

É

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-672



La prévention des intoxications dans les silos à fourrage (version révisée)

*Ali Bahloul
Brigitte Roberge
Nicole Goyer
Mauricio Chavez
Marcelo Reggio*



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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2011
ISBN : 978-2-89631-538-3 (version imprimée)
ISBN : 978-2-89631-539-0 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
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,
février 2011



Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-672

La prévention des intoxications dans les silos à fourrage (version révisée)

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,
Service de la recherche, IRSST*

*Brigitte Roberge,
Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST*

*Nicole Goyer,
Service valorisation de la recherche
et relations avec les partenaires, IRSST*

*Mauricio Chavez et Marcelo Reggio,
Département de génie mécanique, École polytechnique de Montréal*

*Avec la collaboration de Rodrigue Gravel, Bernard Caron,
Yves Beaudet et Pierre Drouin, IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les propriétaires de la ferme laitière en Montérégie où les essais ont été effectués, les techniciens dont l'expertise a rendu possible cette étude, messieurs Rodrigue Gravel, Yves Beudet, Bernard Caron, Pierre Drouin et Renaud Daigle ainsi que Daniel Drolet, chimiste, pour la conception de la banque de données.

SOMMAIRE

Les silos utilisés en milieu agricole sont réputés être des espaces clos selon le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST). Les espaces clos tels que les silos à tour conventionnelle comportent de multiples risques. Ceux-ci sont liés en partie à une atmosphère trop pauvre en oxygène (O_2) remplacé par le dioxyde de carbone (CO_2), à une présence de substances toxiques dont le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2), à des microorganismes ou encore, à une présence de matières combustibles.

Cette étude porte sur la documentation des gaz de fermentation du fourrage et sur la ventilation mécanique par soufflage des silos verticaux utilisés pour l'ensilage de ces fourrages.

Bien que le producteur où l'étude s'est déroulée prélève de l'ensilage au cours de la période de fermentation, estimée à 21 jours par des agronomes, les résultats obtenus confirment les études traitant de la fermentation du fourrage en silos verticaux. Les concentrations des gaz dans l'espace libre au-dessus du fourrage (jusqu'à 2,7 % de CO_2 , 29 ppm de NO_2 et près de 70 ppm de NO) et l'écart des températures mesurées (plus de 3 C) mettent en évidence la présence de la fermentation pour certains ensilages. De plus, le phénomène de migration des gaz par la chute du silo a également été confirmé.

Ces résultats viennent démontrer la nécessité de ventiler avant et pendant l'exécution des travaux dans un espace classifié « *espace clos* », tel qu'exigé par le RSST.

L'étude de la ventilation mécanique en utilisant un silo à échelle réduite conçu en laboratoire a permis la validation expérimentale des calculs de simulations numériques. L'étude paramétrique a conduit à l'établissement d'un modèle mathématique simple pour déterminer le temps de soufflage d'air nécessaire pour atteindre un environnement sécuritaire dans le silo en fonction du débit d'air et du volume du silo.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. PROBLÉMATIQUE ET ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1 Gaz de fermentation	3
2.2 Ventilation	7
3. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	12
4. MÉTHODES DE LA RECHERCHE	13
4.1 Description des silos et des fourrages.....	13
4.2 Documentation des gaz de fermentation.....	14
4.3 Ventilation	18
4.3.1 Méthode numérique	18
4.3.2 Méthode expérimentale.....	20
4.3.3 Modélisation du temps de ventilation	21
5. RÉSULTATS.....	23
5.1 Documentation des fourrages	23
5.2 Documentation des gaz de fermentation.....	25
5.2.1 Mesures dans les silos.....	25
5.2.2 Mesures dans la salle d'alimentation	27
5.2.3 Validation des mesures	30
5.3 Ventilation	31
5.3.1 Comparaison des données expérimentales et numériques	31
5.3.2 Étude paramétrique	32
5.3.3 Validation du modèle mathématique	35
5.3.4 Effet d'une émission constante de CO ₂ sur le temps de ventilation	35
5.3.5 Effet de la surface d'ensilage sur le temps de ventilation.....	37
5.4 Instruments de mesure des gaz.....	40
6. DISCUSSION.....	43
6.1 Documentation des fourrages	43

6.2	Documentation des gaz de fermentation.....	43
6.2.1	Mesures dans les silos.....	43
6.2.2	Mesures dans la salle d'alimentation	43
6.2.3	Validation des mesures	44
6.3	Ventilation	44
6.4	Instruments de mesure des gaz.....	46
7.	CONCLUSION.....	47
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Valeurs d'exposition admissibles de l'annexe I du RSST	3
Tableau 2-2 : Effets sur la santé d'une exposition au dioxyde de carbone.....	3
Tableau 2-3 : Effets reliés à la concentration d'oxygène dans l'air.....	4
Tableau 2-4 : Effets sur la santé d'une exposition au dioxyde d'azote	4
Tableau 2-5 : Concentrations des gaz d'ensilage rapportées dans la littérature	6
Tableau 2-6 : Temps minimum en minutes pour la ventilation de l'espace libre des silos verticaux.....	11
Tableau 4-1 : Instruments de mesure des gaz de fermentation dans les silos.....	14
Tableau 4-2 : Instruments de mesure des gaz de fermentation dans la salle d'alimentation	18
Tableau 5-1 : Description de données relatives aux fourrages et écart de température.....	23
Tableau 5-2 : Moyenne et écart des températures intérieures et extérieures en fonction des jours de fermentation	25
Tableau 5-3 : Concentrations mesurées dans l'espace libre (à $\pm 0,6$ m du fourrage) dans les silos entre les ensilages	26
Tableau 5-4 : Concentrations des gaz dans la salle d'alimentation	28
Tableau 5-5 : Concentrations des gaz dans la salle d'alimentation près de la chute	29
Tableau 5-6 : Concentrations du bruit de fond dans la salle d'alimentation et l'étable.....	30
Tableau 5-7 : Concentration mesurée des gaz dans l'espace libre du silo #1.....	30
Tableau 5-8 : Calculs des temps de ventilation	35
Tableau 6-1 : Temps de ventilation pour différentes grandeurs de silo et pour un débit de soufflage de 20 m ³ /min	45

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Évolution de la concentration du dioxyde d'azote NO_2 dans un silo avec la ventilation naturelle en opération.....	7
Figure 2-2: Évolution de la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans un silo avec la ventilation naturelle en opération.....	8
Figure 2-3 : Ventilation mécanique par soufflage	9
Figure 2-4 : Évolution de la concentration du dioxyde d'azote (NO_2) dans un silo avec la ventilation mécanique par soufflage en opération	9
Figure 2-5 : Évolution de la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans un silo avec la ventilation mécanique par soufflage en opération	10
Figure 4-1: Silo #1 en béton.....	14
Figure 4-2 : Sonde de prélèvement des gaz	15
Figure 4-3 : Boîte protectrice positionnée en haut du silo #1	15
Figure 4-4 : Instruments de mesure, systèmes d'aspiration et de contrôle	16
Figure 4-5 : Sondes de température de l'air au-dessus du fourrage.....	16
Figure 4-6 : Équipement de levage	17
Figure 4-7 : Mesure des gaz dans la salle d'alimentation.....	17
Figure 4-8 : Modèle numérique d'un silo de 10 m de hauteur et 6 m de diamètre.....	19
Figure 4-9 : Silo à échelle réduite $H = 0,645$ m et $D = 0,6$ m.....	20
Figure 5-1 : Moyennes quotidiennes des températures dans le silo #1 pour les premiers ensilages de la saison 2008.....	24
Figure 5-2 : Moyennes quotidiennes des températures dans les silos pour les derniers ensilages de la saison 2008.....	24
Figure 5-3 : Concentrations de gaz au-dessus de l'ensilage du silo # 1	27
Figure 5-4 : Comparaison des temps de ventilation théoriques et expérimentaux	31
Figure 5-5 : Variation du temps en fonction du volume avec $\text{CiCO}_2 = 30\%$, $\text{CiO}_2 = 0\%$ et débit=20 L/min	32
Figure 5-6 : Variation du temps en fonction du débit avec volume = 282,7 L $\text{CiCO}_2 = 30\%$ et $\text{CiO}_2 = 0\%$	32
Figure 5-7 : Variation du temps en fonction de CiO_2 avec volume = 282,7 L,	33
Figure 5-8 : Variation du temps en fonction de CiCO_2 avec volume = 282,7 L,	34
Figure 5-9: Variation du temps de dilution en fonction des taux d'injection et des débits de soufflage pour $V = 282,7$ L, $\text{CiCO}_2 = 30\%$ et $\text{CiO}_2 = 10\%$	36
Figure 5-10 : Temps de dilution en fonction des taux d'injection de CO_2	37

Figure 5-11: Différentes configurations de surface de fourrage avec volume d'espace libre constant égal à 282,7 L	38
Figure 5-12 : Temps de dilution pour différentes configurations de surface de fourrage	38
Figure 5-13 : Évolution de la dilution pour différentes configurations de silo.....	39

1. INTRODUCTION

Une demande conjointe de la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) et de l'Union des producteurs agricoles (UPA) concernant la documentation des gaz de fermentation produits lors de l'ensilage du fourrage et des débits de ventilation nécessaires à leur dilution dans les silos verticaux ou silos à tour conventionnelle a été faite à l'IRSSST. Leur demande concernait également les limites et les contraintes d'utilisation d'instruments de détection des gaz dans le cadre d'une procédure d'entrée en espace clos.

Une première étude a été faite en laboratoire à l'IRSSST dans un silo à échelle réduite. Les résultats ont été publiés¹. Les principales conclusions sont qu'il y a pendant la fermentation, production de dioxyde de carbone (CO₂) et diminution d'oxygène (O₂) sous la concentration de 19,5 % tel que rapporté dans la littérature.

Une étude a par la suite été menée en situation réelle. Les mesures des gaz ont été effectuées au cours de l'été et de l'automne 2008. Cependant, la méthodologie suggérée dans le devis de recherche a dû être adaptée aux façons de faire du producteur. En effet, celui-ci effectue la reprise du fourrage le même jour qu'il ensile et chaque jour par la suite, sans tenir compte de la période critique de fermentation du fourrage.

Pour sa part, l'étude de ventilation a été faite par modélisation et validée par les essais en laboratoire dans le silo à échelle réduite et a permis de répondre au deuxième objectif de la demande initiale concernant notamment le temps de ventilation.

L'expertise des auteurs a permis de répondre directement à la troisième demande concernant l'utilisation des instruments à lecture directe pour les gaz.

¹ www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSSST//R-553.pdf

2. PROBLÉMATIQUE ET ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Gaz de fermentation

Nos campagnes dissimulent des dangers et des risques pour la santé et la sécurité. Pensons aux silos verticaux à fourrage ou silos à tour conventionnelle. Ceux-ci sont considérés dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) comme des espaces clos; ils respectent la définition de l'article 1 de la section 1 de ce règlement. Ils ont été (et sont encore) le site d'accidents graves et souvent mortels. Au Québec, les fermes où l'ensilage du fourrage est effectué, bien que majoritairement de type familial, peuvent embaucher des travailleurs. Entre 2000 et 2005, 15 dossiers ont été ouverts à la CSST. Cinq de ceux-ci étaient reliés aux silos à fourrage, dont deux cas d'intoxication. Ces derniers cas ont été reliés à une atmosphère déficiente en oxygène (O₂) qui est remplacé par le dioxyde de carbone (CO₂) ou encore, à la présence de gaz toxiques dont le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂)². Le RSST indique des valeurs d'exposition admissibles (VEA) pour ces gaz pour des expositions pondérées sur 8 heures (VEMP) et des expositions de courte durée (VECD) rapportées au tableau 2-1. Dans un espace clos, la concentration en O₂ doit être supérieure ou égale à 19,5 % et inférieure ou égale à 23 %.

Tableau 2-1 : Valeurs d'exposition admissibles de l'annexe I du RSST

Gaz	VEMP		VECD	
	ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³
Dioxyde de carbone (CO ₂)	5 000	9 000	30 000	54 000
Monoxyde d'azote (NO)	25	31	--	--
Dioxyde d'azote (NO ₂)	3	5,6	--	--

Le CO₂, gaz incolore et inodore, est nocif à haute concentration (tableau 2-2). En prenant la place de l'O₂, cette déficience en O₂ présente également des effets sur le corps humain (tableau 2-3). Le NO₂ a une odeur de javellisant et une teinte allant de l'orangé jusqu'à brun foncé, selon la concentration. Il peut pénétrer profondément dans le système respiratoire et entraîner la mort lors d'exposition à de fortes concentrations (tableau 2-4) (FACE 2008, FACE 2003, Legris 2001, Gingras et coll. 2000, Louis et coll. 1999, Smith 1997). Selon Rasmussen (2009), des intoxications au NO₂ surviennent plus fréquemment en septembre et octobre.

Tableau 2-2 : Effets sur la santé d'une exposition au dioxyde de carbone

Concentration de CO ₂	Effets sur le corps humain
0,05 % ou 5 000 ppm	VEMP pour 8 heures par jour, 40 heures par semaine
1 % ou 10 000 ppm	Apparition des premiers symptômes : fatigue, anxiété, perte d'énergie
2 % ou 20 000 ppm	Accélération de la respiration
3 % ou 30 000 ppm	VECD pour 15 minutes, maux de tête, trouble de vision
4 % ou 40 000 ppm	Somnolence, maux de tête sévères
10 % ou 100 000 ppm	Respiration rapide, étourdissement, sudations, engourdissements
30 % ou 300 000 ppm	Coma, décès en 30 minutes

² CSST - Rapports d'enquête d'accidents – Silos bleus du Québec à Lefebvre, 2004; CSST – Communiqué de presse, 22 février 2006.

Tableau 2-3 : Effets reliés à la concentration d'oxygène dans l'air

Concentration en O₂	Effets sur le corps humain
Environ 21 %	Concentration normale dans l'air
19,5 % *	Concentration minimale acceptable dans l'air sans effet sur la santé
12 – 16 %	Respiration saccadée, fatigue, jugement perturbé
10 – 14 %	Accélération de la respiration et du rythme cardiaque, maux de tête, troubles de comportement
6 – 10 %	Nausées et vomissements, incapacité de bouger, possibilité de perte de conscience, possibilité d'effondrement tout en restant conscient
± 6 %	Convulsion, essoufflement marqué, décès en quelques minutes

Tableau 2-4 : Effets sur la santé d'une exposition au dioxyde d'azote

Concentration en NO₂	Effets sur le corps humain
0,5 ppm	Seuil olfactif (odeur de javellisant)
3 ppm	VEMP pour 8 heures par jour, 40 heures par semaine
1 - 5 ppm	Irritation légère des voies respiratoires (possibilité d'effets plus marqués chez les personnes hypersensibles)
5 - 50 ppm	Irritation légère des yeux, du nez et de la gorge. Irritation modérée à sévère des poumons (4 à 8 heures d'exposition)
50 - 150 ppm	Atteinte sévère des poumons (4 à 8 heures d'exposition)
> 150 ppm	Spasme des voies respiratoires, manque d'oxygène, décès immédiat

L'ensilage est une technique de conservation des fourrages par tassement et par fermentation acide. Le processus de fermentation, connu depuis longtemps, rend le fourrage (maïs fourrager, luzerne, fléole et autres graminées) plus digestible et plus nourrissant pour le bétail. La fermentation inhibe la croissance des moisissures et des champignons qui pourraient altérer la valeur nutritive du fourrage. Elle fait appel à l'anaérobiose, à l'abaissement rapide du pH et à une acidification, à dominante lactique, afin d'éviter le développement de microorganismes indésirables (Paragon 2004, Savoie 1998).

Le processus de fermentation dure environ trois semaines. Il appauvrit l'air en O₂ et produit du CO₂ en grande quantité (1 - 40 % et plus, selon les études) et dégage de la chaleur. Cette production de CO₂, dans des conditions anaérobiques (absence d'O₂), est désirable pour la qualité du fourrage. Des oxydes d'azote sont également formés notamment selon la quantité de nitrates présents dans les plantes fourragères (Sund et coll. 2002, Baker et Lee 1993, Douglas et coll. 1989, Farm Safety Association 1985, McLoughlin et coll. 1985). Les gaz, principalement le CO₂ et le NO₂, sont générés dès les premières heures après le remplissage du silo et peuvent atteindre un pic maximal au cours des trois à cinq premiers jours (Rasmussen et Bascom 2006, Cyr et Johnson 2005, Rosenman 1992, Zwemer 1992, Warren 1997, Williams et coll. 1997, Baker et Lee 1993, CDC 1982, Schrottmaier 1982, Scott et Hunt 1973). La fermentation de certains fourrages, selon les conditions météorologiques et de fertilisation, entre autres, produit une plus grande quantité de NO₂ (jusqu'à 60 ppm et plus, selon les études). En effet, les plantes fourragères ont tendance à accumuler des nitrates sous certaines conditions de stress, telles la sécheresse, les insectes, les gelées, etc. La littérature documente largement cette production des gaz de fermentation du fourrage (Bahloul et coll. 2008, Kedan et coll. 2007, Hagen et Deboy 2003, Legris 2001, Fournier 1999, O'Kiely et coll. 1999, Pavelchak et coll. 1999, HSE 1998,

Murphy 1991, Grove et Ellwood 1989, Reid et coll. 1984, Sabourin 1983, Scott et Hunt 1973, Cumming et coll. 1971, Giddens et coll. 1970, Scaletti et coll. 1960, Peterson et coll. 1958).

D'autres études ont également traité d'échanges gazeux entre l'air de l'espace libre dans le silo (au-dessus du fourrage) et l'environnement extérieur. Cet échange est généré :

- a) par les différences de températures diurnes et nocturnes,
- b) par les vents, (Savoie 1998, Williams et coll. 1997, Jiang 1989, Jiang et coll. 1988, Reid et coll. 1984, Schrottmaier 1982) ou
- c) suite à l'évacuation des gaz par une ventilation forcée (FACE 2008, Kedan et coll. 2007, Jiang et coll. 1991, Groves et Ellwood 1989, Canada Service de plans 1988, Sabourin 1983).

Étant légèrement plus lourds que l'air, le CO₂ et le NO₂ s'accumulent à la surface du fourrage et peuvent descendre le long de la chute du silo. Ils peuvent ainsi s'infiltrer dans les locaux attenants à celui-ci (CCS 2006, Murphy 2002, Sund et coll. 2002, Rosenman 1992, Scaletti et coll. 1960 et Peterson 1949) et incommoder les personnes ou les animaux présents, voire entraîner leur décès, selon les concentrations. Plusieurs cas d'intoxication³ aux gaz de fermentation sont rapportés dans la littérature (FACE 2008, PCSBMA 2008, Hagen et Deboy 2003, Sund et coll. 2002, O'Kiely et coll. 1999, Pavelchak et coll. 1999, Zwemer et coll. 1992, Douglas et coll. 1989, Canada 1988, McLoughlin et coll. 1985, CDC 1982, Rosenman 1992, Fleetham 1978, Horvath et coll. 1978, Scott et Hunt 1973, Brightwell 1972, Giddens et coll. 1970, Grayson 1956, Lowry et Schuman 1956, Peterson 1956 et 1949, Hayhurst 1914). Certains producteurs ressentent des malaises quelques heures après être entrés dans un silo fraîchement rempli, d'autres présentent des problèmes respiratoires de type obstructif deux à trois semaines après l'ensilage (Rasmussen et Bascom 2006, Rosenman 1992, Fleetham 1978, Horvath et coll. 1978, Scott et Hunt 1973, Grayson 1956, Lowry et Schuman 1956). Selon le Programme canadien de surveillance des blessures en milieu agricole (PCSBMA 2008), entre 1990 et 2005, des 47 accidents mortels liés à l'exposition à des substances toxiques, 15 % étaient attribués à l'inhalation des gaz de silo.

Plusieurs des études mentionnées précédemment n'incluent pas de mesures de gaz; elles décrivent les symptômes suite à des intoxications au NO₂, les dommages aux poumons découverts suite à l'autopsie ou encore, la description de l'état des lieux telle la couleur observée et la perception d'une odeur de javellisant. Les concentrations rapportées dans certaines études sont résumées au tableau 2-5.

³ Cette maladie, appelée pneumopathie des ensileurs ou maladie des remplisseurs de silos (en anglais Silo filler's disease) est une pneumopathie chimique suite à une exposition aux oxydes d'azote.

Tableau 2-5 : Concentrations des gaz d'ensilage rapportées dans la littérature

Auteur principal	Année	Concentration rapportée			Remarque
		CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	
Bahloul	2008	9,7		<0,5	9,3 % O ₂
Cummins	1971	40 - 78	630	1920	À un pied au-dessus de l'ensilage. Le CO ₂ a été analysé par la méthode Orsat et les NO _x par colorimétrie.
Canada	1988	10 – 20			Essais de ventilation.
FACE	2008	0,9		60	O ₂ < 5%. Essais de ventilation.
Giddens	1970	0,2 – 9,1	< 140	8 – 360	L'analyse de <u>l'air infiltré dans des bâtiments adjacents</u> aux silos a été effectuée par spectrométrie de masse.
Groves	1989	> 5		> 10	L'étude sur la stratification des gaz d'ensilage. Les lectures correspondent au maximum de la plage de lecture des instruments utilisés.
Hayhurst	1914	38			13 à 14 % d'O ₂ .
Kedan	2007	0,8	< 2,2	63 - 74	Essais de ventilation
Legris	2001	0,67			70 ppm de protoxyde d'azote (N ₂ O) (VEMP = 50 ppm).
Peterson	1949			151	La concentration a été retrouvée dans les <u>bâtiments adjacents au silo</u> .
Peterson	1958			100 000	La concentration a été retrouvée dans le <u>liquide suintant à la base du silo</u> .
Reid	1984	0,2 – 12, 15 et plus	8 – 20	1,5 -17	
Sabourin	1983	0,4 >15		0,5 - 15	
Scaletti	1960			1,4 - 40	42 % des 332 fermes étudiées ont obtenu un résultat positif en NO ₂ .
Schrottmaier	1982	30 – 38 μ = 16		20 - 25	
Williams	1997	< 1,0			Étude des changements de températures et des gaz au cours de l'ensilage et de l'entreposage en fonction de l'exposition du silo au vent et à la chaleur radiante.

La définition d'un espace clos se retrouve à l'article 1 du RSST. De plus, le point d'entrée d'un silo, appelé chute, est une voie restreinte et un espace clos. Comme il a été démontré plus haut, la concentration en O₂ dans un silo ne respecte pas en tout temps l'article 302 1° du même règlement, sans compter que les concentrations des principaux gaz de fermentation sont fréquemment supérieures aux VEA prescrites dans l'annexe I, tel que stipulé à l'article 302 3° du RSST. Plusieurs auteurs ou organismes traitent des pratiques sécuritaires à mettre en place pour

ces espaces clos (Government of Saskatchewan 2009, FACE 2008, FACE 2003, Legris 2001, Gingras et coll. 2000, HSE 1998).

2.2 Ventilation

Pour sécuriser l'espace intérieur des silos, on peut faire appel à une ventilation naturelle ou mécanique. La ventilation naturelle se fait par le biais de l'ouverture située en haut du silo permettant le remplissage du fourrage. L'efficacité de ce type de ventilation dépend beaucoup des conditions météorologiques, notamment la force du vent. Des exemples de graphiques, extraits de la littérature, illustrant l'effet de la ventilation naturelle sur la réduction des gaz, CO₂ et NO₂, dans un silo de 9 m de hauteur sont présentés aux figures 2-1 et 2-2 (Reid et coll. 1984). L'accès a été ouvert pour une période de plus de 35 heures. Il a fallu plus de 25 heures pour qu'une réduction des concentrations de CO₂ et de NO₂ soit constatée. Après 35 heures, la ventilation naturelle a permis une réduction des concentrations à des valeurs estimées par les auteurs être sécuritaires. Ces auteurs rapportent qu'une fois la ventilation arrêtée, la concentration de CO₂ a augmenté considérablement et a dépassé rapidement les normes.

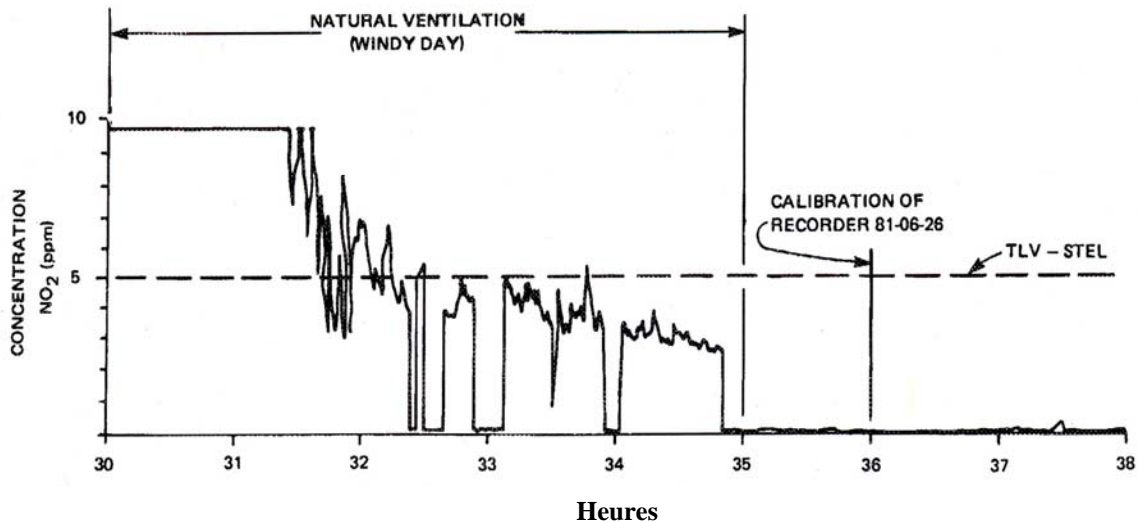


Figure 2-1 : Évolution de la concentration du dioxyde d'azote NO₂ dans un silo avec la ventilation naturelle en opération

(Tiré de Reid et coll. 1984)

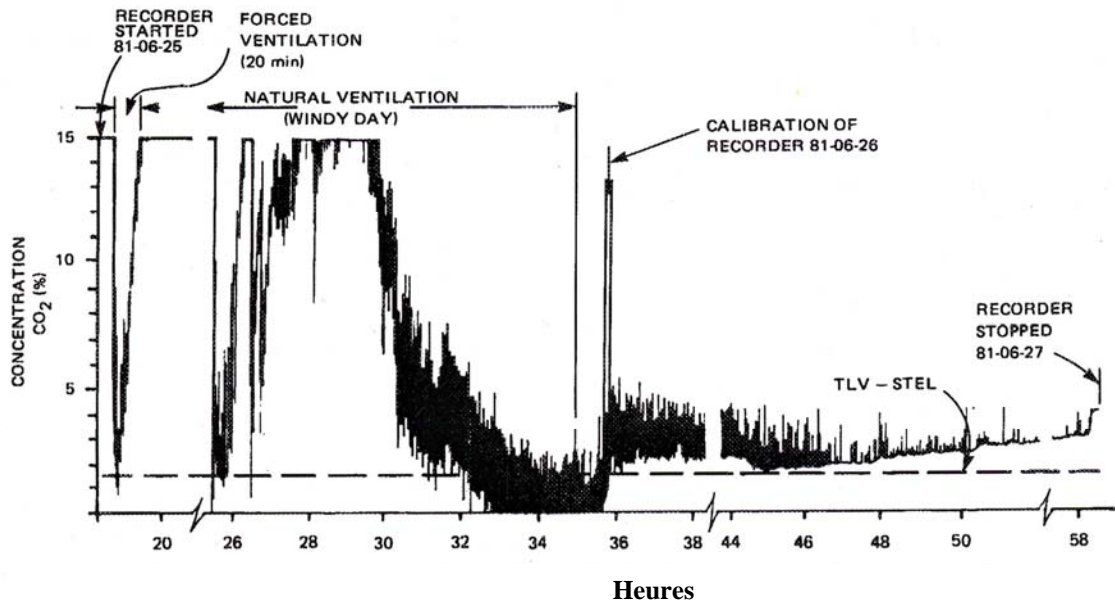
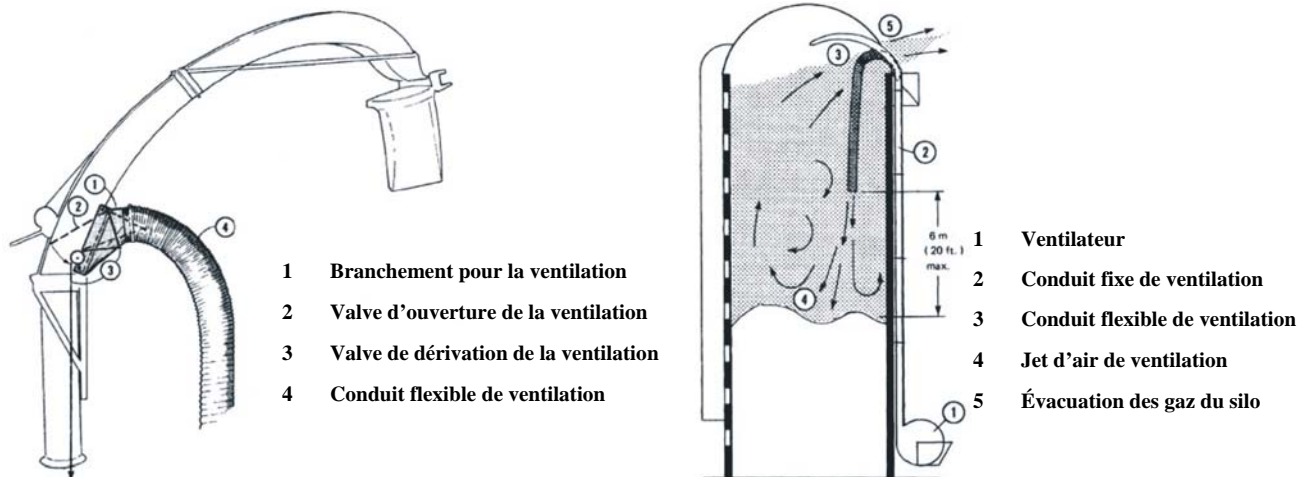


Figure 2-2: Évolution de la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) dans un silo avec la ventilation naturelle en opération

(Tiré de Reid et coll. 1984)

La ventilation mécanique utilisée jusqu'à présent est celle par soufflage forcé en utilisant l'ouverture servant au remplissage du silo (Reid et coll. 1984, Barber et Ogilvie. 1984, Barber et Zulak 1984 et Groves 1989). Le fait que les gaz CO₂ et NO₂ soient plus lourds que l'air, de hautes concentrations se situeraient à la surface de l'ensilage. Dans ce cas, un tube flexible était introduit jusqu'à une hauteur de 6 m de la surface d'ensilage pour pouvoir évacuer les gaz toxiques (Figure 2-3) (NIOSH <http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html>).

Les figures 2-4 et 2-5 (Reid et coll. 1984) illustrent l'efficacité de la ventilation forcée utilisée pour les silos à tour conventionnelle. Cette fois-ci, le temps nécessaire d'évacuation des gaz toxiques pour atteindre les normes était plus court (de l'ordre de 20 minutes) que celui correspondant à la ventilation naturelle. Cependant, une émission des gaz d'ensilage nécessite un fonctionnement en continu de la ventilation et ce, jusqu'à une stabilisation des concentrations à un niveau dit sécuritaire par les auteurs. La ventilation devra alors demeurer en fonction durant l'intervention du travailleur dans le silo.



a) Attachement proposé de ventilation (gooseneck design by Lancaster Level-Flo, Inc., Lancaster, Pennsylvania 17602, USA).

b) Ventilation du silo à tour conventionnelle à fourrage.

Figure 2-3 : Ventilation mécanique par soufflage

(NIOSH <http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html>)

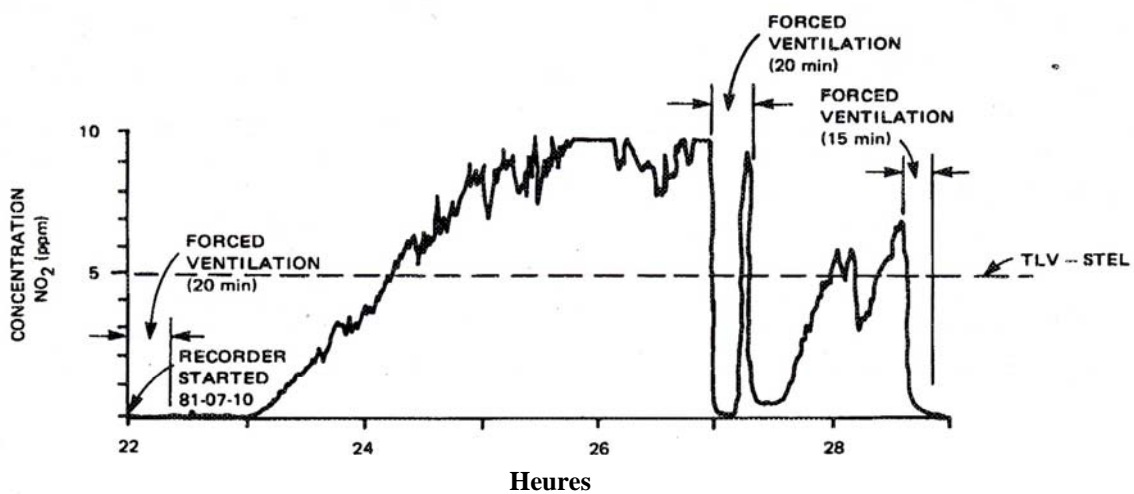


Figure 2-4 : Évolution de la concentration du dioxyde d'azote (NO₂) dans un silo avec la ventilation mécanique par soufflage en opération

(Tiré de Reid et coll. 1984)

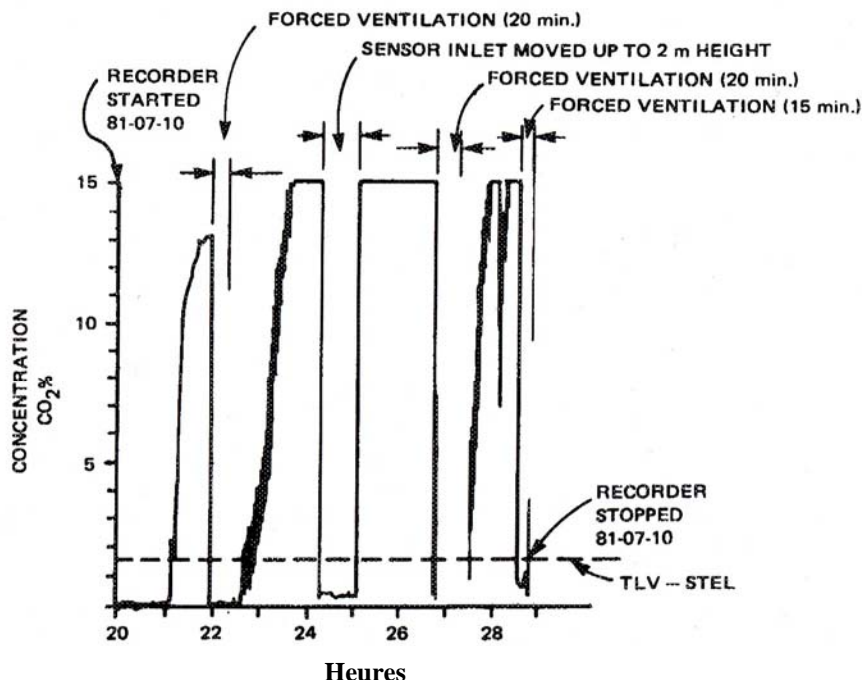


Figure 2-5 : Évolution de la concentration du dioxyde de carbone (CO₂) dans un silo avec la ventilation mécanique par soufflage en opération

(Tiré de Reid et coll. 1984)

La ventilation des silos (Figure 2-3) constitue l'élément clé pour protéger les fermiers. Elle consiste à diluer ou à éliminer la contamination et la chaleur excessive pour assurer une qualité d'air intérieur sécuritaire. Dans le cas des silos tours conventionnelles, elle permet de sécuriser l'environnement avant que le fermier entre dans le silo pour réaliser des travaux d'entretien ou autres. Les études disponibles dans la littérature recommandent de ventiler mécaniquement le silo, mais les informations concernant les temps de soufflage sont insuffisantes ou peu précises. La technique actuelle la plus répandue en milieu agricole pour ventiler l'intérieur des silos est l'utilisation de la souffleuse à fourrage (utilisée en premier lieu pour remplir les silos), dû au fait qu'elle est déjà en place et qu'elle a des capacités de déplacement d'air variant entre 800 L/s et 1000 L/s (48 m³/min et 60 m³/min). Ces débits de ventilation sont environ cinq fois ceux des plus gros ventilateurs portatifs existants (Canada service de plans 1988).

Le temps de ventilation suggéré par des spécialistes varie beaucoup selon les études. Fleetham et coll. (1978) proposent simplement de laisser le soufflage en service pendant l'intervention du fermier à l'intérieur du silo. Niedermeyer et Burris (1963) recommandent de ventiler entre 15 à 20 minutes avant d'entrer dans le silo et suggèrent de ne pas entrer pendant la période critique de fermentation, pendant les dix premiers jours après l'ensilage. Horvarth et coll. (1978) et Cummins et coll. (1971) recommandent de ventiler pendant 30 minutes avant d'entrer tout en soulignant que, pour des espaces libres (espace entre le toit du silo et la surface de l'ensilage) dans les silos de diamètre supérieur à 6,7 m et de hauteur 10 m, les 30 minutes suggérées ne sont plus suffisantes pour sécuriser l'environnement intérieur du silo. Il existe aussi des tableaux avec

des temps de ventilation (voir le Tableau 2-6 extrait de Canada service de plans (1988)). Ces temps de ventilation ont été calculés pour des espaces libres des silos de diverses dimensions, pour des concentrations initiales de CO₂ de 10 % et pour un débit de soufflage de 800 L/s (48 m³/min). Afin de déterminer analytiquement le temps de ventilation, ces calculs approximatifs ont été menés en fixant le débit de ventilation et la concentration du CO₂. Cependant le modèle utilisé ne permet pas de prendre en compte la complexité de l'écoulement turbulent induit par le jet d'air et le court-circuitage possible entre l'entrée d'air propre et la sortie d'air contaminé. L'erreur de ces calculs pourrait alors être importante. Cette liste, bien que très utile, demeure assez limitée, si on est face à d'autres conditions initiales ou d'autres débits de ventilation.

Tableau 2-6 : Temps minimum en minutes pour la ventilation de l'espace libre des silos verticaux

Diamètre du silo (m)	Hauteur de l'espace libre (m)				
	3	4,5	6	7,5	9
3,6	3	4	5	7	8
4,8	5	7	9	11	13
6,0	7	10	14	17	21
7,2	10	14	20	25	29

<http://www.cps.gov.on.ca/french/Plans/F7000/7410/M-7410L.pdf>

D'autres modèles mathématiques actuellement rapportés dans la littérature, tel que celui développé par Barber et Ogilvie (1984) pourraient entraîner des erreurs puisqu'ils sont basés sur des approximations liées au taux de dilution, au coefficient d'efficacité de mélange ou aux caractéristiques de l'entrée et de sortie d'air.

Maintenant, un logiciel de simulations numériques tel Computational Fluid Dynamic (CFD) pouvant résoudre les équations de conservation de mouvement, de masse et de concentrations d'espèces permet de développer un modèle mathématique pour le calcul du temps de ventilation nécessaire avant d'entrer dans un silo quelconque. Ainsi, le modèle développé dans notre étude tient compte des caractéristiques physiques du mélange des gaz, de la complexité de l'écoulement turbulent et des caractéristiques géométriques de l'espace libre et leur influence dans l'écoulement; les variables étudiées sont le volume libre à ventiler, le débit de soufflage et les concentrations initiales de CO₂ et d'O₂.

3. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'étude vise à répondre à la demande conjointe de la CSST et de l'UPA afin de :

- Documenter la période critique de fermentation du fourrage et de production de gaz toxiques;
- Déterminer les débits et les caractéristiques d'un système de ventilation pour des silos verticaux à fourrage ou à tour conventionnelle;
- Documenter l'utilisation d'instruments de détection des gaz, en ce qui a trait aux limites et contraintes dans le cadre d'une procédure d'entrée en espace clos.

Des mesures en situation réelle de travail et des expériences en laboratoire ont permis de répondre aux deux premiers objectifs. L'expertise des auteurs a permis de répondre directement à la troisième demande.

4. MÉTHODES DE LA RECHERCHE

Compte tenu du fait que, pour les silos à l'étude, la fermentation du fourrage n'avait pas lieu selon les façons habituelles, la méthodologie décrite dans le devis de recherche a dû être adaptée, notamment au niveau des séquences de mesure des gaz. De même, la température du fourrage ensilé n'a pu être mesurée à cause des reprises quotidiennes immédiatement après l'ensilage.

4.1 Description des silos et des fourrages

Les silos verticaux à tour conventionnelle peuvent être construits, entre autres, en béton, en douves de béton ou en acier vitrifié. Les producteurs agricoles québécois entrent régulièrement dans leur silo pour y exécuter des travaux de nivelage du fourrage, d'entretien et d'installation d'accessoires, d'équipements, etc. Théoriquement, le fourrage ensilé dans un silo fermente pendant une période approximative de 21 jours; des gaz de fermentation sont alors produits et l'oxygène (O₂) de l'air est consommé.

Trois silos d'une ferme laitière étaient disponibles pour documenter les gaz de fermentation du fourrage. Leurs dimensions étaient de 18,3 m (60 pieds) de hauteur et 6,1 m (20 pieds) de diamètre. Il y avait deux silos en douves de béton (silos #2 et #3) et le troisième était en béton (silo #1). Le fourrage y était introduit par le haut et sa reprise était également effectuée par le haut à l'aide d'un instrument araire, communément appelé désileuse ou videur.

Les fourrages ensilés dans le silo # 1 ont été notamment la luzerne, le mil et des graminées, récoltés lors des coupes de juillet, août et octobre, alors que le maïs fourrager récolté en septembre a été ensilé dans les deux autres silos (silos #2 et 3). Il n'y avait pas d'ajout d'inoculant ou autres produits au moment de l'ensilage dans le silo # 1; il y a eu ajout d'ammoniac anhydre sur le maïs fourrager ensilé dans les silos #2 et 3.

Les différents fourrages étaient coupés et laissés sur le champ environ 24 heures. Puis, ils étaient introduits dans le silo par le point d'entrée illustré à la figure 4-1 pendant un à trois jours, selon la quantité des récoltes. Un silo peut recevoir du nouveau fourrage sans qu'il soit complètement vide, situation existante dans le silo #1. Ce fourrage fraîchement ensilé était repris immédiatement après le remplissage du silo. Il y a eu de trois à quatre reprises par jour pour nourrir le cheptel de vaches. La reprise s'effectuait dans chacun des silos et la partie supérieure du fourrage était projetée dans la chute à l'aide de la désileuse vers un convoyeur situé dans la salle d'alimentation. Le même convoyeur a été utilisé pour la reprise dans les silos #1 et 2. Il y en avait un autre pour le silo #3.

À la fin du remplissage, le producteur entrait dans le silo pour niveler le fourrage, pour installer les accessoires de la désileuse et enlever la porte de la chute pour la reprise, qui était effectuée immédiatement ou le lendemain.



Figure 4-1: Silo #1 en béton

4.2 Documentation des gaz de fermentation

Les gaz mesurés sont le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et l'oxygène (O_2). Ils ont été quantifiés à l'aide d'instruments ayant un système de détection par électrochimie, sauf pour le CO_2 qui a été quantifié par spectrométrie dans la région de l'infrarouge. Les instruments utilisés et certaines spécifications fournies par le fabricant sont énumérés au tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Instruments de mesure des gaz de fermentation dans les silos

Gaz mesuré	Instrument	Plage de mesure	LQ
O_2	ADC Analysis Ltée LFG 20	0 – 25 %	0,1 %
NO	SCL Med Tech	0 - 250 ppm	1 ppm
NO_2	SCL Med Tech	0 - 20 ppm	0,1 ppm
CO_2	ADC Analysis Ltée LFG 20	0 – 100 %	50 ppm

LQ : Limite inférieure de quantification fournie par le fabricant.

L'incertitude relative de la mesure est de 5 % et le temps de réponse est d'environ 30 secondes pour tous ces instruments.

Les instruments étaient étalonnés selon les méthodes de l'IRSST ou les recommandations de leur fabricant lors des visites à la ferme effectuées les jours ouvrables. Ils étaient jumelés à des valves reliées à des sondes de prélèvement (voir figure 4-2) positionnées dans les silos à deux hauteurs distinctes (en parallèle aux sondes de température) et étaient contrôlés par un système conçu par l'IRSST. Ils ont été installés dans une boîte protectrice (voir figure 4-3) située en haut du silo #1. Cette boîte abritait les instruments de mesure, les valves, les systèmes d'aspiration et de contrôle (voir figure 4-4). Au début de l'ensilage dans un silo, les sondes étaient enlevées; elles étaient remises lorsque terminé. Rappelons qu'un ensilage dans un silo prend plus d'une journée.

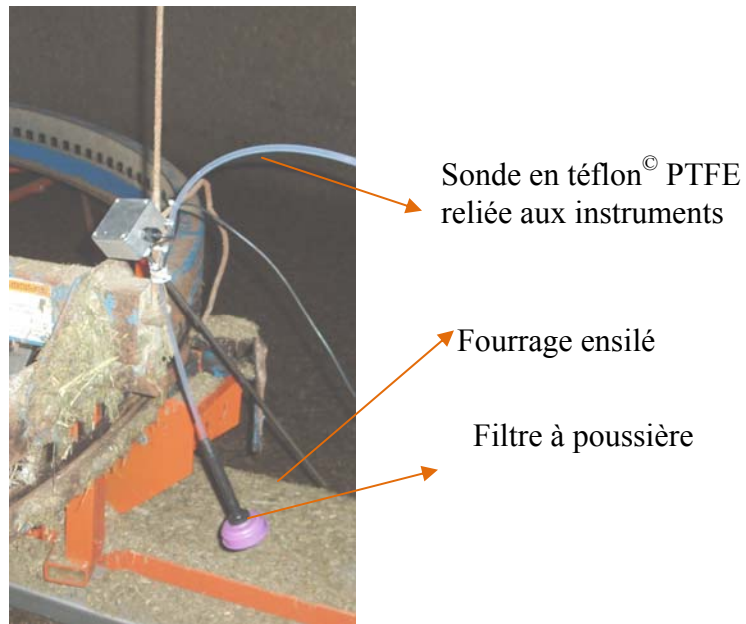


Figure 4-2 : Sonde de prélèvement des gaz

Les sondes de prélèvement en téflon[®] (polytétrafluoroéthylène PTFE) avaient une longueur de 100 pieds permettant ainsi de descendre dans le silo en suivant la désileuse. Compte tenu de cette longueur, des essais préalables ont été effectués en laboratoire afin de s'assurer que les gaz, notamment le NO₂, n'adsorbaient pas sur leurs parois et d'estimer le temps de purge pour le système d'aspiration. Un délai de purge de cinq minutes a donc été alloué. À la fin du remplissage du silo, les sondes pour les gaz, munies d'un filtre à poussière, et celles pour la température, étaient fixées sur l'axe de la désileuse et des essais d'étanchéité étaient effectués.

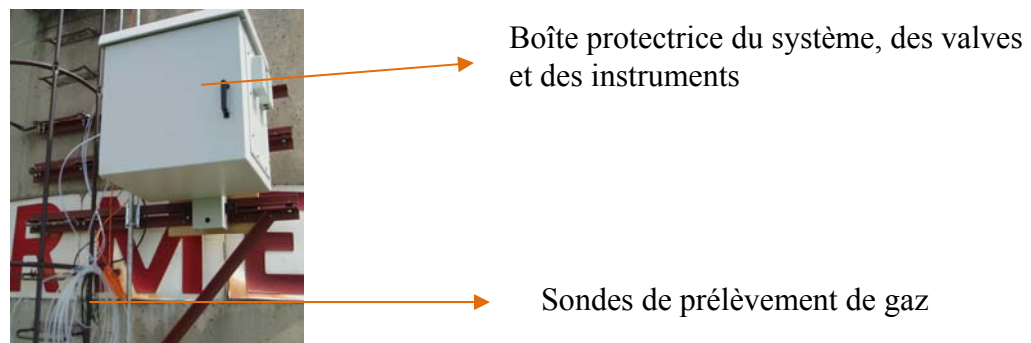


Figure 4-3 : Boîte protectrice positionnée en haut du silo #1

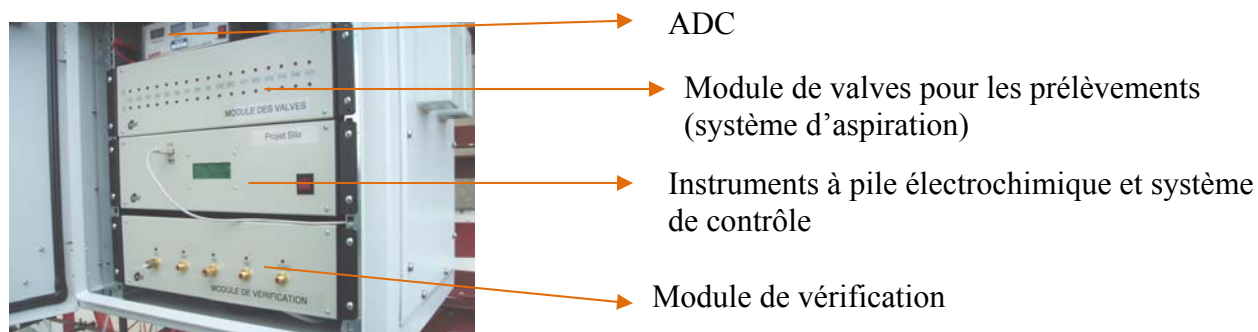


Figure 4-4 : Instruments de mesure, systèmes d'aspiration et de contrôle

Deux sondes de température de marque Oméga RTD modèle 727 par silo mesurent la température de l'air au-dessus du fourrage avec une exactitude de 0,5 °C. Celles-ci, positionnées au centre du silo, étaient juxtaposées l'une au-dessus de l'autre, l'une au-dessus de l'ensilage ($\pm 0,6$ m) et l'autre à 1,5 m plus haut, tel qu'illustré sur la figure 4-5. Les lectures ont été prises du début du premier ensilage en juillet jusqu'à la fin du dernier ensilage en octobre. Contrairement à la méthodologie proposée dans le devis, la température du fourrage ensilé n'a pas été relevée, car il était impossible d'insérer une sonde dans le fourrage compte tenu des reprises quotidiennes immédiatement après l'ensilage.

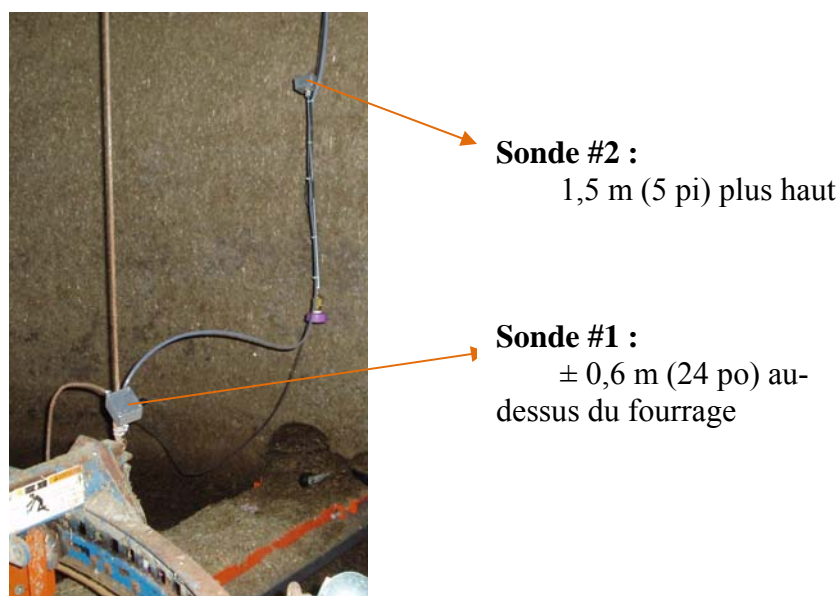


Figure 4-5 : Sondes de température de l'air au-dessus du fourrage

Comme pour les températures, les lectures des gaz s'effectuaient à toutes les quatre heures pour chacune des sondes et ce, dans les trois silos, 24 heures par jour, sept jours par semaine et étaient accumulées dans un système conçu par l'IRSST. Puis, elles étaient relevées lors des visites et sauvegardées dans une banque de données montée dans le logiciel Excel de Microsoft.

Un équipement automoteur de levage à bras articulé a été utilisé pour l'installation du montage et les vérifications ou l'étalonnage des instruments de mesure (voir figure 4-6). Des procédures de sécurité (surveillant, périmètre d'exclusion, formation des utilisateurs, etc.) ont été élaborées

conformément à la réglementation en vigueur au Québec et aux bonnes pratiques; pour cette raison, la vitesse du vent était mesurée à l'aide d'un anémomètre triaxial chaque jour.

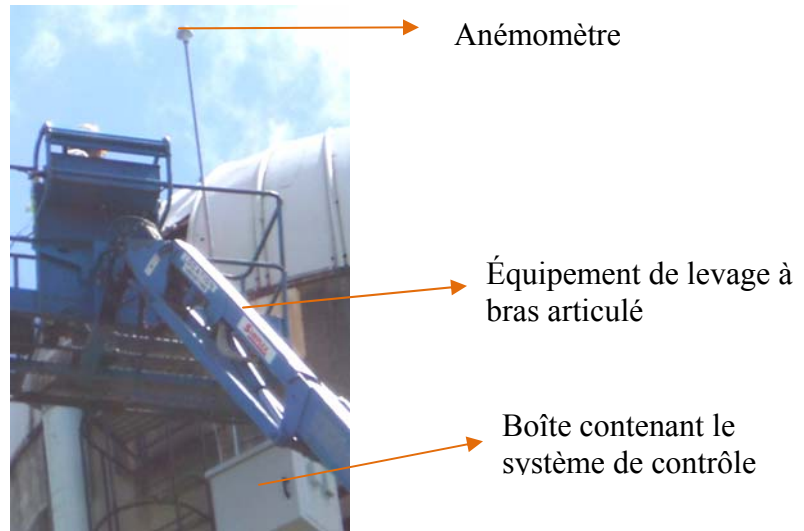


Figure 4-6 : Équipement de levage

Des mesures de CO_2 , NO , NO_2 et O_2 ont aussi été effectuées dans la salle d'alimentation lors de la première reprise du matin immédiatement à la fin du remplissage des silos (voir figure 4-7). Un seul instrument était disponible pour la mesure du NO ainsi que pour le CO_2 , limitant ainsi le nombre de sites de mesure. À l'aide d'instruments à lecture directe (ILD), ces gaz ont été quantifiés à la sortie de la chute et près du mélangeur. Ces ILD sont munis des systèmes de détection décrits au tableau 4-2 ainsi que certaines spécifications fournies par le fabricant.

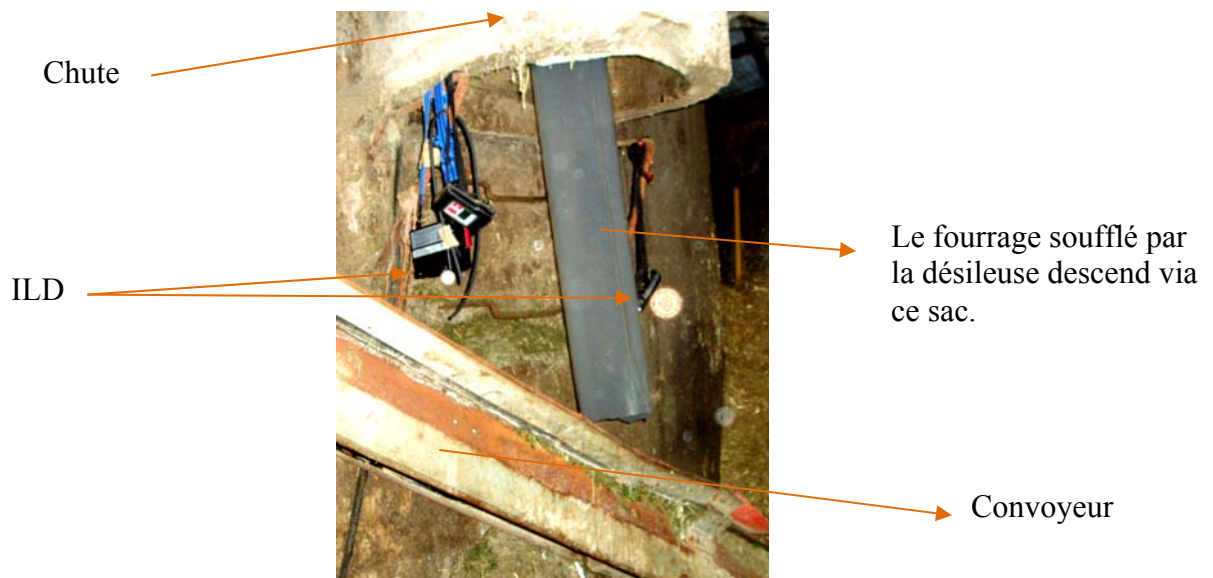


Figure 4-7 : Mesure des gaz dans la salle d'alimentation

Tableau 4-2 : Instruments de mesure des gaz de fermentation dans la salle d'alimentation

Gaz mesuré	Marque de l'instrument	Modèle	Plage de mesure	LQ
O ₂	Dräger	Multiwarn	0 - 25 %	0,1 %
NO	Dräger	Multiwarn	0 - 100 ppm	1 ppm
NO ₂	Dräger	Multiwarn	0 - 50 ppm	0,1 ppm
CO ₂	Dräger	Multiwarn	0 - 25 %	50 ppm

LQ : Limite inférieure de quantification fournie par le fabricant.

Ces mesures de CO₂, NO, NO₂ et O₂ ont été effectuées lors de l'ensilage terminé le 22 août (après le remplissage du silo #1) et celui du maïs fourrager terminé le 16 octobre 2008 (après le remplissage des silos #2 et #3).

4.3 Ventilation

Les paramètres de ventilation par soufflage ont été étudiés par une méthode numérique et par une méthode expérimentale dans un silo à échelle réduite conçu au laboratoire de l'IRSST, afin de déterminer le temps minimal de ventilation nécessaire pour obtenir des concentrations équivalentes à celles du milieu environnant. Ce temps a été déterminé en fonction de concentrations initiales des gaz présents dans l'espace libre à ventiler et du débit de ventilation. Ainsi, des simulations numériques ont été menées en utilisant l'outil commercial « *Computational Fluid Dynamic (CFD), Fluent* » (Fluent 2005). Ces calculs théoriques ont été ensuite validés par les tests expérimentaux effectués dans le silo à échelle réduite. Un travail paramétrique a suivi, permettant la détermination du temps de ventilation.

4.3.1 Méthode numérique

La ventilation dans un silo a été simulée numériquement dans une configuration tridimensionnelle, en utilisant le dioxyde de carbone et l'oxygène comme traceurs. Ces simulations consistaient à résoudre les équations aux dérivées partielles de conservation de masse, de quantité de mouvement et de concentration d'espèces. Le fluide était considéré incompressible et newtonien. La convection forcée était forte, elle prédominait alors sur les effets naturels. La température était 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 Φ :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}}_{\text{Transient}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\Phi U_i)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{Source}} \quad i=1, 2, 3 \quad (4.1)$$

Dans cette expression, ρ représente la masse volumique du fluide, Γ_Φ est le coefficient de diffusion, S_Φ est un terme source et U_i est la composante de vitesse dans la direction i . Les équations gouvernant le problème sont alors :

Conservation de la masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{4.2}$$

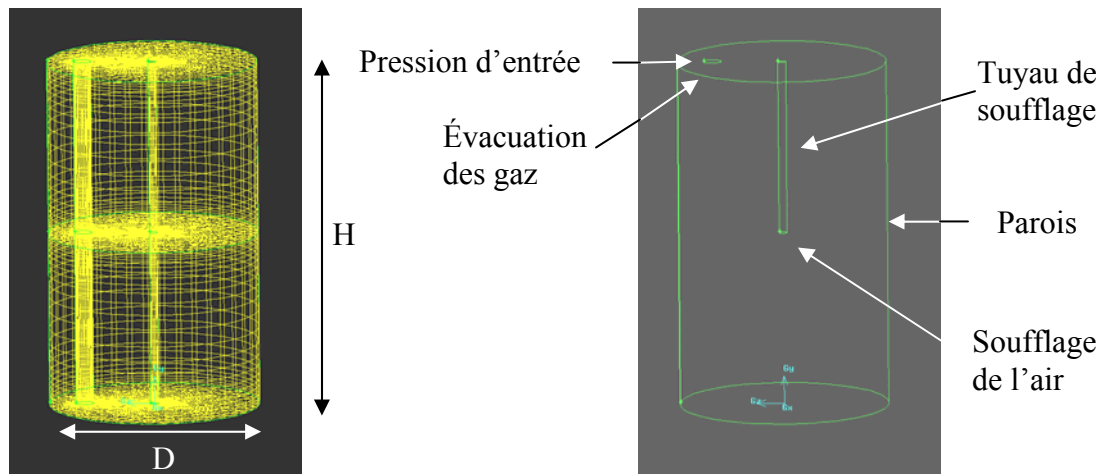
Conservation de la quantité de mouvement:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + g_{i3} (\rho - \rho_0) \tag{4.3}$$

Conservation des espèces :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \tag{4.4}$$

où P , μ , C et D représentent respectivement la pression, la viscosité dynamique, la concentration et la diffusion moléculaire. C désigne les concentrations d'O₂ et du CO₂. 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, comme l'on fait dans le passé plusieurs chercheurs pour la modélisation des écoulements dans des espaces intérieurs (Chen 1995 et 1996, Yuan et coll. 1999 et Srebic 2002). La modélisation des voisinages des parois a été réalisée par le biais de la loi de paroi standard incorporée dans « Fluent » (Fluent 2005). Dans un premier temps, l'effet du maillage sur les résultats a été étudié, puis la taille des éléments a été choisie de telle sorte qu'elle soit suffisamment petite pour une juste représentation de l'espace libre du silo. La configuration étudiée ainsi que le maillage utilisé sont présentés à la figure 4-8.



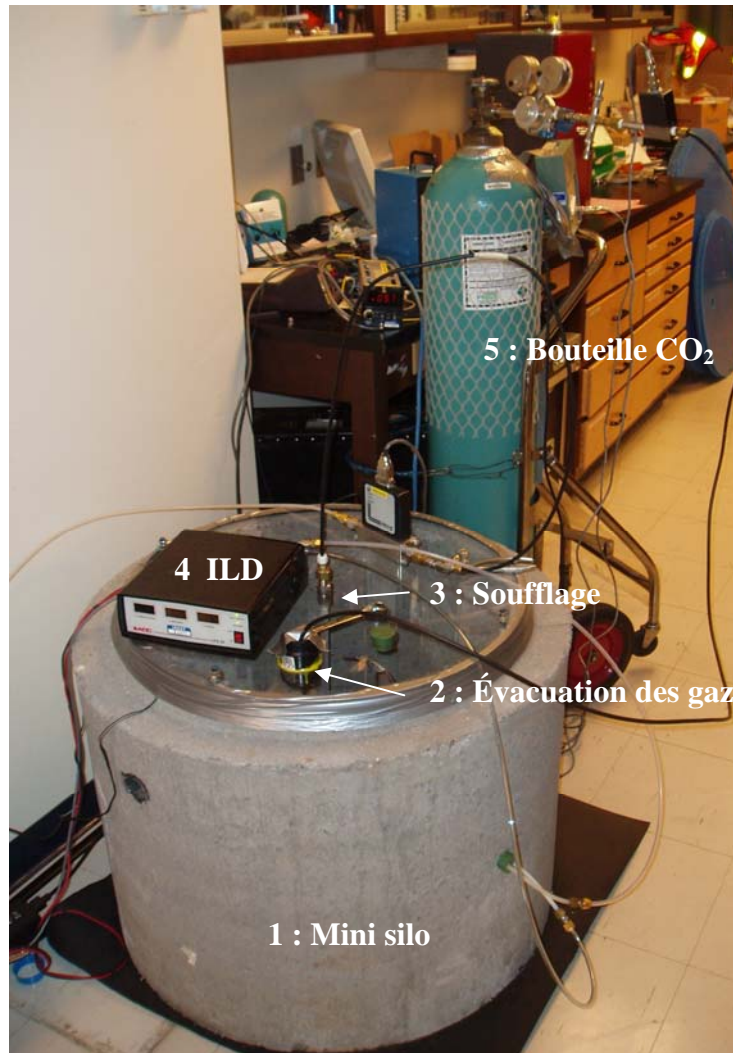
a) maillage structuré = 71 000 cellules

b) conditions aux frontières

Figure 4-8 : Modèle numérique d'un silo de 10 m de hauteur et 6 m de diamètre

4.3.2 Méthode expérimentale

Le prototype de silo respectait les proportions de grandeur de l'un des modèles de silo à tour conventionnelle utilisés par les producteurs québécois. Il reproduisait à une échelle de 1/10 un silo à tour conventionnelle de 18,3 m (60 pieds) de hauteur, H, et d'un diamètre de 6,1 m (20 pieds), D, rempli de fourrage à 90 % de sa capacité. Le débit réduit de ventilation par soufflage était alors le 1/1000 de celui utilisé en milieu agricole. Le silo à échelle réduite est représenté à la figure 4-9.



1. Silo en béton à échelle réduite
2. Ouverture à l'atmosphère pour l'évacuation des gaz
3. Tuyau d'air servi pour le soufflage
4. ILD pour la mesure CO₂ et O₂
5. Bouteille de CO₂

Figure 4-9 : Silo à échelle réduite H = 0,645 m et D = 0,6 m

Les gaz CO_2 et O_2 étaient utilisés comme traceurs pour déterminer le temps de ventilation. À chaque test, les concentrations initiales de ces gaz ont été ajustées en introduisant du CO_2 et de l'azote 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 (voir tableau 4-1) a été utilisé pour mesurer le CO_2 et l' O_2 . L'acquisition des données se faisait directement par ordinateur, ce 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 correspondant à celles de l'air extérieur (environ 20,9 % en oxygène et 0,04 % en dioxyde de carbone).

Des tests expérimentaux de ventilation ont été effectués pour les paramètres de contrôle suivants : le débit de ventilation Q , la hauteur de l'espace libre à ventiler H , la concentration initiale d'oxygène $C_i\text{O}_2$ et la concentration initiale du dioxyde de carbone $C_i\text{CO}_2$.

4.3.3 Modélisation du temps de ventilation

Une fois validées, les simulations numériques ont permis de mener un travail paramétrique. L'objectif était d'établir un modèle analytique permettant de calculer facilement le temps nécessaire de ventilation pour obtenir les concentrations voulues. Ce temps dépend de quatre paramètres : la taille de l'espace libre à ventiler (H et D), le débit de ventilation (Q) et les concentrations initiales d' O_2 et de CO_2 .

Le temps de ventilation, Δt , est déterminé en quatre étapes. À chaque étape, ce temps est simulé numériquement en fonction de l'un des quatre paramètres en maintenant les autres constants. Chaque étape permet alors d'établir un modèle analytique de Δt en fonction du paramètre étudié. La 4^e étape permet d'obtenir le modèle final de Δt en fonction des quatre paramètres, soit la taille de l'espace libre à ventiler (H et D), le débit de ventilation (Q) et les concentrations initiales $C_i\text{O}_2$ et $C_i\text{CO}_2$. Des simulations numériques et des tests expérimentaux ont été finalement effectués pour une hauteur et un diamètre de silo respectifs de 0,645 m et 0,6 m, pour des concentrations $C_i\text{O}_2 = 10\%$ et $C_i\text{CO}_2 = 25\%$ et pour des débits de 10, 20 et 40 L/min afin de vérifier le modèle analytique obtenu.

5. RÉSULTATS

Les résultats rapportés sont relatifs à la récolte 2008 à la ferme laitière étudiée.

5.1 Documentation des fourrages

Il y a eu trois périodes d'ensilage dans le silo #1. Ces ensilages se sont terminés le 17 juillet, le 22 août et le 15 octobre 2008. L'ensilage du maïs fourrager dans le silo #2 s'est terminé le 1^{er} octobre 2008 et celui dans le silo #3 le 28 septembre. Au moment de l'ensilage, toutes les portes de la chute étaient fermées. Lorsque l'ensilage était terminé, il y avait deux portes ouvertes à l'intérieur de la chute pour permettre les reprises quotidiennes. Parfois, celle du dôme était également ouverte. Ces ouvertures répondaient aux besoins du producteur. Les températures internes des silos ont été mesurées entre les périodes d'ensilage.

Le fourrage a été coupé le 15 juillet à 4 à 5 pouces du sol et hachuré à 1 à 2 pouces. Il a été ensilé les 16 et 17 juillet 2008 par-dessus la luzerne et le mil déjà présents. Le silo a été empli à 50 % de sa capacité maximale.

Les différents fourrages ensilés dans les silos utilisés dans l'étude sont énumérés au tableau 5-1. L'écart maximal de température atteint dans l'espace libre au-dessus du fourrage est également inscrit dans ce tableau dans la colonne de droite. Il est atteint entre 2 à 6 jours après l'ensilage. Les moyennes quotidiennes des températures au-dessus du fourrage ($\pm 0,6$ m) et de l'air extérieur sont illustrées aux figures 5-1 et 5-2.

Tableau 5-1: Description de données relatives aux fourrages et écarts de température

Silo	Date de fin de l'ensilage	Fourrage ensilé	Quantité ensilée *	Jours **	Écart de température ($\pm 0,5^\circ\text{C}$)
1	17 juillet	Luzerne et mil, graminées	50 %	35	4,4 °C
	22 août	Luzerne et mil, graminées	75 %	52	4,8 °C
	15 octobre	Luzerne et mil, graminées	90 %	12	5,5 °C
2	1 ^{er} octobre	Maïs fourrager ***	90 %	26	4,9 °C
3	28 septembre	Maïs fourrager ***	90 %	30	4,3 °C

* : Pourcentage de la capacité du silo.

** : Nombre total de jours de mesure entre les ensilages

*** : Il y a ajout de NH_3 anhydre.

Températures des ensilages de juillet et d'août

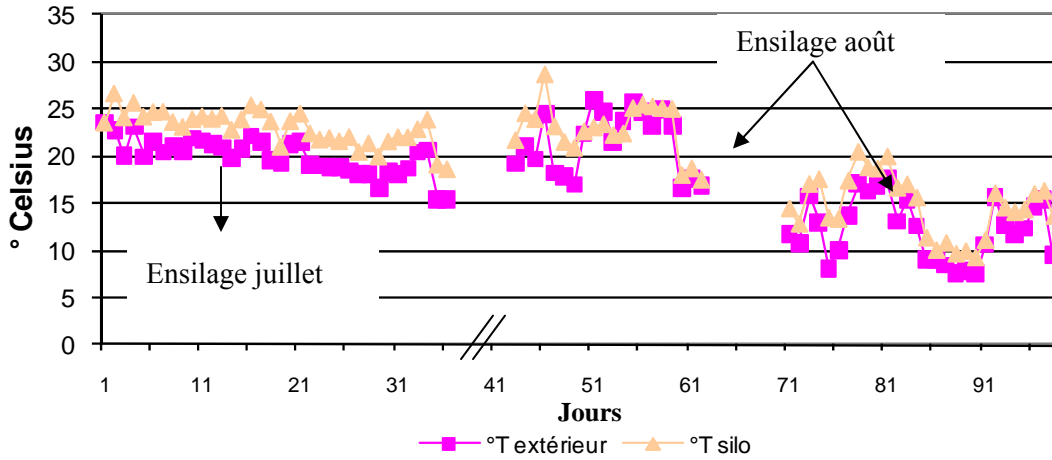


Figure 5-1 : Moyennes quotidiennes des températures dans le silo #1 pour les premiers ensilages de la saison 2008

Températures des ensilages de septembre et d'octobre

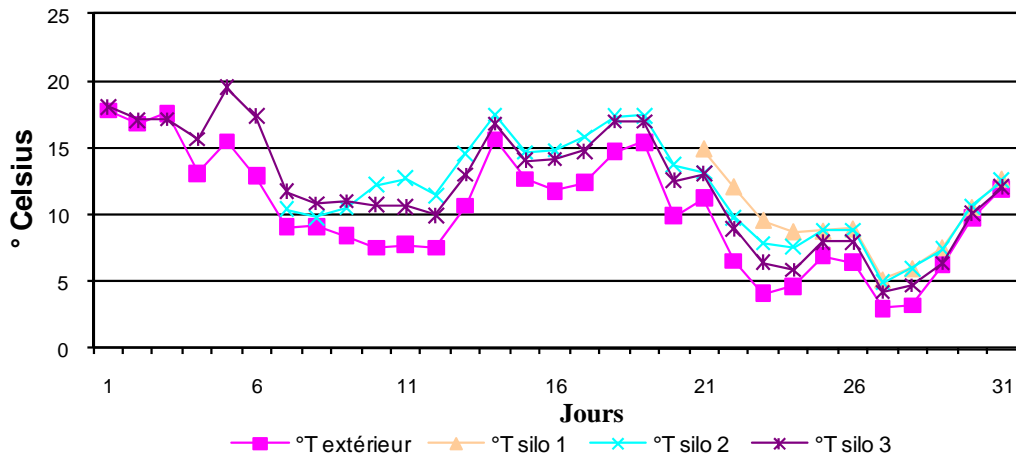


Figure 5-2 : Moyennes quotidiennes des températures dans les silos pour les derniers ensilages de la saison 2008

L'étude de Williams et coll. (1997) a mesuré les températures intérieures de deux silos et extérieures en plusieurs points, en fonction de divers paramètres du fourrage dont la densité, le taux et la perte de matière sèche au cours de la fermentation, le compactage naturel ou non, etc. sur un fourrage ensilé en juin. Elles sont rapportées au tableau 5-2 ainsi que les températures moyennes intérieures du silo #1 et les écarts avec les températures moyennes (μ °T) extérieures.

Tableau 5-2 : Moyenne et écart des températures intérieures et extérieures en fonction des jours de fermentation

Jour	Résultats de l'étude		Étude de Williams et coll.			
	μ °T int. (°C)	Écart (°C)	μ °T int. (°C)	Écart (°C)	μ °T int. (°C)	Écart (°C)
2	20,7	3,9	21,3	0,5	21,0	0,9
5	24,3	4,4	28,8	1,7	29,0	1,7
8	23,7	2,7	29,1	2,2	29,5	2,2
11	24,3	2,7	28,9	2,1	29,2	2,6
14	22,9	3,1	27,8	1,9	28,3	2,7
17	25,0	3,4	26,0	1,6	27,6	2,7
20	21,1	2,4	26,1	1,3	27,0	2,7

° T int. : Température moyenne intérieure du silo #1 au jour X, exprimée en degré Celsius.

Écart : Écart entre les températures intérieures et extérieures.

5.2 Documentation des gaz de fermentation

Jusqu'au 25 juillet 2008, l'analyseur de CO₂ était étalonné avec un gaz 100 %, d'où un accroissement de l'inexactitude des lectures obtenues avec ce système de détection, la spectrométrie dans la région de l'IR. À cette date, l'étalonnage s'est effectué avec un gaz ayant une concentration correspondant aux lectures et une vérification des lectures (plus basses et plus hautes) est également effectuée afin de s'assurer d'une meilleure exactitude. Enfin, plusieurs lectures ont été éliminées suite à divers problèmes techniques, dont un mauvais fonctionnement du système d'aspiration de l'analyseur de CO₂.

5.2.1 Mesures dans les silos

Les gaz dégagés par le fourrage ensilé dans le silo #1 ont été mesurés entre le 17 juillet et le 27 octobre, dans le silo #2 entre le 1^{er} et le 27 octobre et le silo #3 entre le 28 septembre et le 27 octobre 2008 par le système conçu par l'IRSST. Dans les silos #2 et #3, il y a eu ajout d'ammoniac anhydre sur le fourrage de maïs.

Les concentrations des gaz sont colligées au tableau 5-3. On y retrouve les concentrations maximales et la moyenne des concentrations sur toute la période de mesure entre les ensilages. L'oxygène oscillait entre 19,4 et 20,9 %.

Tableau 5-3 : Concentrations mesurées dans l'espace libre (à $\pm 0,6$ m du fourrage) dans les silos entre les ensilages

Silo	Date de fin de l'ensilage	Jours *	Concentration CO ₂ (%)		Concentration O ₂ (%)	
			Max	Moyenne	Min	Moyenne
1	17 juillet	35	1,2	0,22	19,4	20,7
	22 août	52	0,9	0,13	19,3	20,6
	15 octobre	12	1,6	0,28	19,5	20,5
2	1 ^{er} octobre	26	0,8	0,19	19,5	20,5
3	28 septembre	30	3,8	0,10	19,9	20,6
Silo	Date de fin de l'ensilage	Jours *	Concentration NO (ppm)		Concentration NO ₂ (ppm)	
			Max	Moyenne	Max	Moyenne
1	17 juillet	35	69	3	29,0	0,9
	22 août	52	24	< 1 **	3,6	< 0,1 **
	15 octobre	12	9	< 1 **	2,1	< 0,1 **
2	1 ^{er} octobre	26	2	< 1 **	< 0,1 **	< 0,1 **
3	28 septembre	30	< 1 **	< 1 **	< 0,1 **	< 0,1 **

* : Nombre total de jours de mesure entre les ensilages ou la fin de la prise de mesures le 27 octobre 2008.

** : Limite inférieure de quantification.

Max : Concentration maximale.

Min : Concentration minimale.

Une analyse des mesures dans l'espace libre du silo # 1 prises entre les 16 et 21 juillet 2008, au-dessus du fourrage ($\pm 0,6$ m) démontre une variation des concentrations correspondant aux périodes de reprises d'une journée (entre 8h00 et 21h30), tel qu'illustré à la figure 5-3.

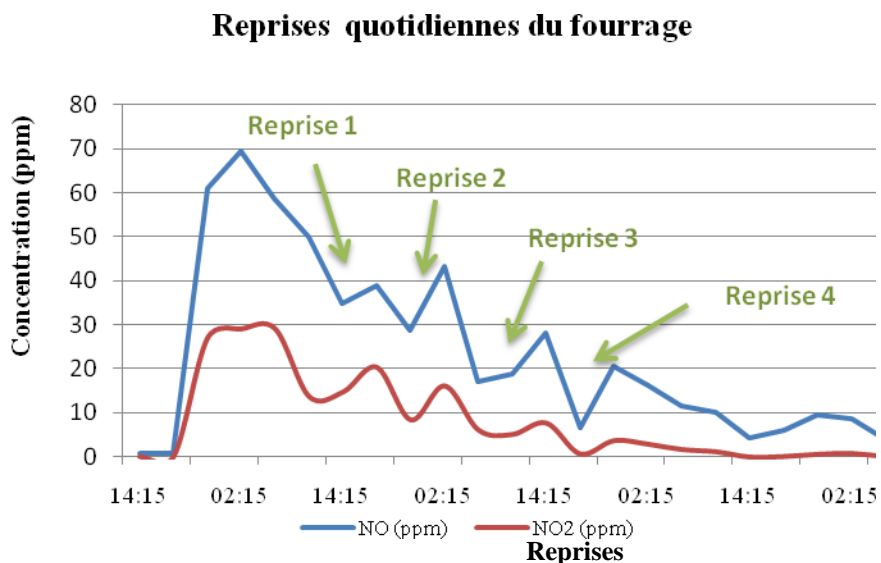


Figure 5-3 : Concentrations de gaz au-dessus de l'ensilage du silo # 1

5.2.2 Mesures dans la salle d'alimentation

Il y a quatre séries distinctes de mélanges destinés au bétail dans lesquels entrent du maïs provenant des silos # 2 et # 3, des drèches, des minéraux, etc. pour nourrir le bétail selon l'âge (veaux, taures et productrices de lait), la période de gestation ou de lactation. Entre chacun des mélanges, le producteur le distribue à la catégorie d'animaux auxquels il est destiné avec un véhicule alimenté à l'essence.

Suite aux résultats obtenus dans le silo en fonction des reprises (voir figure 5-3), des mesures ont donc été effectuées dans la salle d'alimentation lors de la reprise du matin, vers 8h. L'hypothèse est que les gaz (CO_2 et NO_x) évacués de l'espace libre sous le dôme du silo se retrouvaient dans la salle d'alimentation via la chute. Les mesures visaient à confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Le dernier voyage de fourrage a été ensilé le matin du 22 août vers 8h00, après une période de ventilation du silo #1 d'environ 15 minutes. La reprise s'est effectuée immédiatement après. Au cours de ces mesures, la porte entre la salle d'alimentation et l'étable était presque toujours ouverte, celle donnant sur l'extérieur est demeurée entreouverte.

Les concentrations moyennes par prélèvement ainsi que la concentration moyenne et maximale de l'ensemble des prélèvements dans la salle d'alimentation, obtenues entre le 22 et le 24 août 2008, sont colligées au tableau 5-4.

Tableau 5-4 : Concentrations des gaz dans la salle d'alimentation

Étape de la reprise Gaz	Concentration (%)	Concentration (ppm)			
		NO	NO ₂ G	NO ₂ D	NO ₂ C
22 août 2008					
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,61	12	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,77	13	< 0,5 *	0,7	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,26	6	< 0,5 *	1,9	< 0,5 *
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,34	7	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,80	26	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,56	13	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Concentration maximale	1,65	48	5,4	7,4	2,8
23 août 2008					
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,63	8	1,6	2,1	7,3
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,59	7	1,6	1,6	4,1
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,52	9	0,8	0,7	9,1
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,31	4	< 0,5 *	< 0,5 *	4,4
Prélèvement silo #2	0,48	4	1,1	1,9	7,1
Moyenne	0,51	6	1,1	1,3	6,4
Concentration maximale	1,62	23	3,7	6,7	25,0
24 août 2008					
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,45	<1 *	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,47	<1 *	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,40	1,0	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,21	<1 *	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,65	<1 *	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,43	<1 *	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *
Concentration maximale	0,93	3	< 0,5 *	< 0,5 *	< 0,5 *

NO₂ G : Concentration à gauche de la chuteNO₂ D : Concentration à droite de la chuteNO₂ C : Concentration au-dessus du convoyeur près du mélangeur

* : Inférieure à la limite de quantification

Les lectures obtenues par notre système à l'intérieur du silo #1 au-dessus de l'ensilage prises à 7h05 le 22 août 2008 étaient : 2,8 % en CO₂, 5 ppm en NO et < 0,5 ppm en NO₂. Il s'agit des concentrations obtenues avant la ventilation et l'ensilage du dernier voyage du fourrage de 8h00. Au cours de la première reprise quotidienne du 23 août (24 heures après l'ensilage), les concentrations mesurées dans la chute et au-dessus du convoyeur sont plus élevées que la veille. Les lectures des instruments au-dessus de l'ensilage prises à 7h05, avant l'ensilage final et la reprise, étaient : 0,8 % en CO₂, 15 ppm en NO et 2,7 ppm en NO₂. Le 24 août (48 heures après l'ensilage), il est impossible d'avoir les lectures pour les gaz dans le silo, à cause de problèmes techniques avec les instruments du système de l'IRSST.

Les concentrations moyennes par prélèvement ainsi que la concentration moyenne et maximale de l'ensemble des prélèvements dans la salle d'alimentation en octobre 2008, au cours de la reprise matinale, sont colligées au tableau 5-5 (quelques jours après l'ensilage dans tous les silos).

Tableau 5-5 : Concentrations des gaz dans la salle d'alimentation près de la chute

Étape de la reprise Gaz	Concentration (%)	Concentration (ppm)	
	CO ₂	NO ₂ G	NO ₂ D
3 octobre 2008			
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,12	< 0,5 *	< 0,5 *
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,17	< 0,5 *	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,14	< 0,5 *	< 0,5 *
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,15	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,17	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,15	< 0,5 *	< 0,5 *
Concentration maximale	0,19	< 0,5 *	< 0,5 *
7 octobre 2008			
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,08	< 0,5 *	< 0,5 *
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,07	< 0,5 *	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,08	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,11	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,08	< 0,5 *	0,6
Concentration maximale	0,15	< 0,5 *	< 0,5 *
16 octobre 2008			
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,79 %	1,1	1,5
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,50 %	< 0,5 *	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,54 %	< 0,5 *	< 0,5 *
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,43 %	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,37 %	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,51 %	< 0,5 *	0,6
Concentration maximale	1,16 %	5,5	9,2
17 octobre 2008			
1 ^{er} prélèvement silo #1	0,14	< 0,5 *	< 0,5 *
2 ^{ième} prélèvement silo #1	0,14	< 0,5 *	< 0,5 *
3 ^{ième} prélèvement silo #1	0,15	< 0,5 *	< 0,5 *
4 ^{ième} prélèvement silo #1	0,34	< 0,5 *	< 0,5 *
Prélèvement silo #2	0,14	< 0,5 *	< 0,5 *
Moyenne	0,18	< 0,5 *	< 0,5 *
Concentration maximale	0,48	< 0,5 *	< 0,5 *

NO₂ G : Concentration à gauche de la chute NO₂ D : Concentration à droite de la chute
 * : Inférieure à la limite de quantification de l'ILD.

La respiration des animaux ainsi que le démarrage du véhicule pour le transport des mélanges vers les stalles sont considérés comme étant la concentration moyenne de fond dans la salle d'alimentation et l'étable, appelée bruit de fond (BDF), car ce BDF contribue à la concentration de CO₂. Afin de mesurer l'apport du BDF dans les concentrations de CO₂, un ILD quantifiant le CO₂ a été installé dans l'étable pour les mesures du mois d'octobre.

Dans la salle d'alimentation, ces concentrations moyennes ou BDF ont été estimées à partir des lectures effectuées cinq à dix minutes avant le début de la reprise et après celle-ci. Elles sont

rapportées au tableau 5-6 et ce, même si la valeur obtenue est inférieure à la limite de quantification.

Tableau 5-6 : Concentrations du bruit de fond dans la salle d'alimentation et l'étable

Date	Gaz	Bruit de fond avant reprise		Bruit de fond après reprise	
		BDF Salle	BDF étable	BDF salle	BDF étable
22 août	CO ₂	0,30 %	NM	0,40 %	NM
	NO	4 ppm	NM	14 ppm	NM
23 août	CO ₂	0,07 %	NM	0,22 %	NM
	NO	< 1 ppm	NM	3 ppm	NM
24 août	CO ₂	0,42 %	NM	0,19 %	NM
	NO	<1 ppm	NM	< 1 ppm	NM
3 octobre	CO ₂	0,06 %	0,05 %	0,11 %	0,06 %
	NO ₂	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm	NM	NM
7 octobre	CO ₂	0,05 %	0,07 %	0,06 %	0,07 %
	NO ₂	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm	NM	NM
16 octobre	CO ₂	0,36 %	0,31 %	0,31 %	0,07 %
	NO ₂	4 ppm	NM	< 0,5 ppm	NM
17 octobre	CO ₂	0,04 %	0,07 %	0,31 %	0,12 %
	NO ₂	< 0,5 ppm	< 0,5 ppm	NM	NM

NM : Non mesuré.

5.2.3 Validation des mesures

Compte tenu que les concentrations de CO₂ retrouvées ne correspondaient pas à celles obtenues dans notre étude préliminaire (099-613), des vérifications des mesures ont été effectuées afin de valider les résultats.

Étant donné qu'il n'existait pas de problème d'étanchéité au niveau du branchement des sondes de prélèvement, des mesures ont été effectuées dans le silo avec les ILD décrits au tableau 4-2. Leurs lectures devaient être équivalentes à celles obtenues avec les instruments du système IRSST installé dans le silo. De plus, les mesures de CO₂ et d'O₂ à différentes hauteurs dans l'espace libre du silo #1 ont également validé l'exactitude des mesures effectuées avec le système conçu par l'IRSST.

Les lectures obtenues avec ces ILD sont résumées au tableau 5-7. Les valeurs inscrites dans la troisième colonne (fond en bleu) sont celles lues par les instruments de mesure installés dans l'espace libre du silo #1 (système illustré aux figures 4-2 et 4-3).

Tableau 5-7 : Concentration mesurée des gaz dans l'espace libre du silo #1

Concentration de gaz / Emplacement du ILD par rapport au fourrage	Niveau du fourrage	Lue par système	0,6 m	1,0 m	1,5 m	2 m
Dioxyde de carbone (CO ₂) (%)	0,9	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18
Oxygène (O ₂) (%)	19,9	20,9	20,4	20,5	20,4	20,5

Des vérifications effectuées au laboratoire ont permis de s'assurer que l'ammoniac ajouté dans le maïs fourrager n'interfère pas sur la lecture des différents analyseurs.

5.3 Ventilation

L'étude paramétrique de ventilation par soufflage consistait à établir un modèle mathématique simple pour calculer le temps de ventilation nécessaire avant toute intervention du travailleur à l'intérieur du silo.

5.3.1 Comparaison des données expérimentales et numériques

La figure 5-4 montre la variation des concentrations de CO₂ et O₂ en fonction du temps durant la ventilation. Il y a une bonne correspondance entre les calculs numériques et les mesures expérimentales. Le temps final de ventilation était déterminé, dès que la concentration en O₂ atteignait 99 % de la valeur dans l'air extérieur.

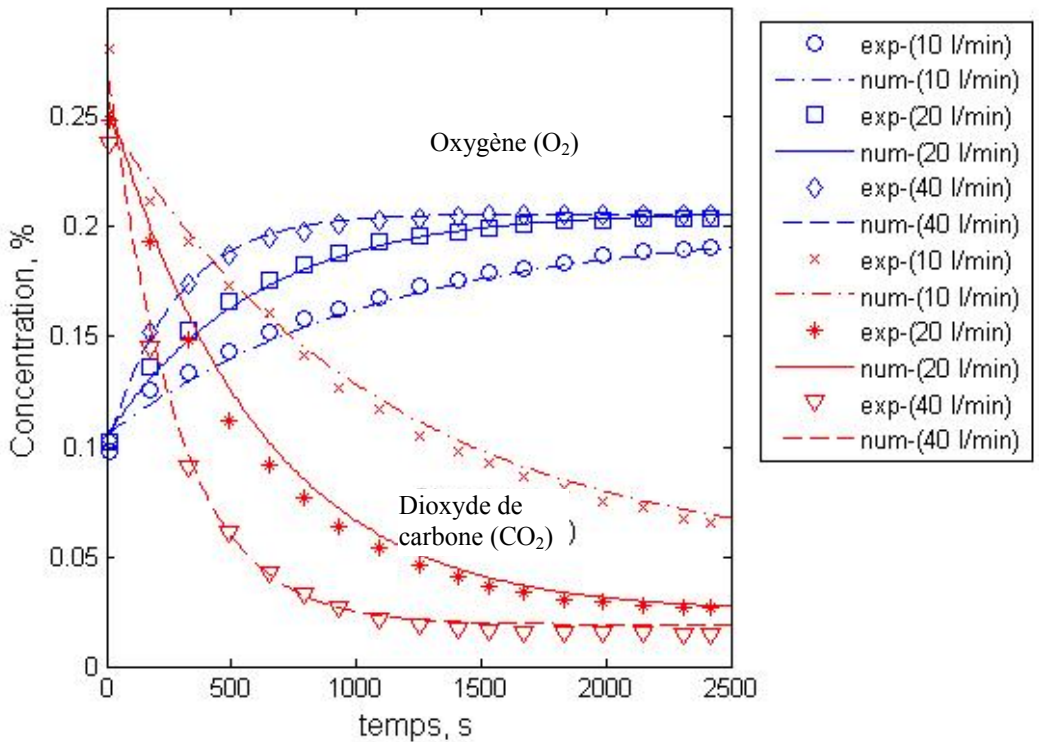


Figure 5-4 : Comparaison des temps de ventilation théoriques et expérimentaux

5.3.2 Étude paramétrique

Dans la première étape de l'étude paramétrique, le temps de ventilation, Δt , est déterminé en fonction du volume de l'espace libre du silo en maintenant le débit de ventilation (Q) et les concentrations initiales d' O_2 (CiO_2) et de CO_2 ($CiCO_2$) constantes. Le temps de ventilation croît linéairement avec le volume, $V = \pi H D^2/4$, de l'espace dans le silo à ventiler (voir Figure 5-5).

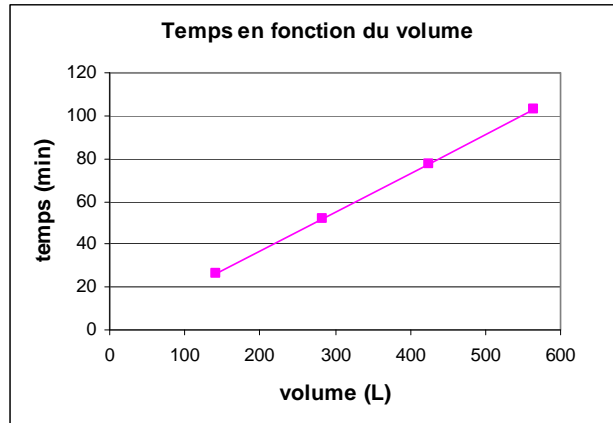


Figure 5-5 : Variation du temps en fonction du volume avec $CiCO_2 = 30 \%$, $CiO_2 = 0 \%$ et débit = 20 L/min

L'étape 2 consiste à déterminer la variation de Δt en fonction de Q . Δt décroît fortement à de faibles débits ($Q \ll 50$ L/min) et tend vers zéro à de grands débits ($Q \gg 50$ L/min) (Figure 5-6.a). Le temps de ventilation est inversement proportionnel au débit de ventilation comme l'illustre la figure 5-6.b).

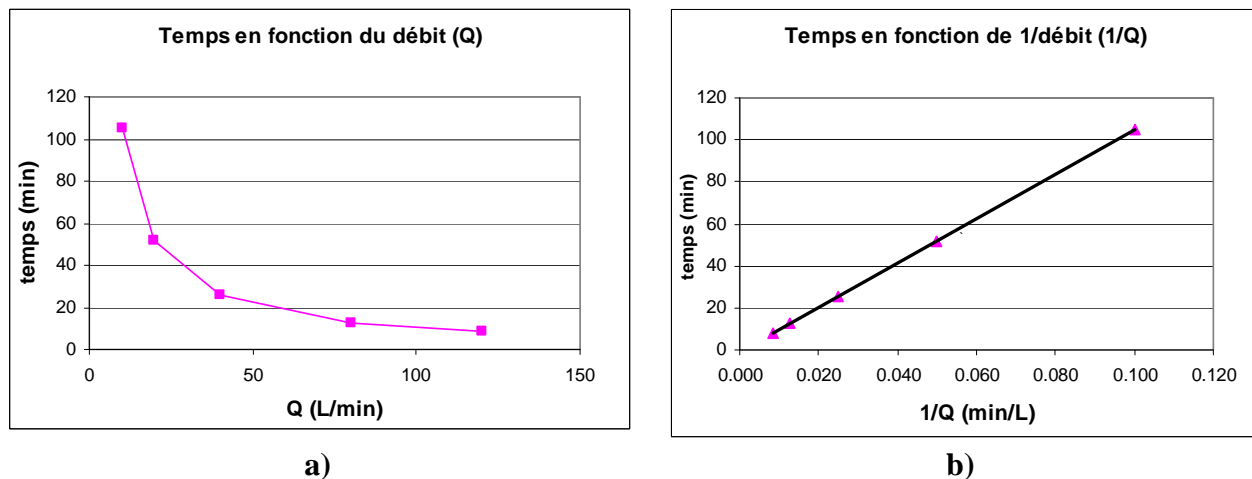


Figure 5-6 : Variation du temps en fonction du débit avec volume = 282,7 L, $CiCO_2 = 30 \%$ et $CiO_2 = 0 \%$

Dans l'étape 3, Δt est calculé en fonction de C_iO_2 . La figure 5-7.a) montre une décroissance de type exponentiel du temps de ventilation avec la concentration initiale de l'oxygène.

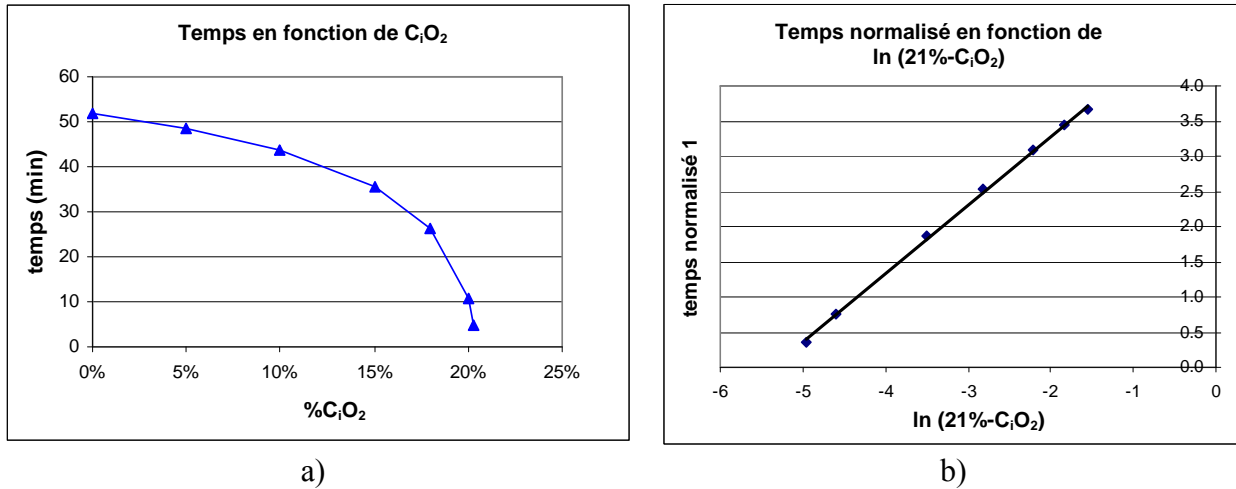


Figure 5-7 : Variation du temps en fonction de C_iO_2 avec volume = 282,7 L, $C_iCO_2 = 30\%$ et débit 20 L/min

La figure 5-7.b) présente la variation du temps, $\Delta t_1^* = \frac{\Delta t \times 4 \times Q}{\pi \times D^2 \times H}$, normalisée par rapport à V/Q en fonction de $\ln(21\%O_2 - C_iO_2)$. La figure montre une dépendance linéaire du Δt_1^* normalisé par rapport à la variable $\ln(21\%O_2 - C_iO_2)$.

De ces figures, à $C_iCO_2 = 30\%$, le temps de ventilation Δt est modélisé comme suit:

$$\Delta t = \frac{\pi D^2 H}{4Q} [\ln(21\%O_2 - C_iO_2) + 0,8549] \tag{5.1}$$

Pour déterminer le modèle final qui tient compte de la concentration initiale du CO_2 , le temps de ventilation est déterminé pour différentes concentrations de CO_2 en maintenant V , Q et C_iO_2 constants. La figure 5-8 a) illustre la variation du temps en fonction des concentrations initiales de CO_2 pour deux valeurs initiales de C_iO_2 (0 % et 10 %). Les courbes montrent une croissance linéaire du temps de ventilation en fonction de C_iO_2 . En utilisant l'expression (5.1), 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 5-8 b) en fonction de C_iO_2 . Les deux courbes sont ramenées en une seule courbe linéaire.

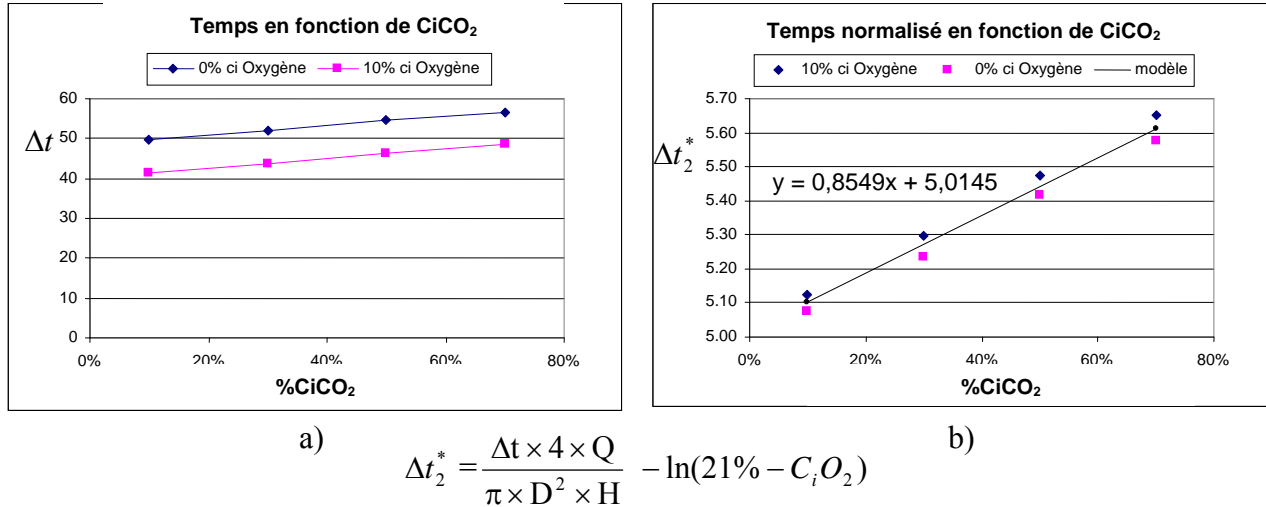


Figure 5-8 : Variation du temps en fonction de CiCO₂ avec volume = 282,7 L, débit = 20 L/min et CiO₂ = 0 % et 10 %

De la figure 5-8, le modèle général est établi à l'aide de la formule 5.3 :

$$\Delta t = \frac{\pi D^2 H}{4Q} [\ln(21\% O_2 - C_i O_2) + 0,8549 \times C_i CO_2 + 5,0145] \quad (5.3)$$

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

- Δt : Temps de ventilation, [min].
- D : Diamètre du silo, [m].
- H : Hauteur du silo, [m]
- Q : Débit de l'air de soufflage, [m³/min]
- CiO₂ : Concentration O₂ initiale, [%]
- CiCO₂ : Concentration CO₂ initiale, [%]

Considérant une situation extrême où l'espace libre dans le silo est remplie de gaz carbonique et sans oxygène, la formule (5.3) pourrait être réduite à :

$$\Delta t = 4 / \text{tau} \quad (5.4)$$

où tau = Q/V = taux de changement d'air de ventilation dans le silo

Ce modèle mathématique simple permet d'obtenir le temps de ventilation à respecter pour l'obtention d'un environnement interne sécuritaire dans le silo. Bien sûr, le travailleur devra maintenir la ventilation en opération durant son intervention dans le silo.

5.3.3 Validation du modèle mathématique

Pour valider le modèle, des tests expérimentaux de ventilation ont été reconduits au laboratoire. Pour des paramètres variables, les temps de ventilation trouvés ont été comparés à ceux obtenus par le modèle et par les calculs numériques. Le tableau 5-8 illustre 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 atteindre les concentrations souhaitées. Le modèle simplifié permet aussi d'avoir une bonne estimation avec une marge de sécurité. Il est à noter que l'écart entre le modèle simplifié et le modèle général est plus important pour des faibles débits. Cependant, les débits de ventilation utilisés en milieu agricole pour les silos sont habituellement élevés, supérieurs à 20 L/min.

Tableau 5-8 : Calculs des temps de ventilation

L/min	Expérimentaux	Modèle	Modèle simplifié
10	54 min	55 min	73 min
20	26 min	28 min	36 min
40	13 min	14 min	18 min

Pour $H = 0,645$ m, $D = 0,6$ m, $CiO_2 = 10\%$ et $CiCO_2 = 25\%$

5.3.4 Effet d'une émission constante de CO₂ sur le temps de ventilation

L'impact d'une émission constante de gaz provenant du matériel ensilé sur la ventilation par soufflage a été élaboré par simulation numérique. Pour cela, du CO₂ a été émis à la surface d'ensilage. La figure 5-9 montre l'effet d'une injection de CO₂ à la surface d'ensilage sur le temps de ventilation pour différents débits de ventilation. Le temps de ventilation décroît avec l'augmentation du débit de ventilation et augmente avec l'augmentation du débit d'émission. L'effet des émissions des gaz d'ensilage est considérable quand le débit de ventilation est faible ($Q < 30$ L/min) (voir figure 5-10). Pour une émission de CO₂ de 0,1 L/min, le temps de ventilation varie entre 10 et 50 minutes selon l'intensité du soufflage. Dans la réalité et en dehors de la période critique de fermentation, les émissions de gaz d'ensilage sont beaucoup plus faibles et leur effet sur la ventilation est par conséquent faible en considérant des débits de ventilation supérieurs à 20 L/min. Le modèle mathématique obtenu dans la sous-section 5.3.2 demeure valable en dehors de la période critique de fermentation de 21 jours après l'ensilage.

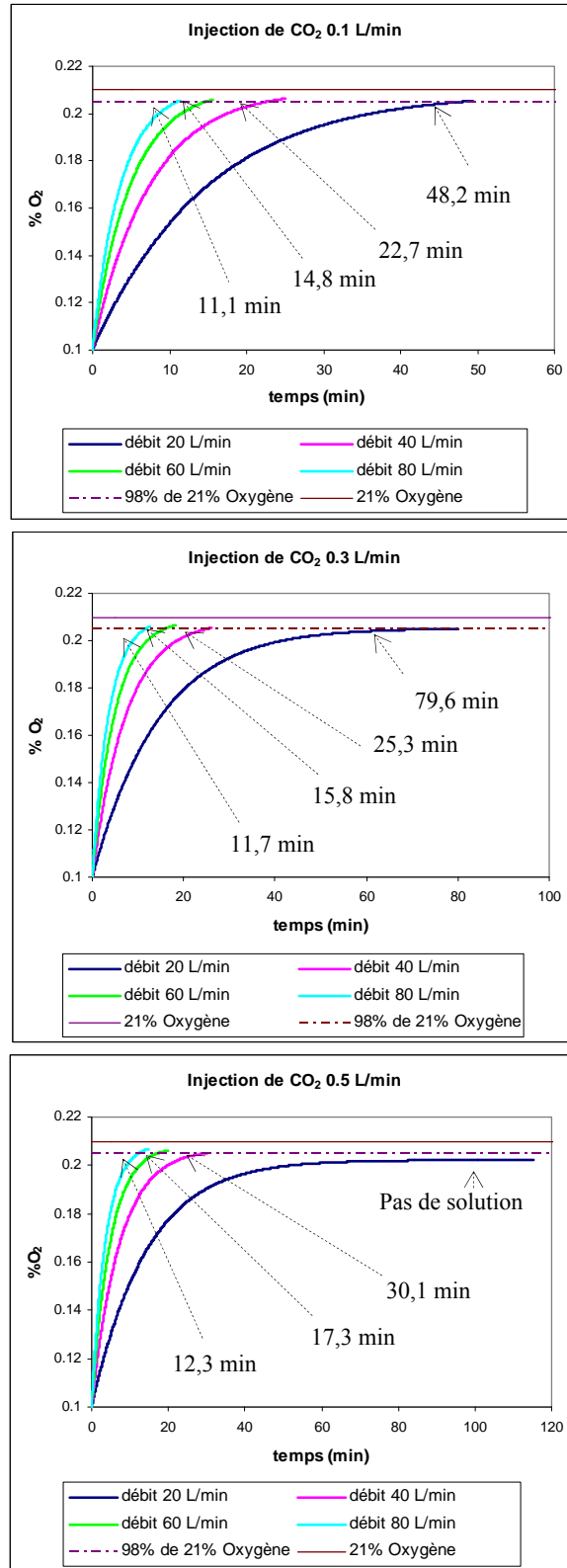


Figure 5-9: Variation du temps de dilution en fonction des taux d'injection et des débits de soufflage pour $V = 282,7$ L, $C_{iCO_2} = 30\%$ et $C_{iO_2} = 10\%$

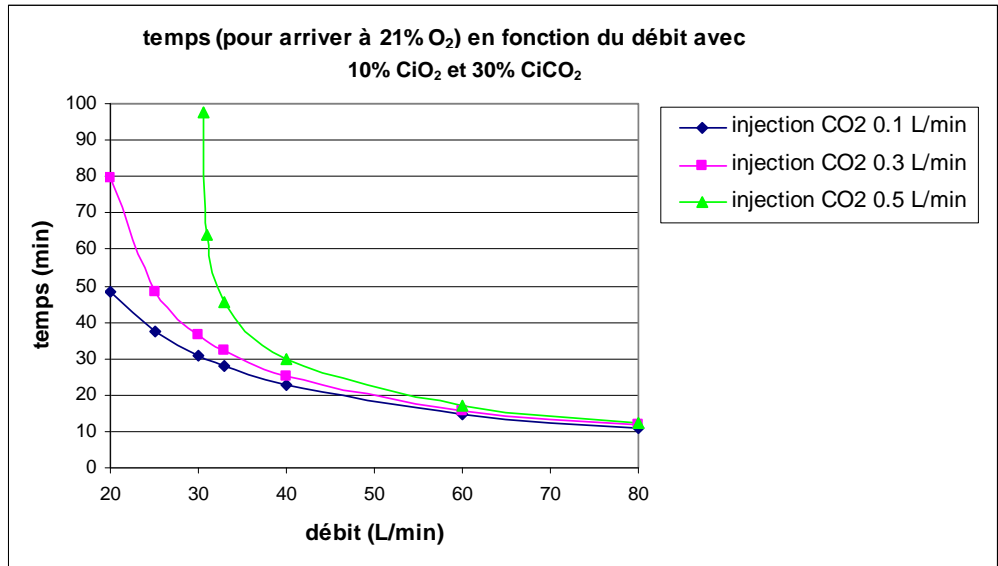


Figure 5-10 : Temps de dilution en fonction des taux d’injection de CO₂

5.3.5 Effet de la surface d’ensilage sur le temps de ventilation

L’effet de la forme de la surface d’ensilage a été regardé. Les quatre configurations présentées à la figure 5-11 ont été étudiées. Les temps de ventilation simulés numériquement ont été obtenus pour chacune de ces configurations et comparés les uns aux autres pour un débit de ventilation de 40 L/min et des concentrations initiales de CO₂ et d’O₂ de 30 % et 0 % respectivement (voir figure 5-12). Les résultats obtenus montrent que la forme de la surface d’ensilage n’influence pas la ventilation par soufflage. Par conséquent, le modèle mathématique obtenu dans la sous-section 5.3.2 demeure valable indépendamment de la forme géométrique de la surface d’ensilage, si le volume de la surface libre est maintenu constant.

La figure 5-13 montre l’évolution de la répartition de la concentration d’O₂ durant la ventilation. Ces visualisations indiquent que l’effet de la surface d’ensilage sur la ventilation est faible.

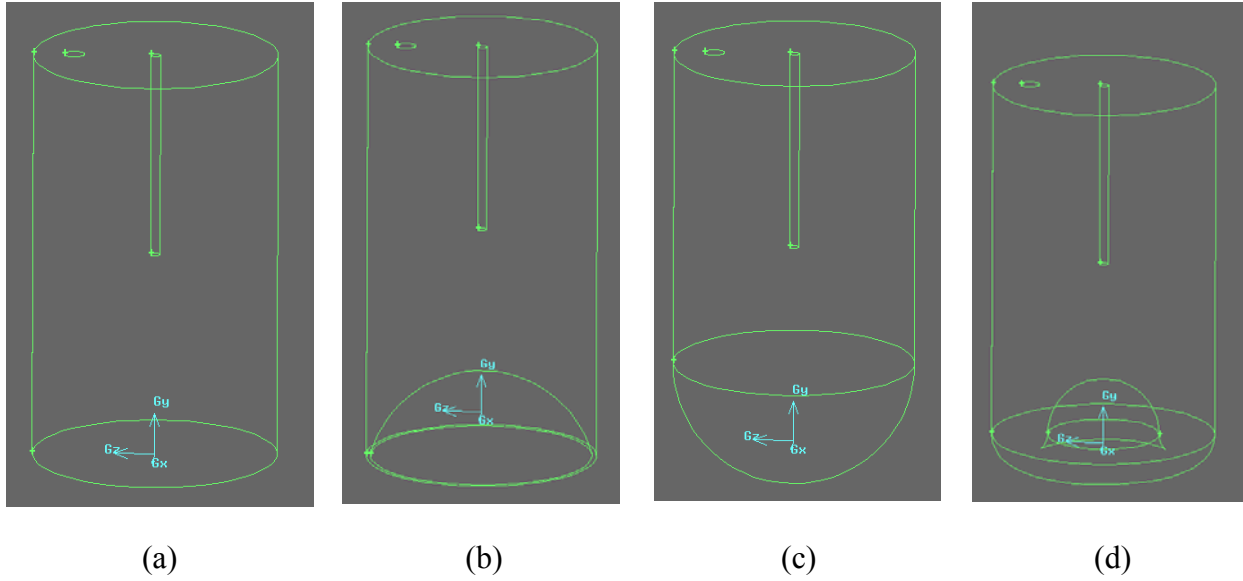


Figure 5-11: Différentes configurations de surface de fourrage avec volume d'espace libre constant égal à 282,7 L

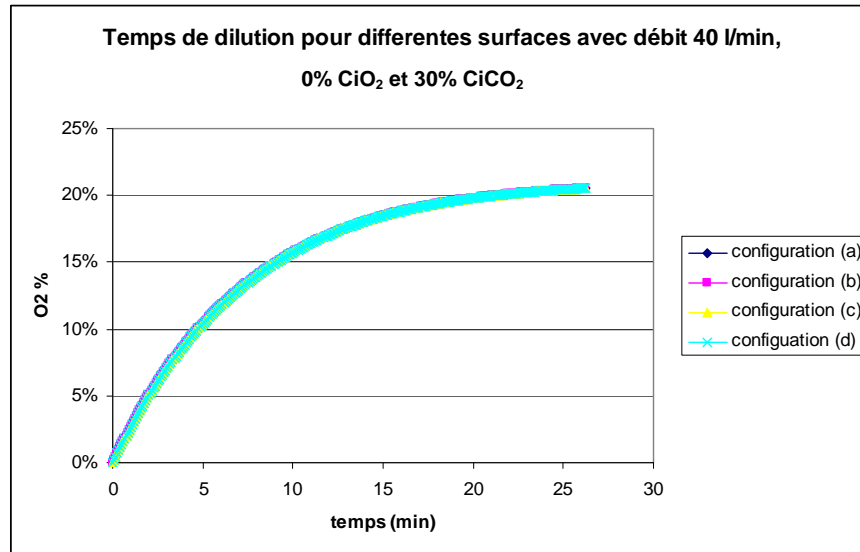


Figure 5-12 : Temps de dilution pour différentes configurations de surface de fourrage

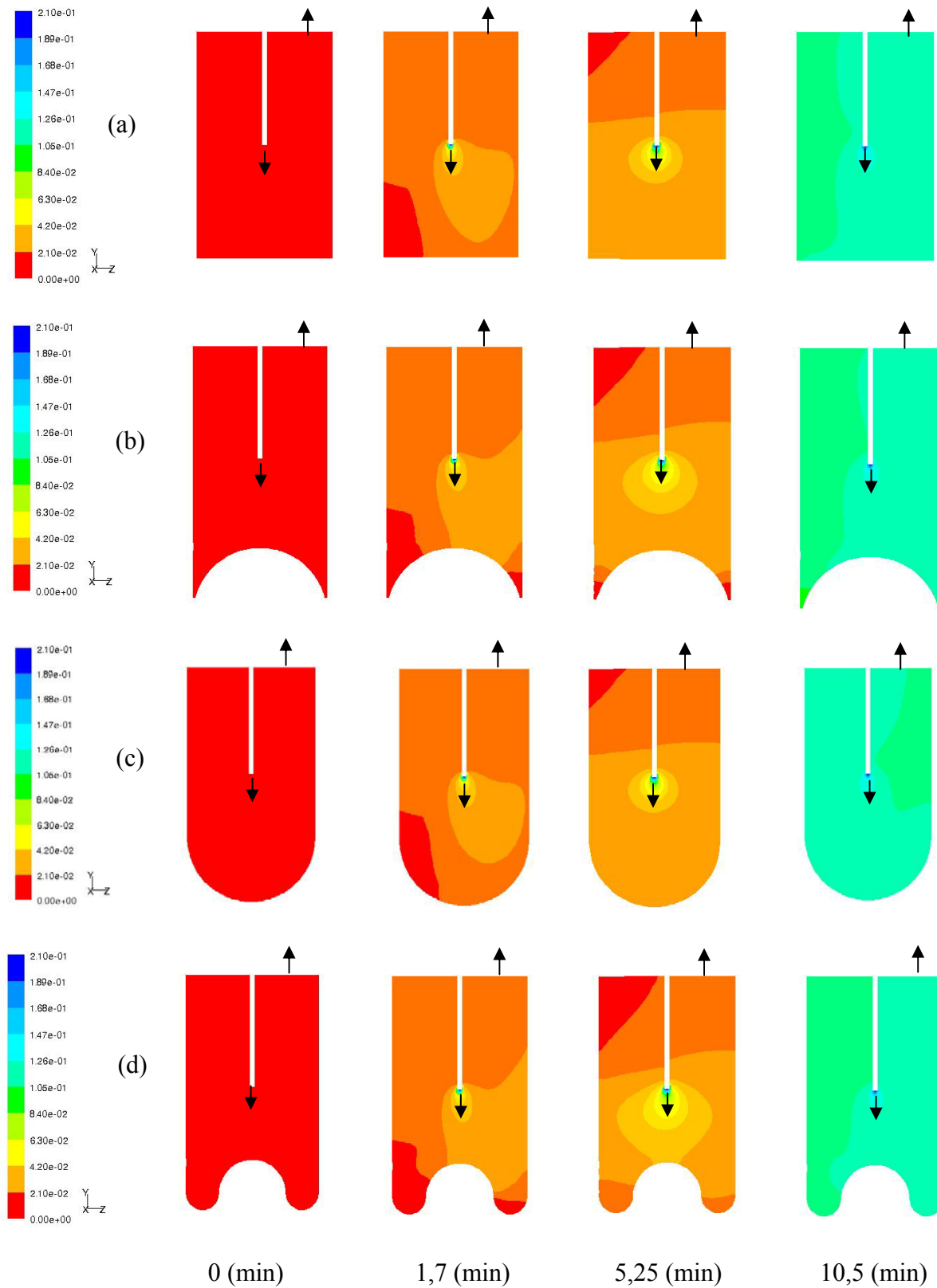


Figure 5-13 : Évolution de la dilution pour différentes configurations de silo

5.4 Instruments de mesure des gaz

L'utilisation d'instruments de mesure des gaz en ce qui a trait aux limites et contraintes dans le cadre d'une procédure d'entrée en espace clos est complexe pour des individus non expérimentés en hygiène du travail. Cette complexité réside entre autres au niveau de l'entretien et de l'étalonnage, de la prise de mesure représentative et de l'interprétation des lectures. Les principaux gaz à mesurer sont le CO₂ par la spectroscopie dans la région de l'infrarouge, l'O₂, le NO et le NO₂ par électrochimie.

L'entretien d'un ILD comprend des éléments et procédures qui nécessitent un apprentissage et surtout du matériel spécifique dont des gaz étalons qui ont des dates de péremption. Les principales vérifications sont au niveau de l'alimentation, qui demande un temps de stabilisation après un changement de piles, la vérification de la lecture et l'étalonnage. Ces deux derniers points sont distincts et essentiels avant toute entrée en espace clos. La vérification est un test sommaire pour valider les niveaux d'alarme et l'exactitude de la lecture afin qu'elle réponde aux spécifications du fabricant, $\pm 5\%$, l'étalonnage est l'ajustement de cette lecture à l'aide d'un gaz étalon. Les gaz étalons de NO et de NO₂ dans l'azote ont une date de péremption relativement courte au regard de la fréquence d'utilisation et du volume. Plus le volume est petit, plus la date est rapprochée. Or, dans le cas des producteurs, ce volume serait petit. De plus, ces bouteilles à petit volume sont coûteuses à l'achat et doivent être disposées, après usage, comme du matériel contaminé afin de respecter l'environnement. Enfin, ces gaz sont toxiques, donc exigent une installation sécuritaire et des procédures d'utilisation.

La stratégie de mesure et l'interprétation des lectures, prises avant l'entrée en espace clos, va au-delà d'un signal sonore ou visuel de dépassement d'une concentration ponctuelle pour des gaz mesurés. Le producteur peut s'introduire dans le silo via la chute ou par l'extérieur, selon ses besoins. Les résultats de la présente étude ainsi que la littérature scientifique démontrent que les gaz s'accumulent au niveau du fourrage et qu'ils peuvent descendre par la chute. Malgré ce transfert vers la chute, la prise de mesure à cet endroit ne signifie pas forcément qu'il n'y a pas de gaz en concentrations suffisantes dans le silo lui-même. De plus, la mesure pour sécuriser une entrée par l'extérieur est plus complexe, car un silo n'est pas toujours rempli à pleine capacité au moment de l'ensilage et suite aux reprises quotidiennes. La ventilation demeure le moyen de prévention incontournable, si effectuée selon les recommandations du présent rapport et tel qu'exigé par la réglementation (durée avant l'entrée et maintien au cours des travaux à effectuer).

De plus, certains gaz générés par le processus de fermentation du fourrage interfèrent sur la lecture de certains systèmes de détection. À titre d'exemple prenons la [cellule de NO](#)⁴ sur laquelle le NO₂ interfère. Enfin, le système de détection par IR est affecté par l'humidité présente dans le silo.

⁴ <http://www.citytech.com/PDF-Datasheets/4nt.pdf>.

En réponse aux exigences relatives à l'entrée en espace clos, la mesure des contaminants (RSST article 305, 306, 307) identifiés par la cueillette préalable (RSST article 300) est nécessaire avant d'entrer en espace clos; celui-ci doit être ventilé avant l'entrée et pendant l'exécution des travaux (RSST articles 302); un surveillant doit demeurer en contact visuel, auditif ou tout autre moyen avec le travailleur présent dans l'espace clos (RSST article 308); et une procédure de sauvetage doit être élaborée et éprouvée (RSST article 309).

6. DISCUSSION

Il est important de noter que les résultats rapportés pour les gaz de fermentation décrivent la situation étudiée pour les fourrages qui y sont ensilés, les conditions météorologiques de cette région et les méthodes de travail utilisées sur cette ferme de production laitière; ils ne sauraient s'appliquer de façon extrapolée à tous les silos du Québec. Ils sont axés sur les gaz de fermentation générés après l'ensilage des récoltes. Plusieurs autres dangers et risques n'ont pas été traités dans le cadre de cette étude, notamment les chutes de hauteur. Plusieurs règles de sécurité doivent être respectées avant d'entrer dans un espace clos, dont les procédures d'entrée et de sauvetage.

6.1 Documentation des fourrages

En se référant aux résultats de l'étude de Williams et coll. (1997) concernant la température du fourrage, il semble qu'il y ait eu fermentation du fourrage ensilé en juillet 2008 dans le silo #1. Comme dans leur étude, nos mesures, rapportées au tableau 5-2, ont été prises à $\pm 0,6$ m au-dessus du fourrage, pour des fourrages similaires et les écarts maximaux des températures sont atteints dans les 3 à 5 premiers jours, tout comme le décrit cette étude.

6.2 Documentation des gaz de fermentation

6.2.1 Mesures dans les silos

L'étude des données, inscrites au tableau 5-3, montre que les concentrations de CO_2 ont augmenté et celles de O_2 ont baissé suite à la fermentation. Pour l'ensilage dans le silo #1 terminé le 17 juillet, il y a eu au cours des 21 premiers jours, jusqu'à 1,2 % de CO_2 , 19,4 % d' O_2 , près de 70 ppm de NO et 29 ppm de NO_2 . Ces résultats concordent avec ceux d'études contemporaines (FACE 2008, Kedan et coll. 2007, Williams 1997, Groves et Ellwood 1989 Legris 2001 et Sabourin 1983). La technique de reprise utilisée sur cette ferme (reprise du fourrage sans période de fermentation) explique partiellement pourquoi les concentrations mesurées ne sont pas celles attendues. Effectivement, comme le montre la figure 5-4, à chaque reprise de fourrage, on observe une baisse dans les concentrations due à l'apport d'air neuf et à la dilution des gaz présents.

6.2.2 Mesures dans la salle d'alimentation

Il y avait présence de gaz de fermentation dans la salle d'alimentation et ce, le jour même de la fin de l'ensilage. Les lectures des gaz dans la salle d'alimentation confirment qu'il y a eu génération de gaz de fermentation au-dessus du fourrage, tel que décrit dans la littérature.

Ces mesures ont été répétées quelques jours après les ensilages des mois de septembre et octobre (tableau 5-5). Comme pour la première série de mesures (tableau 5-4), les concentrations dans la salle d'alimentation étaient moins élevées trois ou quatre jours après l'ensilage. De plus, les concentrations emmagasinées correspondant au bruit de fond dans cette salle avant la prise des mesures (voir tableau 5-6) ont démontré l'infiltration des gaz de fermentation via la chute. Au cours des reprises, la porte vers l'étable était fréquemment ouverte et il y avait alors dilution des gaz, particulièrement lorsque c'était la porte vers l'extérieur qui était ouverte.

Pour toutes les interventions, sauf celles du 22 août et du 16 octobre, la concentration du bruit de fond en NO₂, avant la reprise, était inférieure ou égale à la limite de quantification du système de détection des ILD. Rappelons que la porte de l'étable demeurait ouverte au cours des opérations. Ces résultats confirment l'hypothèse de départ à l'effet qu'il y avait transfert de gaz du silo vers la salle d'alimentation pendant les premiers jours de la période de fermentation.

6.2.3 Validation des mesures

Les mesures prises dans le silo avec des ILD indépendants et les tests d'étanchéité ont confirmé que les lectures faites par les autres instruments de mesure installés dans le système conçu par l'IRSST étaient exactes. Ceci a permis de confirmer que les instruments de mesure ne contribuaient pas à la différence de concentrations observées entre les mesures prises sur le terrain et celles des mesures faites en laboratoire. Ces différences sont dues plutôt à la technique de reprise du fourrage qui entraînait une entrée d'air neuf et une dilution des gaz présents.

6.3 Ventilation

Le silo à 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 obtenir des concentrations comparables au milieu environnant (environ 20,9 % en oxygène et 0,04 % en dioxyde de carbone). 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, notamment l'espace libre à ventiler, le débit de ventilation, la concentrations des gaz présents, les débits d'émission des gaz d'ensilage et la forme de la surface d'ensilage. Cette étude paramétrique a permis d'obtenir un modèle mathématique simple $\Delta t = 4 / \tau$ (voir équation 5.4) pour calculer le temps de ventilation nécessaire permettant une entrée sécuritaire du travailleur dans les silos à tour conventionnelle. Pour les débits habituellement utilisés (> 20 L/min), le modèle simplifié donne un temps de ventilation plus élevé de l'ordre de 28 %. Le tableau 6-1 montre une application de ce modèle pour différentes grandeurs de silos et différents volumes de remplissage, pour un débit de ventilation de 20 m³/min. Les grandeurs des silos utilisés correspondent aux silos à tour conventionnelle retrouvés en milieu agricole québécois.

En dehors de la période critique de fermentation estimée à 21 jours, les émissions des gaz d'ensilage sont faibles. Par conséquent, leur effet sur la ventilation serait très faible pour des débits de ventilation supérieurs à 20 L/min à l'échelle réduite du silo (équivalent à 20 m³/min pour un silo réel).

Le modèle mathématique obtenu dans cette étude est alors valide sans ou avec émission de gaz d'ensilage. Cette étude a aussi montré que le modèle est adéquat quelle que soit la forme de la surface d'ensilage.

Tableau 6-1 : Temps de ventilation pour différentes grandeurs de silo et pour un débit de soufflage de 20 m³/min

GRANDEUR DU SILO (pied X pied)	GRANDEUR DU SILO (m X m)	VOLUME SILO (m ³)	ΔT (min) REMPLE À 90 %	ΔT (min) REMPLE À 75 %	ΔT (min) REMPLE À 50%
12' X 30'	3,66 X 9,14	100	2	5	10
12' X 40'	3,66 X 12,19	134	3	7	13
12' X 50'	3,66 X 15,24	167	3	8	17
12' X 55'	3,66 X 16,76	184	4	9	18
12' X 60'	3,66 X 18,29	201	4	10	20
12' X 65'	3,66 X 19,81	217	4	11	22
14' X 30'	4,27 X 9,14	137	3	7	14
14' X 40'	4,27 X 12,19	182	4	9	18
14' X 50'	4,27 X 15,24	228	5	11	23
14' X 60'	4,27 X 18,29	273	5	14	27
14' X 65'	4,27 X 19,81	296	6	15	30
14' X 70'	4,27 X 21,34	319	6	16	32
16' X 30'	4,88 X 9,14	178	4	9	18
16' X 40'	4,88 X 12,19	238	5	12	24
16' X 50'	4,88 X 15,24	297	6	15	30
16' X 55'	4,88 X 16,76	327	7	16	33
16' X 60'	4,88 X 18,29	357	7	18	36
16' X 65'	4,88 X 19,81	386	8	19	39
16' X 70'	4,88 X 21,34	416	8	21	42
18' X 40'	5,49 X 12,19	301	6	15	30
18' X 50'	5,49 X 15,24	376	8	19	38
18' X 55'	5,49 X 16,76	414	8	21	41
18' X 60'	5,49 X 18,29	452	9	23	45
18' X 65'	5,49 X 19,81	489	10	24	49
18' X 70'	5,49 X 21,34	527	11	26	53
20' X 40'	6,10 X 12,19	372	7	19	37
20' X 50'	6,10 X 15,24	465	9	23	47
20' X 60'	6,10 X 18,29	557	11	28	56
20' X 65'	6,10 X 19,81	604	12	30	60
20' X 70'	6,10 X 21,34	650	13	33	65
20' X 75'	6,10 X 22,86	697	14	35	70
20' X 80'	6,10 X 24,38	743	15	37	74
24' X 50'	7,32 X 15,24	669	13	33	67
24' X 60'	7,32 X 18,29	803	16	40	80
24' X 65'	7,32 X 19,81	870	17	44	87
24' X 70'	7,32 X 21,34	936	19	47	94
24' X 75'	7,32 X 22,86	1003	20	50	100
24' X 80'	7,32 X 24,38	1070	21	54	107

6.4 Instruments de mesure des gaz

Des instruments à lecture directe sont disponibles pour la mesure des gaz caractéristiques de cet environnement de travail. Cependant, l'utilisation de ces instruments est complexe notamment lors de leur entretien et leur étalonnage avec des gaz toxiques, lors de la prise de mesure sécuritaire et représentative dans un espace clos et lors de l'interprétation des lectures.

7. CONCLUSION

Cette étude porte premièrement sur la documentation des gaz de fermentation de fourrage puis sur la ventilation des silos verticaux utilisés pour l'ensilage de ces différents fourrages.

Bien que le producteur, où l'étude s'est déroulée, prélève de l'ensilage au cours de la période de fermentation, estimée à 21 jours, les résultats obtenus confirment les études traitant de la fermentation du fourrage en silos verticaux. D'après les concentrations des gaz dans l'espace libre au-dessus du fourrage (jusqu'à 2,7 % de CO₂, 29 ppm de NO₂ et près de 70 ppm de NO) et l'écart des températures (plus de 3 °C), la fermentation du fourrage a eu lieu pour certains ensilages. De plus, le phénomène de migration des gaz par la chute du silo a également été confirmé.

Ces résultats viennent confirmer la nécessité de ventiler avant et pendant l'exécution des travaux dans un espace classifié « *espace clos* » au sens du RSST.

La ventilation mécanique par soufflage des silos a aussi fait l'objet de cette étude. La validation expérimentale des calculs de simulations numériques a permis de mener une étude paramétrique du temps de soufflage d'air nécessaire pour atteindre un environnement sécuritaire dans le silo. Un modèle mathématique simple est alors établi. Ce modèle estime la durée de ventilation à respecter avant d'intervenir dans les silos.

Un silo étant un espace clos, toutes les exigences reliées à ce type de situation où il y a des travaux à exécuter doivent être respectées, incluant notamment **la ventilation avant l'entrée et pendant l'exécution des travaux.**

8. BIBLIOGRAPHIE

ADC GAS ANALYSIS LIMITED. « LFG20 Landfill gas analyzer Operation manual ». 2002, 8p.

BAHLOUL, A.; ROBERGE B.; GRAVEL R.. « 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, 2008, 35 pages. http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst_100362.html

BAKER D. E et LEE R.. « Animal Handling Safety Considerations ». University of Missouri Extension, G1931, octobre 1993, 6 pages. {En ligne} <http://extension.missouri.edu/xplor/agguides/agengin/g01931.htm> (mars 2009).

BARBER E.M. et OGILVIE J.R. « Incomplete mixing in ventilated airspaces. » Part I. Theoretical considerations. Can. Agric. Eng. vol 24, pp 24-25, 1984.

BARBER, E.M. et ZULAK M.J., « Effectiveness of silage blowers for clearing gases from tower silos ». Dept. of Agricultural Engineering-University of Saskatchewan, 1984.

BRIGHTWELL AH. « Silo gas Poisoning in castle ». Canadian Veterinary Journal, vol 13, no 9, septembre 1972, p. 224-225.

CANADA SERVICE DE PLANS. « Danger gaz d'ensilage ». Plan M-7410 révisé 88.09, 1988, 9 pages. {En ligne} <http://www.cps.gov.on.ca/french/Plans/F7000/7410/M-7410L.pdf> (mars 2009).

CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). « Epidemiologic Notes and Reports Silo-Filler's Disease in Rural New York ». Note de l'éditeur Morbidity and Mortality Weekly Report, vol 31, no 28 juillet 1982, p. 389-391. {En ligne} <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/00001135.htm> (mars 2009).

CHEN Q. « Comparison of different $k - \varepsilon$ models for indoor airflow computations, Part B ». Numerical Heat Transfer, 1995, 28: 353-369.

CHEN Q. « Prediction of room air motion by Reynolds-stress models. Building and Environment, 1996, 31:233-244.

CONSEIL CANADIEN DE LA SÉCURITÉ (CCS). « Sur la ferme, bien travailler c'est bien se protéger ». 2006, 3 pages. {En ligne} <http://www.safety-council.org/CCS/sujet/SST/ferme.htm> (mars 2009).

CUMMINS B.T.; RAVENEY F.J. et JESSON M.W. « Toxic gases in tower silos ». Annals Occupational Hygiene, vol 14, 1971, p. 275-283.

CYR DAWNA L. et JOHNSON S. B. « Upright Silo Safety ». University of Maine Cooperative Extension (EMEXT) Maine Farm Safety Fact Sheet Series Bulletin 2305, Révisé avril 2005, 3 pages. {En ligne} <http://www.umext.maine.edu/onlinepubs/PDFpubs/2305.pdf> (avril 2009).

DOSS HOWARD J et CORNITA T. « Confined Space Hazards a Threat to Farmers ». Michigan State University Extension, 1987, 6 pages. {En ligne} <http://nasdonline.org/docs/d000801-d000900/d000836/d000836.html> (juin 2009).

DOUGLAS W.; HEPPEL N.G. et COLBY T.V. « Silo-Filler's Disease » Mayo Clinic Proceedings, vol 64, vol 3, mars 1989, p. 291-304.

FARM SAFETY ASSOCIATION. « Silo Gas – a swift and silent killer ». Fact Sheet no F-010, septembre 1985, 6 pages.

FATALITY ASSESSMENT & CONTROL EVALUATION (FACE). « Two Teen Workers Asphyxiate in an Agricultural Silo ». WA FACE Washington State Department of Labor & Industries Fatality Investigation, Report # 52-17-2008, mars 2008, 72 pages. {En ligne} <http://www.lni.wa.gov/Safety/Research/Face/Files/Silo.pdf> (mars 2009).

FATALITY ASSESSMENT & CONTROL EVALUATION (FACE). « Silos and Silos Gas hazards ». WA FACE Washington State Department of Labor & Industries Face fatal Facts #47-9-2005, Juillet 2005, 1 page. {En ligne} <http://www.lni.wa.gov/Safety/Research/FACE/files/SiloAlert.pdf> (mars 2009).

FATALITY ASSESSMENT & CONTROL EVALUATION (FACE). « FARMER Asphyxiated Due to Lack of Oxygen After Entering an Oxygen Limiting Silo 3 Days After Filling ». WA FACE Washington State Department of Labor & Industries Face fatal Facts #02M1143, décembre 2003, 11 pages. {En ligne} <http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html> (avril 2009).

FLEETHAM JOHN A; MUNT P. W et TUNNICLIFFE B. W. « Silo-filler's disease ». Canadian Medical Association Journal, vol 119, septembre 1978, p. 482-484.

FLUENT Inc. (2005) Fluent 6.2.16 User Manual, {En ligne} <http://www.fluent.com> (janvier 2006).

FOURNIER A. « La production de gaz toxique dans les ensilages, qu'en est-il? » Ministère de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation du Québec MAPAQ, Fiches techniques Agri réseau, 1999, p.3.

GIDDENS W.E.; WHITEHAIR C.K. et SLEIGHT S.D. « Nitrogen Dioxide (Silo Gas) Poisoning in Pigs ». American Journal of Veterinary Research, vol 131, no 10, 1970 p. 1779-1786.

GINGRAS B.; LEGRIS M.; ÉTHIER A.; FONTAINE F. et PAQUET B.. « Les espaces clos en agriculture ». 29^{ième} Congrès de l'AQHSST, mai 2000, 11 pages.

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. Règlement sur la santé et la sécurité du travail. S-2.1, r.19.01 Gazette officielle du Québec, Décret 885-2001, 2007.

Government of Saskatchewan. « Confined Space on Farm ». Occupational Health and Safety, avril 2009, 2 pages. {En ligne} <http://www.labour.gov.sk.ca/Default.aspx?DN=73111608-0f51-4aa0-8b3b-96f77a8677b4> (avril 2009).

GRAYSON R.R. « Silage cas poisoning: nitrogen dioxide pneumonia, a new disease in agricultural workers ». Annals of Internal Medicine, vol 43, no 3, septembre 1956, p.393-408.

GROVES J.A. et ELLWOOD P.A.. « Gases in forage tower silos ». Annals Occupational Hygiene, vol 33, no 4, 1989. p.519-535.

HAGEN K. et DEBOY G.. « Silo gas a deadly hazard on the farm ». Purdue New, Purdue Agriculture Farm Safety, septembre 2003, p. 3 {En ligne} <http://news.uns.purdue.edu/UNS/html3month/030908.Deboy.silogas.html> (mars 2008).

- HAYHURST E.R. et SCOTT E. « Four Cases of Sudden Death in a Silo ». Journal of the American Medical Association, vol LXIII, no 18, octobre 1914, p. 1570-1572.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). « Silage clamps hazard – nitrogen dioxide (NO₂) ». HSE Information sheet, Agriculture Information no 15, août 1998, p. 2. {En ligne} <http://www.hse.gov.uk/pubns/ais15.pdf> (mars 2009).
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). « Managing confined spaces on farms ». HSE Information sheet, Agriculture Information, no 26, 1998 révisé 2002, 4 pages. {En ligne} <http://www.hse.gov.uk/pubns/ais26.pdf> (avril 2009).
- HORVATH E. P.; DOPICO A.G.; BARBEE R.A. et DICKIE H.A. « Nitrogen Dioxide-Induced Pulmonary Disease ». Journal of Occupational Medicine, vol 20, no 2, février 1978, p.103-110.
- JIANG S; BARBER E.M., MEIRING A.G. et JOFRIET J.C. « Toxic gas production and silo ventilation ». Canadian Agricultural Engineering, vol 33, no 1, 1991, p. 151-159.
- JIANG S.; JOFRIET J.C. et MEIRING A.G. « Breathing of Oxygen-Limiting Tower silos ». American Society of Agricultural Engineering, vol 32, no 1, février 1989, p. 228-231.
- JIANG S; JOFRIET J.C et BUCHANAN-SMITH J. « Temperature observation in a bottom-unloading concrete silo ». Canadian Agricultural Engineering, vol 30, no 2, 1988, p. 249-255.
- KEDAN G.; SPIELHOLZ P.; SJOSTROM T.; TRENARY B. et CLARK R.E. « An assessment of Gases in Oxygen-Deficient Hay Silos and the Effects of Forced Ventilation ». Journal of Agriculture Safety and Health, vol 13, no 1, 2007, p.83-95.
- LEGRIS M. « Silos Il suffit d'une fois ... ». Travail et santé, vol 17 no 2, juin 2001 p.46-51.
- LOUIS F.; GUEZ M. et LE BACLE C. « Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone ». Institut nationale de recherche et de sécurité INRS, Dossier médico-technique N°79TC74 1999, p.179-194.
- LOWRY T. et SHUMAN L.M. « Silo-Filler's Disease – A Syndrome caused by Nitrogen dioxide ». The journal of the American Medical Association, vol 162, no 3, septembre 1956, p.153-160.
- MCLOUGHLIN M.F.; MCMURRAY C.H.; DODDS H.M. et EVANS R.T. « Nitrogen dioxide (silo gas) poisoning in pigs ». The Veterinary Record, vol 116, 1985, p. 119-121.
- MEIERING A.G.; COURTIN M.G.; SPOELSTRA S.F.; PAHLOW G.; HONIG H.; SUBDEN R.E. et ZIMMER E. « Fermentation kinetics and toxic gas production of silage ». American Society of Agriculture Engineers, vol 31, no 2, 1988, p 613-621.
- MURPHY D.J. « Silo Gases – The Hidden Danger ». National Ag Safety Database NASD, Fact Sheet Safety # 16 publié en 1991 et révisé en avril 2002, 3 pages. {En ligne} <http://www.cdc.gov/nasd/docs/d001001-d001100/d001002/d001002.html> (mars 2009).
- NIEDERMEIER R.O. et BURRIS R.H. « Watch out for silo gas ». University of Washington Circular 324, October 1963.
- NIOSH, FACE Program. « Farmer Asphyxiated Due to Lack of Oxygen After Entering an Oxygen Limiting Silo 3 Days After Filling », Investigation: # 02MI143, 2002. {En ligne} <http://www.cdc.gov/niosh/face/stateface/mi/02mi143.html> (mars 2010).

O'KIELY P.; TURLEY T. et PAM R. « Exposure of calves to nitrogen dioxide in silage gas ». Veterinary Record, vol 144, no 13, 1999, p. 352-353.

PARAGON B.M., « Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires ». Agence française de sécurité sanitaire des aliments (afssa), 2004, p. 1-118, {En ligne} <http://www.afssa.fr/Documents/ALAN-Ra-ensilage.pdf> (mars 2009).

PAVELCHAK N.; CHURCH L.; ROERIG S., LODON M.; WELLES W. et CASEY G. « Silo Gas Exposure in New York State Following the Dry Growing Season of 1995 ». Applied Occupational and Environmental Hygiene, vol 14, no 1, 1999, p. 34-38.

PETERSON W.H.; BURRIS R.H.; SANT R. et LITTLE H.N. « Production of Toxic gas (nitrogen oxides) in Silage Making ». Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol 6, no 2, 1958, p. 121-126.

PETERSON W.H.; THOMA R.W. et ANDERSON R.F. « Yellow Gas from Corn Silage ». Hoard's Dairyman, décembre 1949, p. 870-871.

PROGRAMME CANADIEN DE SURVEILLANCE DES BLESSURES EN MILIEU AGRICOLE (PCSBMA). « Accidents mortels liés au milieu agricole au Canada de 1990 à 2005 ». 2008, 62 pages. {En ligne} <http://www.caisp.ca/> (avril 2009).

RASMUSSEN M.D. et BASCOM R. « Silo Filler's Disease ». septembre 2006 {En ligne} <http://emedicine.medscape.com/article/302133-overview> (mars 2009).

REID W.S.; TURNBULL J.E.; SABOURIN H.M. et IHNAT M. « Silo gas: Production and detection ». Canadian Agricultural Engineering, vol 26, no 2, 1984, p. 197-207.

REID W.S., SABOURIN H.M., TURNBULL J.E. et IHNAT M. « Silo gas : ventilation of tower silo headspaces ». Canadian Agricultural Engineering, vol 27, no 2, pp 127-135, fall 1985.

ROSENMAN K.D. « Diagnosing Silo-Filler's Disease ». Physician's Newsletter, vol 1, no 3, 1992, 3 pages. {En ligne} <http://www.cdc.gov/nasd/docs/d000801-d000900/d000831/d000831.html> (mars 2009).

SABOURIN H.M. « Production, détection et évaluation des gaz toxiques (CO₂ et NO_x) dans les silos verticaux ». Institut de recherche et statistique, Dossier 35.SZ.01843.0.ME09, Agriculture-Canada, 1983, 119 pages.

SAVOIE P. « Entreposage des ensilages » Colloque sur les plantes fourragères L'ensilage : du champ à l'animal ». 1998, p. 40.

SCALETTI J.V.; GATES C.E.; BRIGGS R.A. et SCHUMAN L.M. « Nitrogen Dioxide Production from Silage. 1. Field Survey ». Agronomy Journal, vol 52, no 7, 1960, p. 269-372.

SCHROTTMAIER J. « Protection from silo gas ». Ergonomics, vol 25 no 1 1982 p. 89-105.

SCOTT E. G. et HUNT W.B. « Silo Filler's Disease ». Chest, vol 63, no 5, mai 1973, p.701-706.

SMITH G. K. « Carbon dioxide, caves and you ». 21^{ème} Biennial Australian Speleological Federation Conference, 1997, {En ligne} <http://wasg.iinet.net.au/Co2paper.html> (mars 2009).

SREBRIC J. et CHEN Q. « Simplified numerical models for complex air supply diffusers ». Heating, Ventilation, Air-Conditioning and Refrigeration Research, 2002, 8:277-294.

SUND J.M.; NIEDERMEIER R.P. et BURRIS R.H. « Watch out for Silage gas ! ». National Ag Safety Database NASD, Fact Sheet Safety A1871 publié en 1991, révisé en avril 2002, 3 pages. {En ligne} <http://www.cdc.gov/nasd/docs/d000701-d000800/d000741/d000741.html> (mars 2009).

WARREN C.P.W. « Lung disease in farmers ». Canadian Medical Association Journal, vol 116, no 4, 1977, p.391-394.

WILLIAMS A.G.; HOXEY R.P. et LOWE J.F. « Changes in temperature and silo gas composition during ensiling, storage and feeding-out grass silage ». Grass and Forage Science, vol. 52, 1997, p. 176-189.

YUAN X.; CHEN Q.; GLICKSMAN L.R; HU Y. et YANG X. « Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation». American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers Transactions, 1999, 105:340-352.

ZWEMER F.L; PRATT D.S. et MAY J.J. « Silo Filler's Disease in New York State ». American Review of Respiratory Disease, vol 146, no 3, septembre 1992, p.650-653.