air, a été obtenue pour les trois grandeurs de maillage testées (Figure 5). Une bonne concordance a été observée entre les trois maillages. En conséquence, le maillage grossier est utilisé dans cette étude puisqu'il permet d'obtenir des résultats plus rapidement, sans sacrifier la précision.

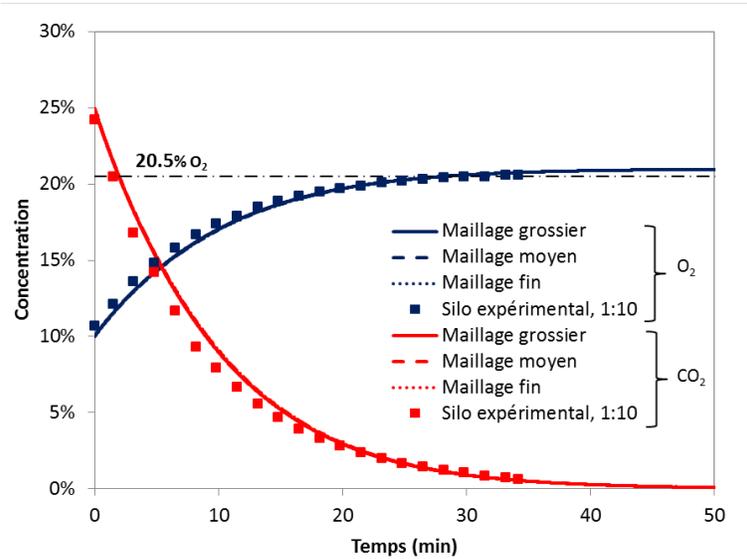


Figure 5 : Effets du maillage sur le temps de dilution.

4.2 Dimensions du silo

Une bonne concordance des résultats a également été observée entre le mini-silo expérimental (10 fois plus petit que le silo réel), le silo numérique expérimental (échelle 1:10) et le silo numérique de taille commerciale (échelle 1:1) (Figure 6). Ceci prouve que de respecter le critère de similitude des dimensions et du débit de soufflage est suffisant pour que les caractéristiques de l'écoulement à l'intérieur du mini-silo numérique et du silo numérique de taille commerciale soient considérées comme identiques. Conséquemment, les dimensions du silo de taille commerciale sont utilisées dans la présente étude.

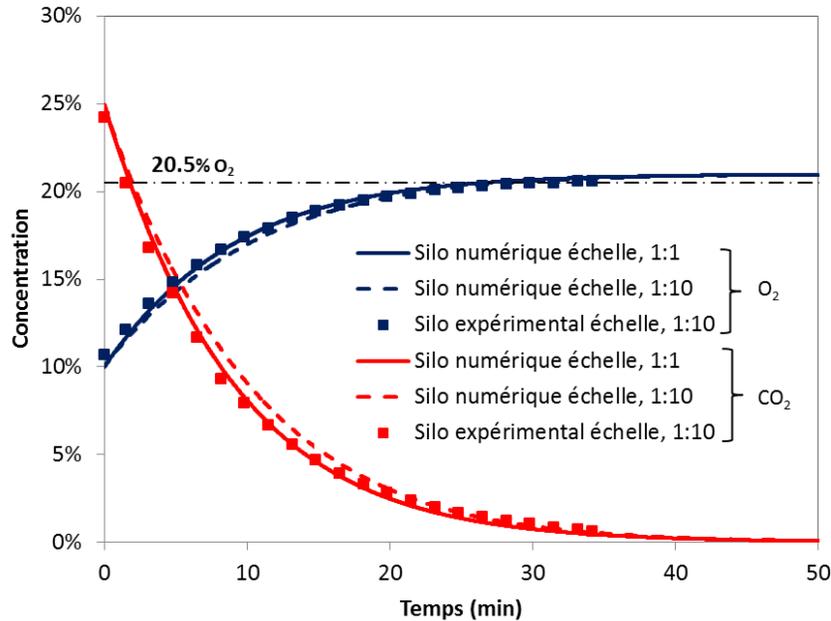


Figure 6 : Effets des dimensions du silo sur le temps de dilution.

4.3 Étude paramétrique pour le silo et la chute

La nécessité de répéter l'étude paramétrique repose sur le fait que deux modifications ont été introduites dans la présente étude par rapport à la première étude:

- le modèle numérique du silo est de taille commerciale, échelle 1:1;
- la chute fait partie du domaine de calcul.

Ce dernier point implique que, dorénavant, le volume à ventiler (volume total, V) correspond à l'addition du volume d'air à l'intérieur du silo et du volume de la chute, tel que décrit par l'équation suivante :

$$V = V_{\text{silo}} + V_{\text{chute}} = \frac{\pi \cdot H_{\text{silo air}} \cdot D_{\text{silo}}^2}{4} + \frac{\pi \cdot H_{\text{chute}} \cdot D_{\text{chute}}^2}{4} \quad (1)$$

où

$H_{\text{silo air}}$ = hauteur de la colonne d'air du silo

D_{silo} = diamètre du silo

H_{chute} = hauteur de la chute

D_{chute} = diamètre de la chute.

L'étude paramétrique de ventilation par soufflage a permis de développer un modèle mathématique permettant de calculer le temps de ventilation (Δt , en minutes) nécessaire avant toute intervention du travailleur à l'intérieur du silo. Le critère utilisé pour déterminer Δt correspond au temps de soufflage nécessaire pour atteindre 98% de la concentration d'oxygène normalement mesurée dans l'air ambiant, soit 20,5% O₂. Les variables identifiées pour l'étude paramétrique étaient les suivantes : le volume total à ventiler, V (m³), le débit de soufflage, Q (m³/min); la concentration initiale d'oxygène, ci_O₂ (%) et la concentration initiale de dioxyde de carbone, ci_CO₂ (%).

4.3.1 Temps de ventilation en fonction du volume total à ventiler

Dans la première étape de l'étude paramétrique, le temps de ventilation a été déterminé en fonction du volume total à ventiler en maintenant le débit de soufflage et les concentrations initiales d'O₂ et de CO₂ constantes (Q = 20 m³/min; ci_O₂ = 10%; ci_CO₂ = 25%). Il faut noter que toutes les portes communicantes entre le silo et la chute au-dessus du niveau du fourrage étaient ouvertes. Trois volumes à ventiler ont été utilisés soient 303, 523, 743 m³. Ils ont été calculés en utilisant les dimensions du grand silo (Annexe 1) pour trois niveaux de remplissage, soit 72% (4 étages libres), 50% (7 étages libres) et 30% (10 étages libres). Les Δt nécessaires pour obtenir la concentration ciblée d'O₂ en fonction du volume libre total sont présentés à la figure 7.

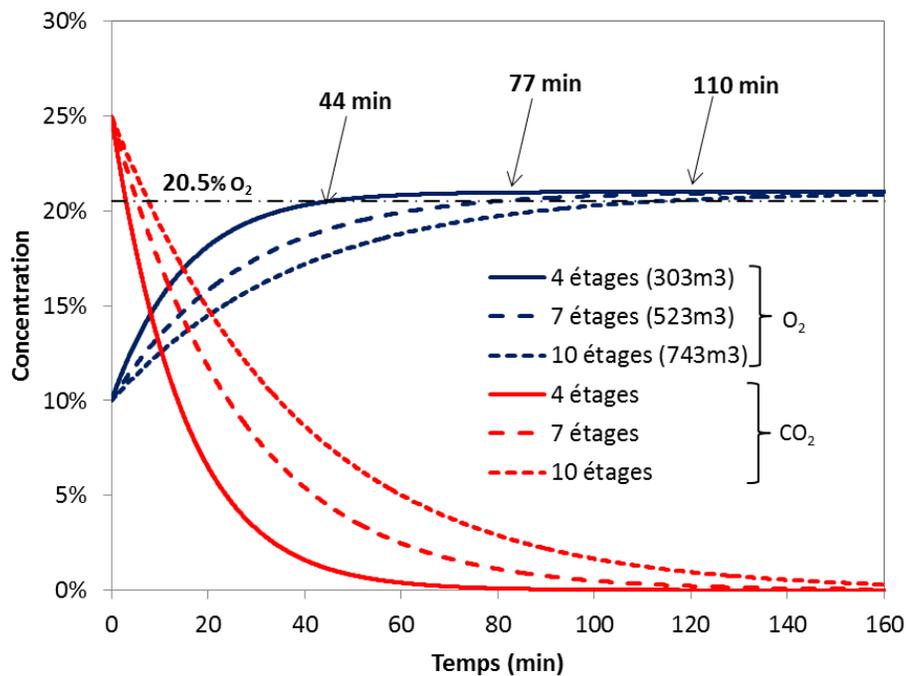


Figure 7 : Courbes temporelles des concentrations d'O₂ et de CO₂ pendant la ventilation pour 3 volumes à ventiler différents.

Comme attendu, le temps de ventilation nécessaire pour atteindre 20,5% d'oxygène dans le silo croît linéairement avec le volume total, ceci pour $Q = 20 \text{ m}^3/\text{min}$, $ci_{\text{O}_2} = 10\%$, $ci_{\text{CO}_2} = 25\%$ (Figure 8).

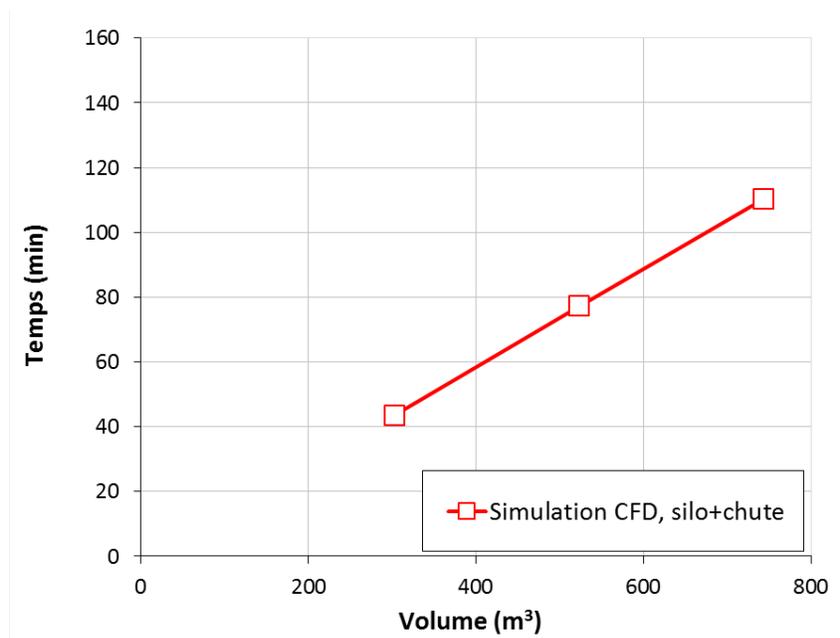


Figure 8 : Temps de ventilation en fonction du volume total à ventiler.

4.3.2 Temps de ventilation en fonction du débit de soufflage

La deuxième étape consistait à déterminer le temps de ventilation (Δt) en fonction du débit de soufflage (Q). Quatre débits ont été considérés, soient $Q = 20, 30, 40, 50 \text{ m}^3/\text{min}$, avec $ci_{\text{O}_2} = 10\%$, $ci_{\text{CO}_2} = 25\%$ et $V = 743 \text{ m}^3$ (volume correspondant à un grand silo rempli à 30%, donc 10 étages libres). Les Δt nécessaires pour obtenir la concentration ciblée d' O_2 en fonction du débit de soufflage sont présentés à la figure 9.

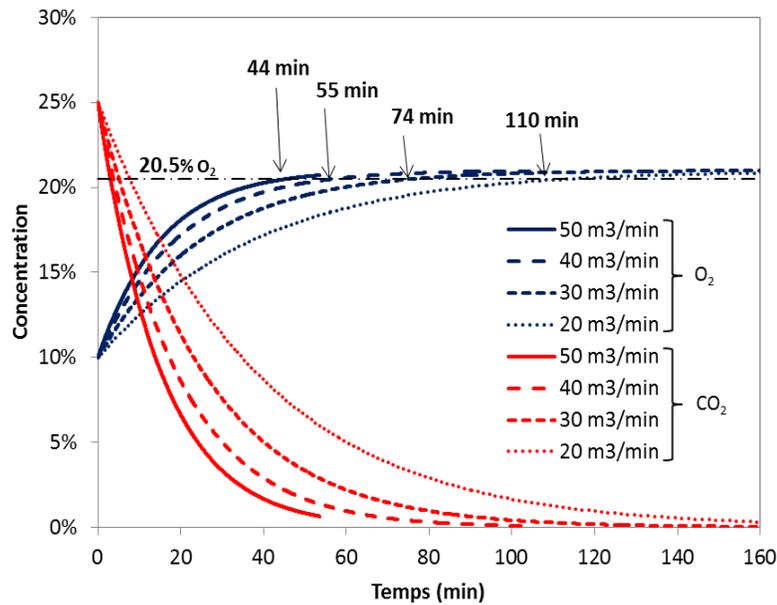


Figure 9 : Courbes temporelles des concentrations d'O₂ et de CO₂ pendant la ventilation pour 4 débits de soufflage.

Il a été vérifié que Δt croît fortement à de faibles débits et tend vers zéro à de grands débits (Bahloul *et al.* 2010). Par conséquent, il est possible de confirmer que le temps de ventilation est inversement proportionnel au débit de soufflage, Q . Pour éliminer l'effet du volume total, V , sur le temps de ventilation, un temps normalisé Δt^{*1} est introduit et défini comme suit :

$$\Delta t^{*1} = \frac{\Delta t}{V} \quad (2)$$

La Figure 10 montre que le temps normalisé, Δt^{*1} , est inversement proportionnel au débit de soufflage Q .

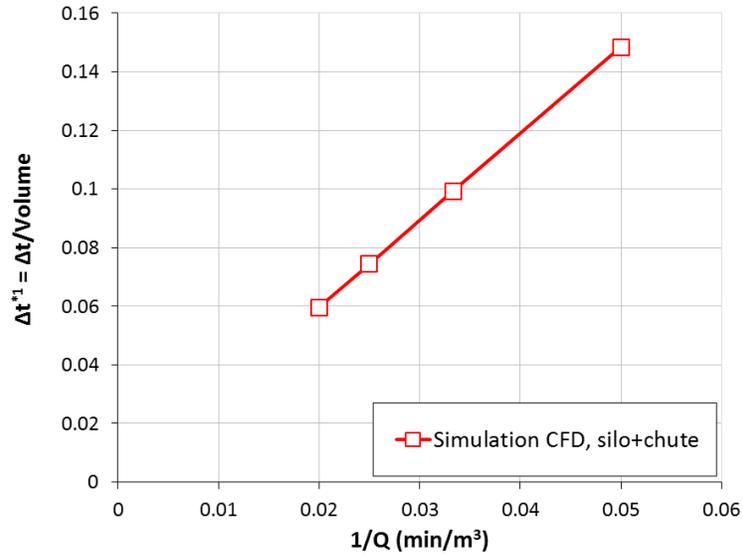


Figure 10 : Temps de ventilation normalisé en fonction du débit de soufflage.

4.3.3 Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale d'oxygène

La troisième étape consiste à déterminer Δt en fonction de la concentration initiale d'oxygène, ci_{O_2} . Quatre ci_{O_2} ont été considérées, soit $ci_{O_2} = 20, 15, 10$ et 0% pour un débit $Q = 30 \text{ m}^3/\text{min}$, $ci_{CO_2} = 25\%$ et un volume total $V = 743 \text{ m}^3$ (volume correspondant à un grand silo rempli à 30%). Les Δt nécessaires pour obtenir la concentration ciblée d' O_2 en fonction de la concentration initiale d'oxygène sont présentés à la figure 11.

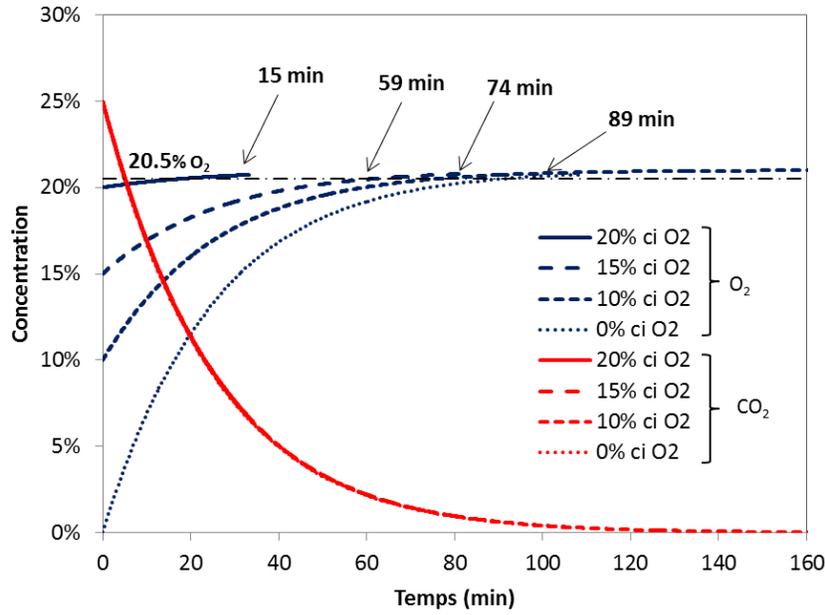


Figure 11 : Courbes temporelles des concentrations d’O₂ et de CO₂, pendant la ventilation, pour 4 concentrations initiales d’O₂.

Il avait déjà été vérifié que Δt suit une courbe exponentielle décroissante en fonction de ci_{O_2} (Bahloul *et al.* 2010). Par conséquent, il est possible de confirmer que Δt est linéairement proportionnel à une fonction logarithmique de ci_{O_2} . Suivant la même procédure qu’à la section précédente et afin d’éliminer l’effet du débit de soufflage (en plus du volume total) sur le temps de ventilation, un nouveau temps normalisé, Δt^{*2} , est introduit et défini comme suit :

$$\Delta t^{*2} = \Delta t^{*1} Q = \frac{\Delta t}{V} Q \tag{3}$$

La Figure 12 montre que le temps normalisé, Δt^{*2} , est linéairement proportionnel au $\ln(21\% O_2 - (ci_{O_2})/100)$, où $21\% O_2 = 0,21$.

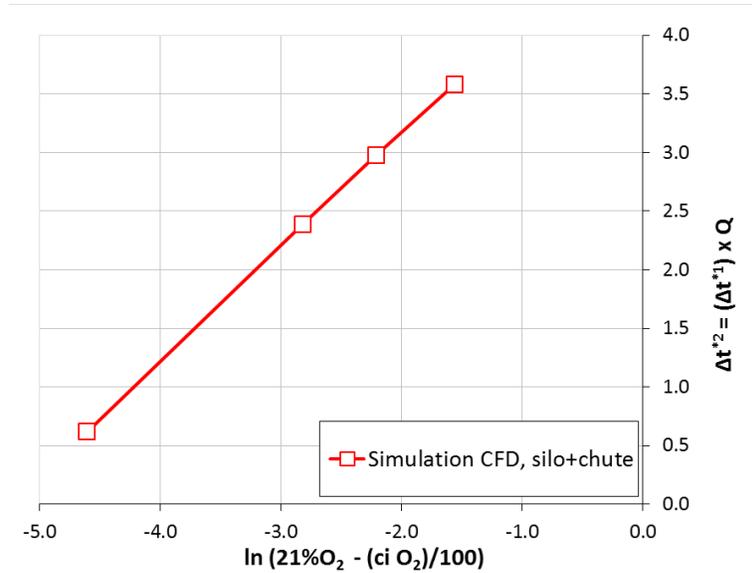


Figure 12 : Temps de ventilation normalisé en fonction de la concentration initiale d'O₂.

4.3.4 Temps de ventilation en fonction de la concentration initiale de dioxyde de carbone

Finalement, pour déterminer l'équation mathématique qui tient compte de la concentration initiale de dioxyde de carbone, ci_{CO_2} , le temps de ventilation est défini pour quatre ci_{CO_2} , soient 40, 30, 25, 15% avec $Q = 30 \text{ m}^3/\text{min}$, $ci_{O_2} = 10\%$ et $V = 743 \text{ m}^3$. Les Δt nécessaires pour obtenir la concentration ciblée d'O₂ en fonction de la concentration initiale de dioxyde de carbone sont présentés à la figure 13.

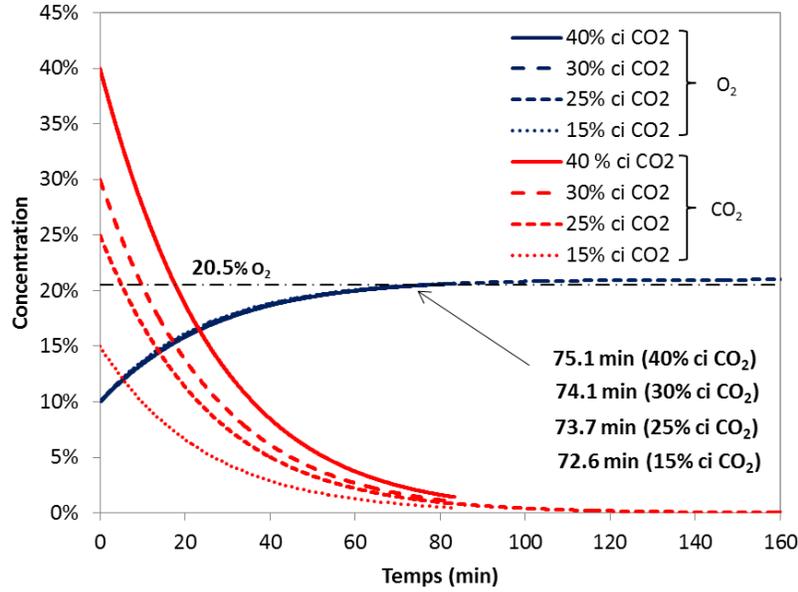


Figure 13 : Courbes temporelles des concentrations d'O₂ et de CO₂, pendant la ventilation, pour 4 concentrations initiales de CO₂.

Dans ce cas, la dépendance linéaire de Δt en fonction de ci_CO_2 avait déjà été démontrée (Bahloul *et al.* 2010). Pour éliminer l'effet de ci_O_2 (en plus du volume total et du débit de soufflage), un nouveau temps normalisé, Δt^{*3} , est introduit et défini comme suit :

$$\Delta t^{*3} = \Delta t^{*2} - \left[\ln \left(21\%O_2 - \frac{ci_O_2}{100} \right) \right] \quad (4)$$

Dans la première étude, il a été prouvé que de tracer Δt^{*3} en fonction de ci_CO_2 permet d'obtenir un temps de ventilation indépendant de toutes les variables précédentes soit le volume total, le débit de soufflage et la concentration d'oxygène. La figure 14 montre que le temps normalisé Δt^{*3} est linéairement proportionnel à ci_CO_2 . En conséquence, le temps normalisé peut être défini comme suit :

$$\Delta t^{*3} = \frac{\Delta t}{V} Q - \left[\ln \left(21\%O_2 - \frac{ci_O_2}{100} \right) \right] = 0,3955 \frac{ci_CO_2}{100} + 5,081 \quad (5)$$

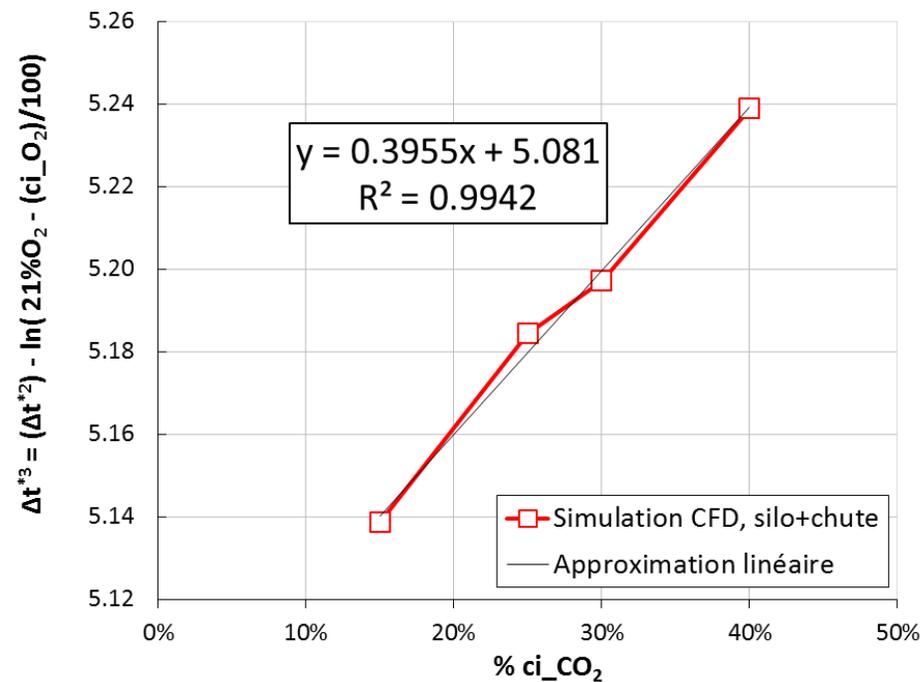


Figure 14 : Temps de ventilation normalisé en fonction de la concentration initiale de CO₂.

Alors, l'équation finale en termes de temps de ventilation est définie comme suit:

$$\Delta t = \frac{V}{Q} \left[\ln \left(21\%O_2 - \frac{ci_{O_2}}{100} \right) + 0,3955 \frac{ci_{CO_2}}{100} + 5,081 \right] \quad (6)$$

où V représente le volume total à ventiler (espace libre dans le silo et volume de la chute), Q représente le débit de soufflage, 21% O₂ est la concentration d'O₂ dans l'environnement exprimée en fraction (0.21) et ci_O₂ et ci_CO₂ sont les concentrations initiales d'O₂ et de CO₂ respectivement.

Il faut noter que l'équation (6) présente une légère différence dans sa formulation par rapport à celle précédemment publiée, où l'équation pour le temps de ventilation tenait seulement compte de l'espace libre au-dessus du fourrage, le volume de la chute n'étant pas inclus (les portes communicantes entre le silo et la chute étaient alors considérées fermées). Maintenant, l'équation (6) tient compte du volume total, c'est-à-dire l'espace libre au-dessus du fourrage, dans le silo et la chute. La section suivante présente une comparaison détaillée des deux équations.

5. DISCUSSION

5.1 Comparaison des équations avec et sans chute

Comme déjà mentionné, il existe une différence entre l'équation provenant du rapport précédent, traitant du temps de ventilation d'un silo sans tenir compte de la chute (Bahloul *et al.* 2010) et l'équation de la présente étude, alors que la chute est considérée.

Équation de ventilation pour le silo seulement :

$$\Delta t = \frac{\pi H D^2}{4Q} \left[\ln \left(21\% O_2 - \frac{ci_{O_2}}{100} \right) + 0,854 \frac{ci_{CO_2}}{100} + 5,014 \right] \quad (7)$$

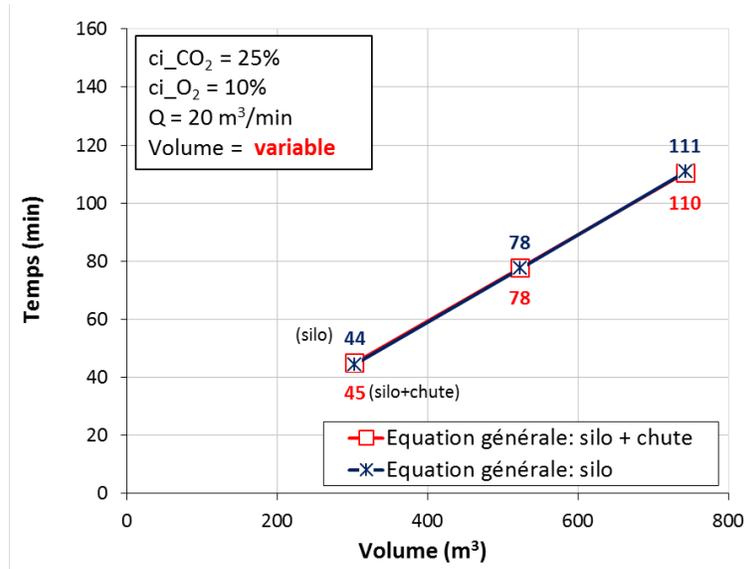
- Δt : Temps de ventilation, [min]
- D : Diamètre du silo, [m]
- H : Hauteur de l'espace libre du silo, [m]
- Q : Débit de l'air de soufflage, [m³/min]
- ci_{O_2} : Concentration O₂ initiale, [%]
- ci_{CO_2} : Concentration CO₂ initiale, [%]

Équation de ventilation pour le silo et la chute :

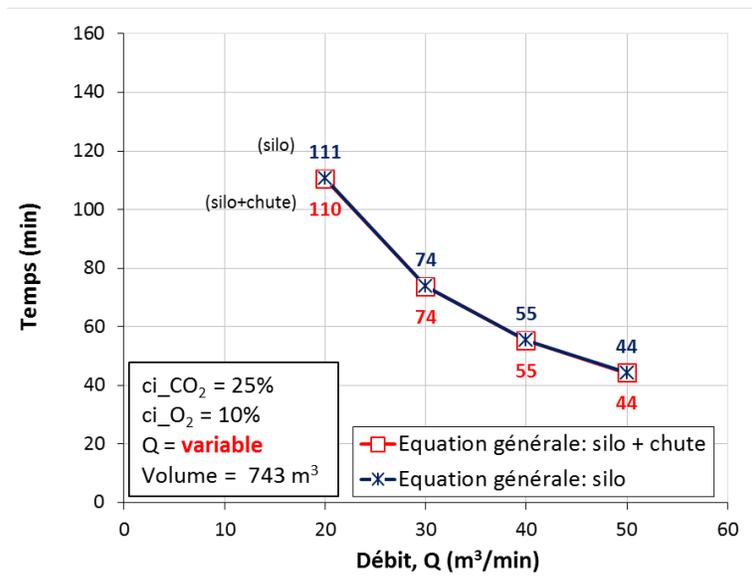
$$\Delta t = \frac{\pi}{4Q} (H_{silo\ air} \cdot D_{silo}^2 + H_{chute} \cdot D_{chute}^2) \left[\ln \left(21\% O_2 - \frac{ci_{O_2}}{100} \right) + 0,395 \frac{ci_{CO_2}}{100} + 5,081 \right] \quad (8)$$

- Δt : Temps de ventilation, [min]
- Q : Débit de l'air de soufflage, [m³/min]
- $H_{silo\ air}$: Hauteur de la colonne d'air du silo, [m]
- H_{chute} : Hauteur de la chute, [m]
- D_{silo} et D_{chute} : Diamètre du silo et de la chute, respectivement, [m]
- ci_{O_2} : Concentration O₂ initiale, [%]
- ci_{CO_2} : Concentration CO₂ initiale, [%]

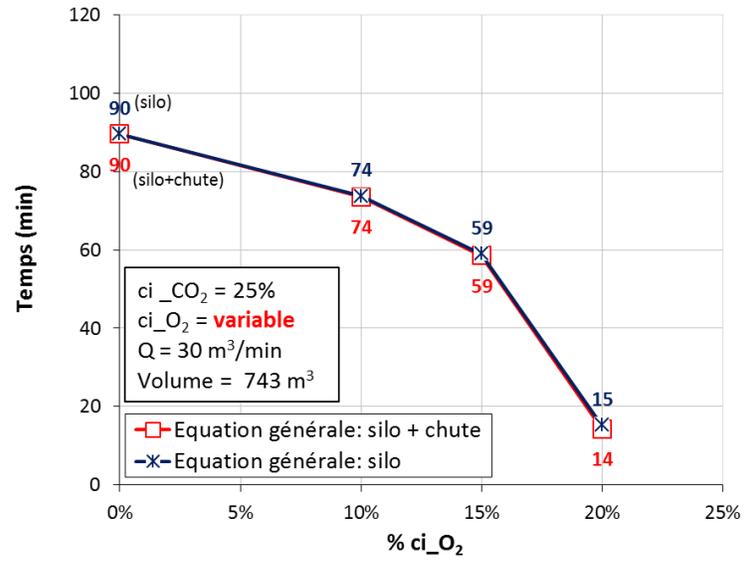
La Figure 15 illustre une comparaison entre les deux équations en termes de temps de ventilation en fonction du volume total (a), du débit de soufflage (b), de la concentration initiale d'O₂ (c) et de la concentration initiale de CO₂ (d).



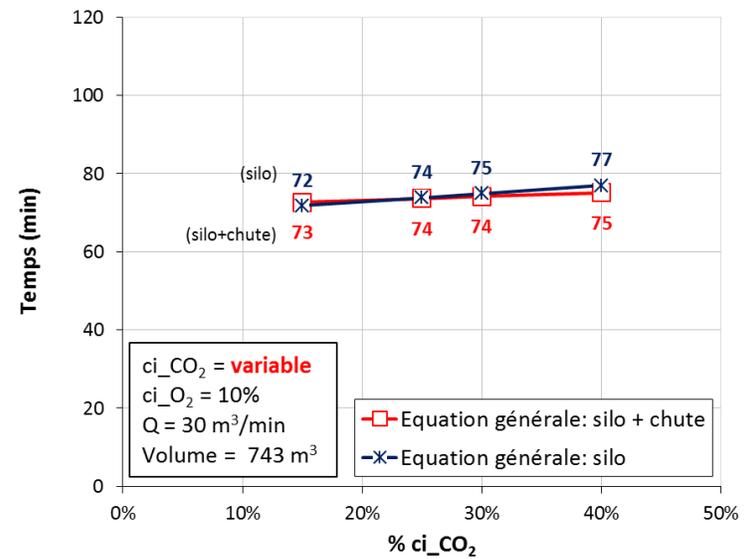
a) Comparaison des équations en fonction du volume à ventiler.



b) Comparaison des équations en fonction du débit de soufflage.



c) Comparaison des équations en fonction de la concentration initiale d'O₂.



d) Comparaison des équations en fonction de la concentration initiale de CO₂.

Figure 15 : Comparaisons des temps de ventilation selon les équations tenant compte ou non de la chute.

Cette étude comparative montre que les deux équations ont une variation minimale. Il est donc possible de conclure que le volume d'air dans la chute est négligeable pour le calcul du temps de ventilation. L'équation (8) étant plus proche de la réalité, elle est donc adoptée pour la suite de l'étude. Dorénavant, elle s'appelle « modèle mathématique général ».

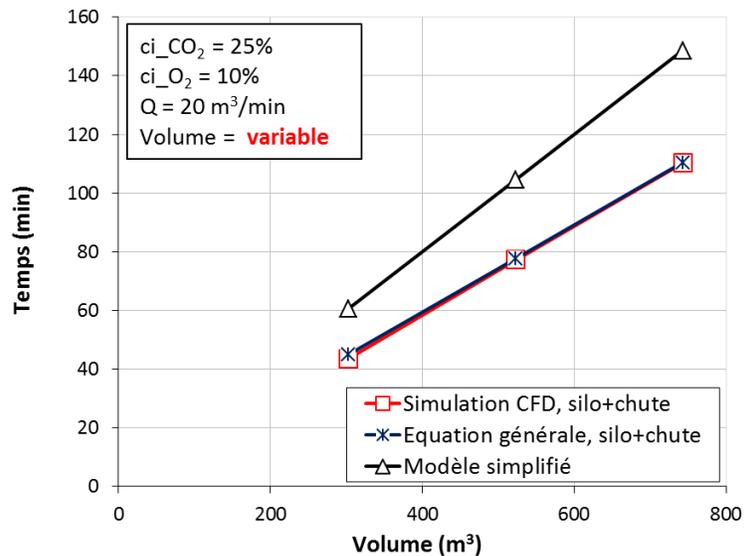
5.2 Modèle simplifié pour le calcul du temps de ventilation

Considérant une situation extrême avec un espace libre dans le silo et une chute remplie de dioxyde de carbone et sans oxygène, le modèle mathématique général (équation 8) peut être réduit à :

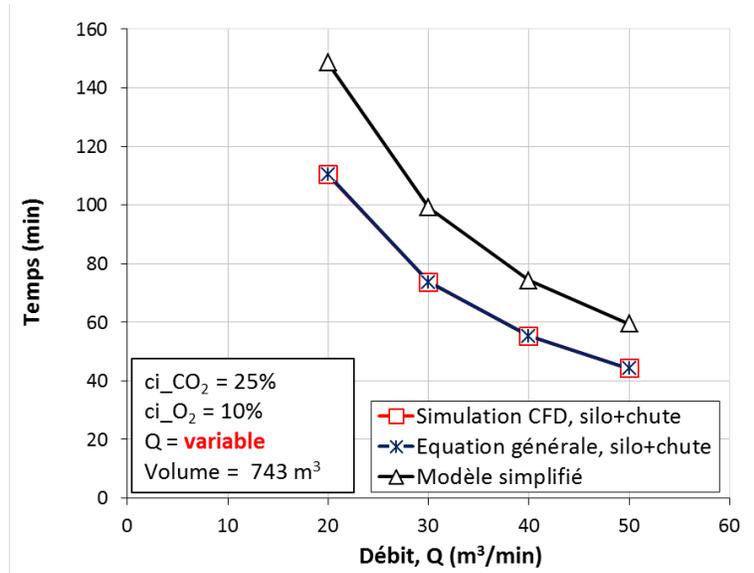
$$\Delta t = 4/\tau \quad (9)$$

où $\tau = Q/V =$ taux de changement d'air de ventilation

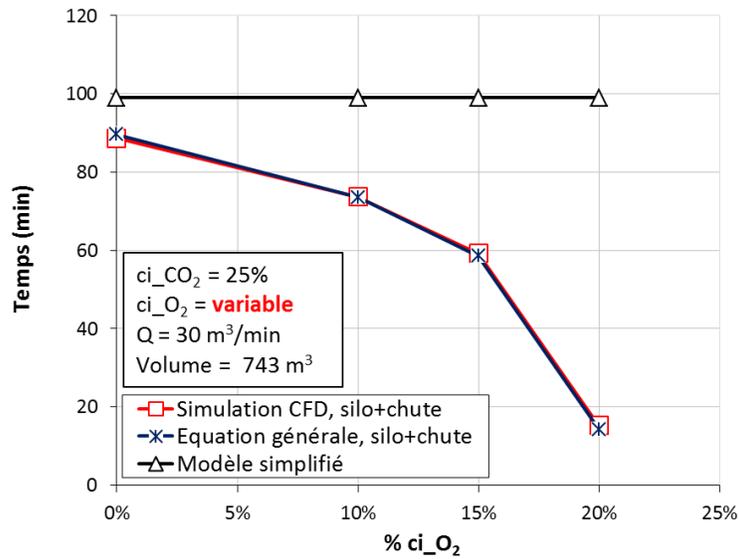
Ce modèle mathématique simple, nommé modèle simplifié, est identique à celui obtenu sans considérer la chute (Bahloul *et al.* 2010). Il permet d'obtenir le temps de ventilation à respecter pour l'obtention d'un environnement interne sécuritaire dans le silo et la chute. Bien sûr, le travailleur doit maintenir la ventilation en opération durant son intervention dans le silo. Les graphiques de la Figure 16 illustrent le comportement du modèle simplifié pour les différentes configurations déjà étudiées. Le modèle simplifié est comparé avec l'équation générale de la section précédente et avec les résultats des simulations numériques. Dans tous les cas, le modèle simplifié permet la détermination d'un temps de ventilation suffisant pour assurer une bonne qualité de l'air interne du silo.



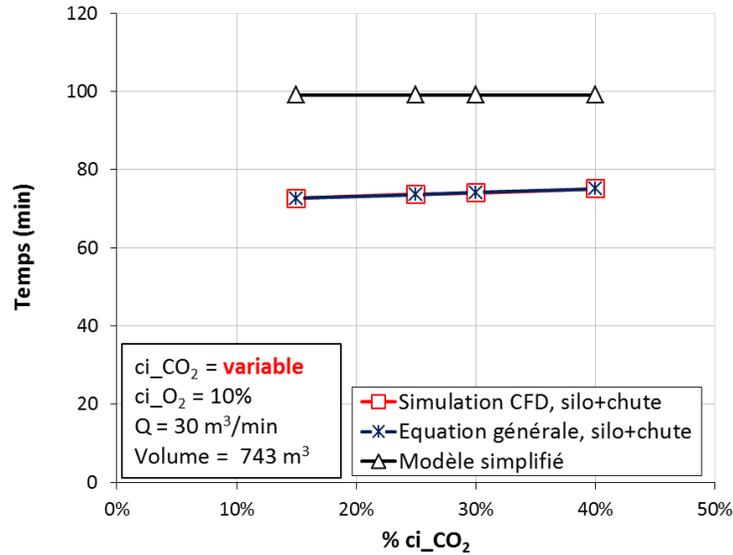
- a) Temps de ventilation estimé, en fonction du volume à ventiler.



b) Temps de ventilation estimé, en fonction du débit de soufflage



c) Temps de ventilation estimé, en fonction de la concentration initiale d' O_2 .



d) Temps de ventilation estimé, en fonction de la concentration initiale de CO₂.

Figure 16 : Comparaison des temps de ventilation obtenus à partir de la simulation CFD, de l'équation générale et du modèle simplifié, en considérant le silo et la chute.

5.3 Ventilation dans le silo et la chute avec seulement une première porte ouverte

La présente section expose les résultats des simulations numériques réalisées sur trois silos nommés PETIT, MOYEN et GRAND dans lesquels le niveau de fourrage se trouve presque au maximum. Les dimensions exactes de ces trois silos proviennent des catalogues des silos commerciaux disponibles sur l'internet (Annexe 1). Le tableau 1 fournit les dimensions et les volumes des silos qui ont été retenus pour la présente étude.

Tableau 1 : Dimension des silos et volumes à ventiler.

Silo	PETIT	MOYEN	GRAND
Hauteur silo et chute, H (m)	19,8	21,3	24,4
Diamètre silo, D (m)	3,66	5,48	7,3
Espace libre à ventiler : Silo (m ³)	18,9	42,5	73,3
Chute (m ³)	8,1	8,7	10,2
Total (m ³)	27,0	51,2	83,5
Ratio V_{chute}/V_{silo} :	0,43	0,21	0,14

Dans les trois cas, l'espace d'air libre au-dessus du niveau de fourrage est de 1,8 m et seule la première porte entre le silo et la chute est ouverte. Cette configuration est considérée extrême puisque le ratio en volume entre l'air à ventiler dans la chute et l'air à ventiler dans le silo tend vers l'unité, spécialement pour le petit silo. La Figure 17 montre un schéma des silos et un aperçu du domaine simulé.

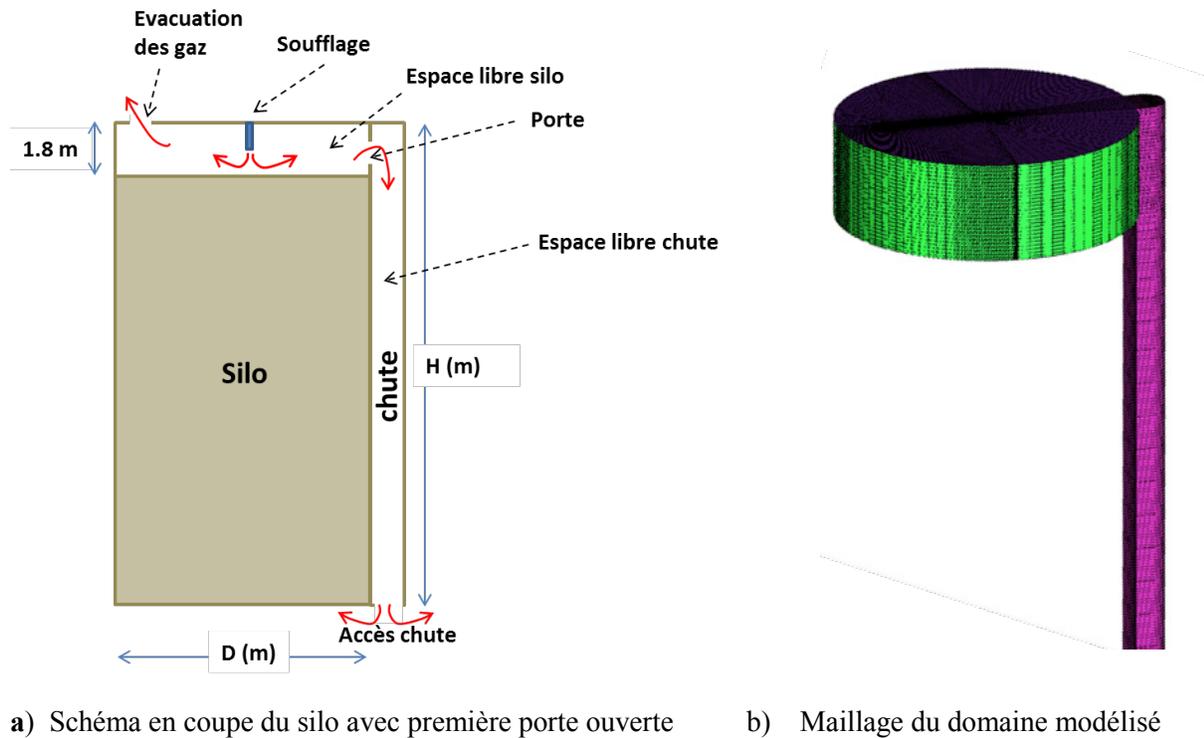


Figure 17 : Schéma de silo avec une porte ouverte.

La Figure 18 montre les temps de ventilation nécessaires pour la chute et le silo séparément. Il est clair que lorsque le ratio des volumes entre la chute et le silo est élevé (0,43 pour le cas du petit silo), plus de temps est nécessaire pour ventiler la chute. Un écart de 0,25 minutes dans la chute est observé, ce qui représente 8,8% de temps de plus pour que la chute soit sécuritaire. Ce pourcentage diminue à 4,3% et à 4,0% pour les silos moyen et grand respectivement. Cependant, le modèle simplifié est toujours plus conservateur que l'équation générale et les simulations numériques (Figure 19).

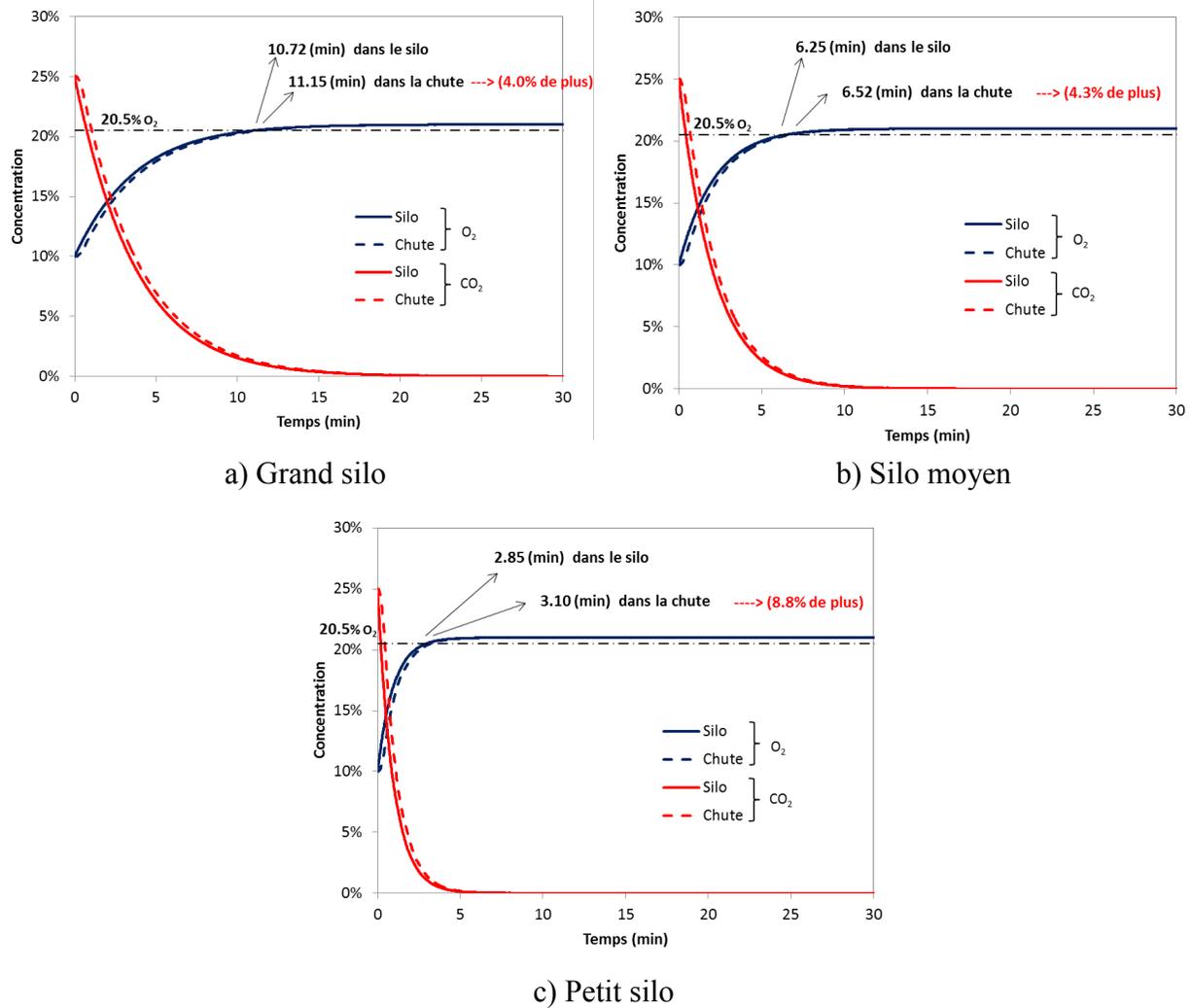


Figure 18 : Courbes temporelles des concentrations d'O₂ et de CO₂, pendant la ventilation de trois silos de grandeurs différentes, avec une seule porte ouverte.

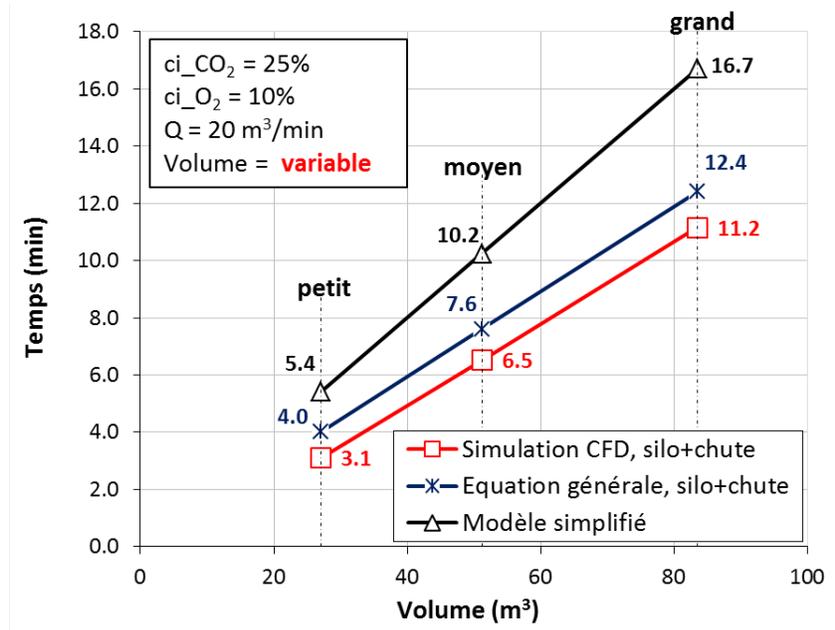


Figure 19 : Comparaison des temps de ventilation pour trois grandeurs de silos ayant une porte ouverte, obtenus par simulation CFD, par l'équation générale et par l'équation du modèle simplifié.

6. CONCLUSION

Cette étude complète celle portant sur le calcul du temps de ventilation nécessaire pour l'obtention d'un environnement interne sécuritaire dans un silo, en examinant une situation où il y a un échange d'air entre le silo et la chute. Le rapport précédent (Bahloul *et al.* 2010) tenait compte uniquement de l'espace d'air dans le silo, en supposant que toutes les portes communicantes entre le silo et la chute étaient fermées. La présente étude inclut l'air à l'intérieur de la chute, les portes demeurant ouvertes au fur à mesure que le niveau de fourrage diminue.

Un nouveau modèle, plus général, tenant compte du volume total de l'espace à ventiler (silo plus chute), a donc été obtenu. Ce modèle amélioré a été comparé avec le précédent et les résultats ont permis de démontrer que le temps de ventilation estimé en considérant la chute ne diffère que légèrement par rapport au modèle où la chute n'est pas considérée. Il est donc suggéré d'utiliser la nouvelle formulation puisqu'elle représente mieux la réalité.

Le modèle simplifié développé dans le rapport précédent a également été comparé avec le modèle courant. Cette comparaison indique que le modèle simplifié est toujours valable étant donné qu'il permet en tout temps d'obtenir un environnement sécuritaire dans le silo et la chute. En effet, l'évaluation d'un cas extrême, c'est-à-dire lorsque le silo est presque complètement rempli avec seulement la porte supérieure ouverte, a permis de constater que l'équation simplifiée est malgré tout sécuritaire puisqu'elle surestime faiblement le temps de dilution des gaz.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bahloul A., Roberge B., Goyer N., Chavez M. et Reggio M. (2010). La prévention des intoxications dans les silos à fourrage. Études et recherches / Rapport R-672, Montréal, IRSST, 67 pages, En ligne: <http://www.irsst.qc.ca/-publication-irsst-prevention-des-intoxications-silos-fourrage-r-672.html>. [Dernière consultation : septembre 2012].
- Bahloul A., Roberge B., et Gravel R. (2008). Faisabilité de l'étude sur les gaz de fermentation et sur la ventilation en silo à échelle réduite. Études et recherches / Rapport R-553, Montréal, IRSST, 35 pages, En ligne: <http://www.irsst.qc.ca/-publication-irsst-faisabilite-de-l-etude-sur-les-gaz-de-fermentation-et-sur-la-ventilation-en-silo-a-echelle-reduite-r-553.html>. [Dernière consultation : septembre 2012].
- Bahloul A., Gravel R., Roberge B., Goyer N., Chavez M. et Reggio M. (2009). Modélisation du temps de ventilation par soufflage dans les silos tours à fourrage. Travail et santé, 25(3):S18-S21.
- Bahloul A., Chavez M., Reggio M., Roberge B., et Goyer N. (2012). Modeling ventilation time in forage tower silos. Journal of Agricultural Safety and Health, 18(4):259-272.
- Barber E. M. et Zulak M. J. (1984). Effectiveness of silage blowers for clearing gases from tower silos. Dept. of Agricultural Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 93 pages.
- Groves J. A. et Ellwood P. A. (1989). Gases in forage tower silos, Ann. Occup. Hyg. 33(4):519-535.
- Gouvernement du Québec (2007). Règlement sur la santé et la sécurité du travail. Gazette officielle du Québec, S-2.1, r.19.01.
- Jiang S., Barber E.M., Meiring A.G. et Jofriet J.C. (1990). Toxic gas production and silo ventilation. Canadian Agricultural Engineering. p. 151.
- Meiring A. G., Courtin M.G., Spoelstra S. F., Pahlow G., Honig H., Subden R. E. et Zimmer E. (1988). Fermentation kinetics and toxic gas production of silage. Tran. Am. Soc. Agric. Eng., 31(2):613-621.
- NIOSH (2008). Farmer asphyxiated due to lack of oxygen after entering an oxygen limiting silo 3 days after filling. En ligne: <http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html>. [Dernière consultation : septembre 2012].
- Paragon B. M. (2004). Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires. Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa), pp. 1-118. En ligne : <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/054000085/0000.pdf>. [Dernière consultation : janvier 2014].
- SBAC (2011). Accidents mortels liés au milieu agricole au Canada de 1990 à 2008. Programme de Surveillance des blessures dans le secteur agricole au Canada, 59 pages. En ligne : http://www.cair-sbac.ca/wp-content/uploads/2012/03/12-0814_National-Report-1990-2008-FULL-REPORT-FINAL-fr.pdf [Dernière consultation : mars 2014].

ANNEXE 1: CATALOGUE DE SILOS CONVENTIONNELS COMMERCIAUX

Caractéristiques des silos PETIT-MOYEN-GRAND utilisés dans l'analyse du chapitre 4.



L'expertise à votre service

4250, rue Vachon, Drummondville, Qc J2B 6V4
 Tél. : (819) 474-6989 Téléc.: (819) 474-6990
 Courriel : info@silojmlambert.com
 Site internet : www.silojmlambert.com

GRANDEUR SILO		50 BALLES/TONNE		GRANDEUR SILO		50 BALLES/TONNE	
14' X 50'		3,400		20' X 60'		9,000	
16' x 50'		4,500		20' x 70'		11,400	
16' x 60'		5,800		20' x 80'		13,700	
16' x 70'		7,000		24' x 60'		13,100	
18' x 50'		5,600		24' x 70'		16,400	
18' x 60'		7,400		24' x 80'		19,600	
18' x 70'		9,200					
GRANDEUR SILO	SILO PI.CU.	MATIÈRE SÈCHE TONNAGE		60% MAÏS/FOIN ENSILÉ	50% FOIN ENSILÉ	32% MAÏS/GRAIN HUMIDE * BOISSEAUX TONNAGE	32% MAÏS/EPI HUMIDE BOISSEAUX TONNAGE
		TONNAGE	TONNAGE	TONNAGE	TONNAGE	TONNAGE	TONNAGE
12' X 30'	3,390	21	70	52	42	2,511 78	1,449 69
12' X 40'	4,520	32	106	80	64	3,348 105	1,932 91
12' X 50'	5,650	44	147	110	88	4,185 131	2,415 114
12' X 55'	—	—	—	—	—	4,604 144	2,657 126
12' X 60'	—	—	—	—	—	5,023 157	2,899 138
12' X 65'	—	—	—	—	—	5,442 170	3,141 150
14' X 30'	4,620	29	96	72	58	3,422 107	1,974 93
14' X 40'	6,160	44	145	110	88	4,562 143	2,632 124
14' X 50'	7,700	60	200	150	120	5,703 178	3,291 156
14' X 60'	9,240	78	260	195	156	6,844 214	3,949 187
14' X 65'	10,010	86	288	216	172	7,415 232	4,278 203
14' X 70'	10,780	94	316	237	188	7,986 250	4,607 219
16' X 30'	6,030	38	125	95	76	4,466 140	2,577 122
16' X 40'	8,040	57	189	142	114	5,955 186	3,436 163
16' X 50'	10,050	78	261	195	156	7,444 232	4,295 203
16' X 55'	11,055	90	301	225	180	8,189 256	4,725 224
16' X 60'	12,060	102	341	255	204	8,933 279	5,154 244
16' X 65'	13,065	113	377	282	225	9,678 302	5,584 264
16' X 70'	14,070	124	413	309	246	10,423 325	6,014 284
18' X 40'	10,160	72	239	180	144	7,525 235	4,342 205
18' X 50'	12,700	99	330	247	198	9,407 294	5,427 257
18' X 55'	13,970	114	380	285	228	10,347 323	5,870 283
18' X 60'	15,240	129	430	322	258	11,288 353	6,513 308
18' X 65'	16,510	146	485	364	292	12,229 383	7,050 334
18' X 70'	17,780	162	539	405	324	13,170 412	7,598 359
20' X 40'	12,560	89	295	222	178	9,303 291	5,367 254
20' X 50'	15,700	122	407	305	244	11,629 363	6,709 317
20' X 60'	18,840	159	529	397	318	13,955 436	8,051 381
20' X 65'	17,270	179	599	447	357	15,105 473	8,722 413
20' X 70'	21,980	198	660	495	396	16,280 509	9,393 444
20' X 75'	23,550	217	721	543	435	17,455 545	10,064 475
20' X 80'	25,120	236	782	591	474	18,630 581	10,735 506
24' X 50'	22,600	175	583	437	350	16,740 523	9,658 457
24' X 60'	27,120	228	760	570	456	20,088 628	11,590 548
24' X 65'	29,380	256	854	640	512	21,718 680	12,556 594
24' X 70'	31,640	284	947	710	568	23,347 732	13,521 640
24' X 75'	33,900	312	1,040	780	624	24,976 784	14,486 686
24' X 80'	36,160	341	1,136	852	682	26,785 837	15,453 731
						PAR BOISSEAU	
						62,5 lb	94,6 lb
						1,35 pi.cu.	2,34 pi.cu.

* (Capacité illustrées sur cette charte sont les données disponibles présentement; cependant, des variations peuvent être enregistrées en pratique par rapport aux divers types de fermes.)

Silo petit :
3.66m x 19.8m

Silo moyen :
5.48m x 21.3m

Silo grand :
7.3m x 24.4m